

**Данилин Б. С.** Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с. — ISBN 5-283-03939-0

Показана роль тонкопленочной технологии в производстве интегральных схем. Анализируются основные факторы, определяющие процесс ионного распыления. Рассматривается осаждение пленок магнетронным, термоионным, ионно-кластерным и электронно-циклотронным методами, а также стимулированное плазмой осаждение пленок из газовой фазы при пониженном давлении. Показаны пути обеспечения вакуумно-технических параметров в установках для осаждения тонких пленок. Рассмотрены перспективы применения плазменных процессов в производстве интегральных схем.

Для научных и инженерно-технических работников, использующих в своей практической работе осаждение пленок с помощью низкотемпературной плазмы. Может быть полезна также студентам старших курсов, аспирантам и преподавателям вузов.

Табл. 55. Ил. 97. Библпогр. 182.

Рецензент Н. В. Плешивцев

Ответственный редактор З. Д. Андреевко

1604120000-034  
Д 051(01)-89 21-89

ISBN 5-283-03939-0

© Энергоатомиздат, 1989

Научное издание

**Данилин Борис Степанович**

**ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ  
ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК**

Редактор *З. Д. Андреевко*

Художник переплета *В. Ф. Громов*

Художественные редакторы: *А. Т. Кирьянов, Т. Н. Хромова*

Технический редактор *Н. В. Чиранова*

Корректор *И. А. Володяева*

ИБ № 2357

Сдано в набор 28.10.88      Подписано в печать 13.01.89      Т-04059  
Формат 60×88<sup>1/16</sup>      Бумага типографская № 2      Гарнитура литературная  
Печать высокая Усл. печ. л. 20,09      Усл. кр.-отт. 20,09      Уч.-изд. л. 22,04  
Тираж 2150 экз.      Заказ 6573      Цена 3 р. 60 к.

---

Энергоатомиздат. 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени  
МПО «Первая Образцовая типография» Союзполиграфпрома при Гос-  
комиздате СССР. 113054 Москва, М-54, Валовая, 28.

*Боевым друзьям, участникам  
героической обороны Ленин-  
града, посвящает свой труд  
автор*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В принятых на XXVII съезде КПСС Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года указано: «Осуществить комплекс мероприятий по совершенствованию технологии производства. Расширить в двенадцатой пятилетке в 1,5—2 раза применение прогрессивных базовых технологий. Обеспечить широкое внедрение в народное хозяйство принципиально новых технологий — электронно-лучевых, плазменных, радиационных...» Внедрение принципиально новых прогрессивных базовых процессов имеет первостепенное значение для развития микроэлектроники, которая по существу является катализатором научно-технического прогресса, существенно ускоряющим развитие всех основных отраслей народного хозяйства. Для микроэлектроники характерен лавинообразный процесс развития, который в настоящее время сопровождается освоением выпуска интегральных схем (ИС) с субмикронными размерами элементов, что требует «научного перевооружения» специалистов, работающих в этой отрасли.

Необходимость экономии энергии и реагентов заставляет технологов уделять все более пристальное внимание процессам, происходящим в низкотемпературной газоразрядной плазме (НГП), в которой температура атомов и молекул близка к температуре окружающей среды, в то время как электроны обладают энергией, достаточной для возбуждения, диссоциации и ионизации атомов и молекул. В результате этого выход продуктов реакции в НГП значительно больше термодинамически равновесного, рассчитанного только на основе температуры газа. Поэтому в НГП можно значительно более эффективно (т. е. с меньшими затратами энергии и реагентов) по сравнению с традиционными термическими, газовыми и жидкостными химическими средами проводить многие технологические процессы, в том числе осаждение тонких пленок.

В последние годы НГП начинает все шире использоваться для получения тонких пленок, вытесняя энергоемкий и эконо-

мически менее эффективный метод термического испарения в высоком вакууме. Однако сведения о применении плазмы для осаждения тонких пленок разрознены, противоречивы и, что самое главное, не охватывают весь комплекс затрагиваемых в этой проблеме вопросов. Поэтому автор поставил перед собой задачу собрать, систематизировать и обобщить разрозненные сведения о применении НПП для осаждения тонких пленок в производстве интегральных схем и полупроводниковых приборов.

Книга является логическим продолжением опубликованной в 1987 г. Энергоатомиздатом книги по применению НПП для травления и очистки материалов [1]. Она построена на основе ранее опубликованных книг [2—8], в которых были рассмотрены термовакуумные [2] и ионно-плазменные [3—5] методы получения тонких пленок, ионное [1, 6], ионно-химическое и плазмохимическое [1, 7] травление микроструктур, а также применение НПП для активации процессов осаждения пленок из паровой фазы при пониженном давлении [8].

В книгу включены материалы аналитических обзоров по вакуумным методам получения тонкопленочных элементов ИС [9], по использованию электронных и ионных процессов и НПП в производстве ИС [10—12], по обеспечению равномерности осаждения пленок на подложках большой площади, имеющих сложный профиль приемной поверхности [13—15], по получению пленок путем высокочастотного ионного распыления и термоионного покрытия [16—18], по применению магнетронных распылительных систем (МРС) [19—23].

Представляя собой «прекрасный образец долгожданного высокоскоростного источника распыления и ошеломляюще очевидное решение технической проблемы, которая не поддавалась разрешению и осуществлению в течение более чем 30 лет» [24] и имея целый ряд преимуществ по сравнению с электронно-лучевым испарением (ЭЛИ), ВЧ-распылением и с другими системами распыления, МРС обладает удачным сочетанием ряда уникальных свойств, которые позволяют наносить и травить пленки металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков. Поскольку за последние годы МРС по существу заняли лидирующее положение среди всех других вакуумных методов получения тонкопленочных структур в производстве ИС, продолжая совершенствоваться и развиваться, то МРС посвящена значительная часть книги. Что касается термоионного покрытия [17], нанесения пленок с помощью кластеров и автоэмиссии [25], то эти методы по ряду причин до сих пор не нашли применения в производстве ИС, поэтому они подробно не описываются. Это в равной мере относится к обычным диодным, триодным и тетродным распылительным системам, которые за последние годы полностью вытеснены более экономичными

МРС. В то же время в книге значительное место уделено новому и интенсивно развивающемуся методу осаждения пленок из газовой фазы при пониженном давлении, в котором ВЧ-, СВЧ-плазма и излучение лазеров используются в качестве стимулятора и активатора технологического процесса [2, 26—28]. Последние главы книги посвящены рассмотрению вакуумно-технических проблем, а также контролю и управлению процессами осаждения тонких пленок [29]. В заключение рассмотрены перспективы дальнейшего применения НГП в производстве ИС [11].

Автор глубоко признателен старшему научному сотруднику ИАЭ им. И. В. Курчатова кандидату технических наук Н. В. Плешивцеву за большой труд по рецензированию рукописи и позитивную критику, которая позволила исключить ряд неточностей в изложении материала. Кроме того, автор считает своим приятным долгом выразить глубокую признательность своим коллегам по работе, перечень совместно опубликованных статей с которыми приведен в списке литературы.

*Автор*

## НАИБОЛЕЕ ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АИИ — автономный ионный источник  
БИС — большая интегральная схема  
ВЧ — высокая частота  
ИК — инфракрасный участок спектра  
ИС — интегральная схема  
КМОП — комплементарная (дополняющая) МОП-структура  
КР — коэффициент распыления  
МОП — структура металл — оксид — полупроводник  
МРС — магнетронная распылительная система  
НГП — низкотемпературная газоразрядная плазма  
РС — распылительная система  
СБИС — сверхбольшая интегральная схема  
СВЧ — сверхвысокая частота  
ТКП — темное катодное пространство  
ТЭИС — тонкопленочный элемент интегральной схемы  
УБИС — ультрабольшая интегральная схема  
УФ — ультрафиолетовый участок спектра  
ЭЛИ — электронно-лучевой испаритель

## Глава 1

### ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СБИС

#### 1.1. РОЛЬ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СБИС

Основной областью применения тонких пленок является производство интегральных схем (ИС). Развитие компьютерной техники, систем управления и средств связи непрерывно стимулирует спрос на полупроводниковые ИС. Среди всех видов ИС в настоящее время благодаря высокой плотности записи информации, незначительной потребляемой мощности и малого времени обращения доминирующее положение занимают полупроводниковые запоминающие устройства (ЗУ). Лидирующая роль среди ЗУ принадлежит динамическим оперативным ЗУ с произвольной выборкой (ДОЗУ ПВ), объем памяти которых уже в настоящее время достиг 1 Мбит.

По мере того как ЭВМ будут более доступными как по стоимости, так и по простоте обращения (в связи с развитием техники синтеза речи, распознавания голоса, анализа изображений и др.), объем памяти ДОЗУ будет возрастать, что найдет свое отражение в изменении основных видов продукции мирового рынка ДОЗУ (табл. 1.1) [30].

В табл. 1.1 не указаны ДОЗУ с объемом памяти 16 и 64 Мбит. Предполагается, что первые появятся в 1991—1992 гг., а вторые — в 1994—1996 гг. (рис. 1.1) [31].

Развитие ДОЗУ ПВ емкостью 16 Мбит еще сравнительно недавно рассматривалось как магистральное направление совершенствования полупроводниковой технологии. Однако в настоящее время высказывается мнение, что в связи с разработкой

Таблица 1.1. Динамика изменения основных видов продукции мирового рынка ДОЗУ, %

Год	Объем памяти, Кбит			
	64	256	1000	4000
1987	28	67	5	—
1988	8	72	20	—
1990	—	30	67	3
1995	—	10	40	50

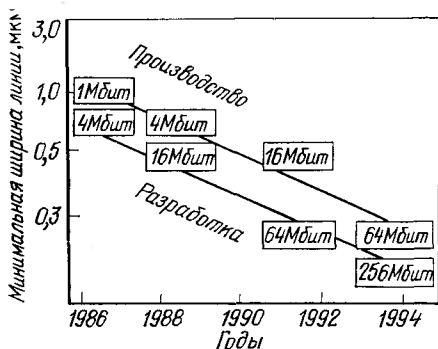


Рис. 1.1. Существующее и прогнозируемое изменение объема памяти и минимальной ширины линий ДОЗУ

структур с вертикальными конденсаторами и транзисторами технология изготовления ИС ДОЗУ ПВ становится все более специализированной и мало пригодной для создания других типов ИС.

Увеличение объема памяти ЗУ сопровождается увеличением диаметра исходных кремниевых пластин (табл. 1.2) [32].

Освоение выпуска мегабитовых ЗУ сопровождается последовательным переходом от производства больших (БИС) к сверхбольшим (СБИС), а в дальнейшем и к ультрабольшим (УБИС) интегральным схемам. В табл. 1.3 приведено изменение параметров ДОЗУ ПВ в зависимости от степени интеграции [30].

Следует иметь в виду, что после того, как будут созданы новые поколения СБИС и УБИС с уменьшенной геометрией элементов, неизбежно возникнет ряд проблем, связанных с «изно-

Таблица 1.2. Существующее и прогнозируемое изменение объема выпуска кремниевых пластин, их размеров и стоимости

Диаметр пластин, мм	Объем выпуска, %					Сравнительная стоимость, отн. ед.
	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1989 г.	1990 г.	
75	5	3	1	1	1	—
100	51	47	39	33	24	1
125	30	32	34	25	36	3
150	14	18	25	29	34	5
200	0	0	1	2	5	9

Таблица 1.3. Параметры ДОЗУ ПВ в зависимости от степени интеграции

Параметр	БИС	СБИС	УБИС
Количество элементов на кристалле	$10^3-10^5$	$10^5-10^7$	$10^7-5 \cdot 10^8$
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	20-55	50-70	80-100
Диаметр пластины кремния, мм	75-100	100-150	200
Минимальная ширина линий, мкм	2-1,5	1,2-0,8	0,7-0,3
Толщина подзатворного диэлектрика, нм	90-40	40-15	15-10
Глубина р-п-перехода, мкм	1,2-0,8	0,8-0,2	0,2-0,1
Количество шаблонов, шт.	6-10	8-15	15-20



сом» тонкопленочных слоев. Дело в том, что по мере уменьшения ширины межсоединений резко возрастают токовые нагрузки, в результате чего довольно быстро достигаются предельные значения стойкости к воздействию электромиграции. Одновременно обостряется проблема «износа» окисных пленок в результате воздействия горячих электронов. Таким образом, хотя изготовление ИС с элементами чрезвычайно малых размеров в принципе вполне возможно, срок службы подобного рода ИС может оказаться настолько малым, что встанет вопрос о том, целесообразно ли вообще изготавливать ИС со столь малыми размерами элементов.

За последние годы четко просматривается тенденция преимущественного развития МОП-технологии, которая согласно прогнозам в конце текущего столетия будет составлять примерно 75% всей технологии полупроводниковых ИС, причем основная ее доля (40—50%) будет приходиться на КМОП-технологии.

Столь широкое использование КМОП-технологии обусловлено ее традиционными достоинствами, к которым в первую очередь относятся:

- малая потребляемая мощность, что позволяет использовать КМОП ИС в аппаратуре с батарейным питанием, аварийных системах и т. д.;

- низкая рабочая температура КМОП ИС, поэтому возможно применение стандартных кристаллодержателей и пластмассовых корпусов;

- малая восприимчивость КМОП ИС-памяти к случайным сбоям;

- повышенная помехоустойчивость КМОП ИС, благодаря которой легче сохранить достаточный запас работоспособности схем по мере уменьшения геометрических размеров и роста сложности контроля технологических процессов;

- более простая тактовая синхронизация;

- меньшее влияние статического электричества благодаря мощной защите от воздействия электростатики.

Таким образом, применение КМОП-технологии обеспечивает существенное повышение эксплуатационных качеств и надежности изготавливаемых приборов и систем.

Присущий КМОП ИС недостаток — проблема включения паразитных четырехслойных структур (так называемое «защелкивание») может быть устранен за счет использования глубоких изолирующих канавок, применением эпитаксиальных структур, а также использованием структур «кремний на изоляторе». Что касается технологической сложности КМОП-технологии, то она уменьшается с уменьшением геометрических размеров по сравнению со сложностями других конкурирующих технологий.

На основе МОП-технологии уже созданы первые ДОЗУ с объемом памяти 4 Мбит, которые являются провозвестником бу-

дущего магистрального направления развития как ИС-памяти, так и логических ИС. В этих приборах используется новая транзисторная структура, выполненная в глубокой канавке, а также спаренные проводники в виде пересекающихся разрядных и словарных шин с минимальными промежутками между ними.

Предполагается, что КМОП-схема инвертора может работать при размерах элемента менее 0,1 мкм, а в МОП-инверторах допустима ширина линий 0,2 мкм. Прогнозируемое минимальное время задержки на вентиль в КМОП-схемах составит 10 пс, потребляемая мощность — около 1 мкВт на вентиль. Коэффициент масштабирования этих параметров составит 0,01 от уровня, достигнутого в настоящее время в производстве ИС. Показатель качества (произведение мощности на задержку) по прогнозам способен улучшиться на 0,0001, а его предельное значение составит  $10^{-6}$  пДж, что почти эквивалентно ИС на сверхпроводящих джозефсоновских контактах. Предельная степень интеграции, как ожидается, составит 64 Мбит для МОП 3У и 5 млн. вентиляей для логических ИС.

В табл. 1.4 приведены данные о материалах и числе слоев, используемых при изготовлении ИС по различным технологиям, а в табл. 1.5 — о назначении основных видов материалов МОП-технологии для получения тонких пленок [33].

Важнейшим технологическим приемом, способствующим увеличению быстродействия ИС, является реализуемая в КМОП-приборах многоуровневая металлизация. В том случае, если для этой цели используется алюминий (или его сплавы с кремнием и медью), необходимо, чтобы температура всех процессов, проводимых после осаждения алюминия, не превышала 550 °С. Достоинства НГП в данном случае бесспорны, поскольку температура атомов и молекул при этом близка к температуре ок-

Таблица 1.4. Материалы и число слоев, используемых при изготовлении ИС с помощью различных видов технологий

Материал	Число слоев в технологии				
	КМОП	МОП	КМОП/МОП	Двуды Шотки	Эмиттер-но-связанная логика
Поликремний	2	1-3	1	—	1
Эпитаксиальные слои кремния	1	—	—	1	1
Толстые слои оксида кремния	4	2-4	3	1-2	3
Фосфорно-силикатное стекло на нитриде кремния	2-3	1-2	1	2	2-3
Алюминий	1	1-2	1	2	2-3
Золото	0-2	0-2	0-1	—	—
Другие металлы	1-2	0-1	—	1	—
Сплициды металлов	1-2	0-2	—	—	—
Прочие материалы	—	—	—	1-2	—

Таблица 1.5. **Материалы для осаждения тонких пленок, используемые в МОП-технологии**

Материал	Назначение	1985 г.	1990 г.
Поликремний	Затвор	←	
Силицид титала	Электрод затвора		←
Силицид титана	Электрод затвора	←	
Силицид молибдена	Электрод затвора	←	
Силицид вольфрама	Электрод затвора		←
Сплавы алюминия	Коммутация	←	
Молибден	Коммутация, затвор		←
Поликремний	Коммутация	←	
Вольфрам	Коммутация, затвор		←

ружающей среды. Диэлектриком служат слои оксида кремния, получаемые распылением со смещением на подложке, в результате чего обеспечивается планаризация слоя. В перспективе в качестве альтернативы алюминию предлагается вольфрам, а окиси кремния — фосфоросиликатное (ФСС) и борофосфоросиликатное стекло.

Освоение промышленного выпуска СБИС с элементами субмикронных размеров помимо разработки новых методов экспонирования, проявления и травления микроструктур настоятельно требует дальнейшего развития и совершенствования методов нанесения тонких пленок. Прогресс в дальнейшем повышении степени интеграции непосредственно связан с уменьшением площади, занятой межсоединениями, которая в настоящее время составляет около 70% площади кристалла СБИС. Для сокращения площади под межсоединения изготовители ищут способы уменьшить их ширину и толщину, а также используют многоуровневую разводку.

Тенденция сокращения минимальных размеров элементов в СБИС до микронного и субмикронного уровней выдвигает новые требования к технологии материалов межсоединений, прежде всего к однородности их свойств на всем протяжении соединений в многослойных схемах, где число активных элементов достигает  $10^6$  на кристалл. Поэтому необходимо всестороннее совершенствование материалов для затворов, шин, токопроводящих соединений, а также материалов межуровневой изоляции.

При уменьшении в определенном масштабе размеров активных элементов нельзя использовать этот же масштаб для уменьшения пассивных элементов (шин, проводников и пр.). Сокращение размеров активных элементов обеспечивает улучшение их основных параметров (увеличение коэффициента усиления, уменьшение времени задержки, снижение рассеиваемой мощ-

ности). Однако уменьшение вертикальных и горизонтальных размеров элементов СБИС не решает проблему снижения влияния паразитных эффектов (сопротивления контактов и межсоединений, сопротивления диффузионных областей, емкости инверсионных областей), поскольку эти параметры не уменьшаются пропорционально размерам элементам, и в конечном счете паразитные эффекты существенно снижают выходные параметры СБИС. Это обуславливает необходимость совершенствования технологии формирования межсоединений как в результате использования новых материалов, так и за счет разработки новых методов нанесения тонкопленочных слоев, что позволяет существенно повысить качество и надежность СБИС.

## 1.2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАТВОРОВ И МЕЖСОЕДИНЕНИЙ СБИС

Основным материалом для формирования затворов ИС является поликремний. Он обеспечивает низкое пороговое напряжение МОП ПТ и достаточно хорошее покрытие «ступенек». Нанесение поликремния — легкоуправляемый процесс, который хорошо вписывается в *n*-канальную МОП-технологии. Однако его использование требует применения высокотемпературных процессов легирования и отжига, что не соответствует четко обозначившейся тенденции перехода к низкотемпературным процессам. Кроме того, при малых размерах элементов сопротивление межсоединений на основе поликремния становится достаточно большим. Поэтому ожидается вытеснение поликремния полисилицидами, тугоплавкими металлами (W, Mo) и благородными металлами (Au, Pt).

Особенно привлекателен метод покрытия (шунтирования) поликремния силицидами металлов и тугоплавкими металлами, поскольку он позволяет сохранить многие свойства поликремния (хорошую адгезию, высокую стабильность, удовлетворительный омический контакт) и в то же время на порядок уменьшить поверхностное сопротивление за счет применения полисилицидов. Как видно из табл. 1.6, метод шунтирования тугоплавкими металлами предпочтителен, особенно при использовании специального способа осаждения W, при котором поверхностное сопротивление пленок W резко снижается [34].

К материалам межсоединений с точки зрения приборных параметров предъявляют следующие требования: отсутствие электромиграции при высоких плотностях тока, равномерное покрытие ступенек планарной структуры прибора, минимальное образование бугорков и вспучивания на поверхности, высокая коррозионная стойкость, хорошая адгезия.

Таблица 1.6. Сравнение показателей современных и перспективных материалов для формирования затворов СБИС

Показатель	Поликремний	Поликремний, шунтированный силицидом	Поликремний, шунтированный тугоплавким металлом
Сопротивление	Пл.	Уд.	Хор.
Стойкость контакта с кремнием	Хор.	Уд.	Хор.*
Перекрытие ступенек	Хор.	Уд.	Хор.
Получение тонких линий	Хор.	Уд.	Хор.
Низкие механические напряжения	Хор.	Уд.	Хор.
Формирование защитного окисла	Хор.	Хор.	Пл.
Низкая температура процесса	Хор.	Пл.	Хор.
Производительность процесса	Хор.	Уд.	Хор.
Технологичность	Хор.	Уд.	Уд.

Примечание. Отл.—отличные; Хор.—хорошие; Ср.—средние; Уд.—удовлетворительные; Пл.—плохие; 900 К.

В качестве проводящих материалов для межсоединений используют Al, его сплавы с Si и Cu, а также Au и W (табл. 1.7) [34].

Для получения контактов с кремнием (омических и контактов Шотки) и межсоединений ИС наиболее широко используется Al. Основные достоинства Al—это низкая стоимость, простота процесса металлизации, низкое удельное сопротивление, хорошая адгезия, возможность формирования рисунков сложного профиля.

Характерная особенность Al—его взаимодействие с Si в широком диапазоне температур с образованием твердых растворов. Растворимость Si в Al по массе достаточно велика: 0,25% при 400 К и 0,8% при 500 К. В этом диапазоне температур коэффициент диффузии Si в тонкие пленки Al примерно в 40 раз выше, чем в объемный Al. Это объясняется тем, что диффузия Si в тонких пленках Al идет главным образом вдоль границ зерен. Таким образом, поглощение Si в чистых пленках Al усиливается поликристаллической структурой последнего. Кроме взаимодействия с Si на начальной стадии Al активно реагирует с кислородом, образуя  $Al_2O_3$ . При этом Al восстанавливает  $SiO_2$  по реакции  $3SiO_2 + 4Al = 3Si + 2Al_2O_3$ , что имеет существенное значение для снижения сопротивления контактов в результате удаления образующихся окисных пленок Si. Удаление избыточного оксида с помощью Al также необходимо для обеспечения хорошей адгезии Al к слою  $SiO_2$ . При металлиза-

Таблица 1.7. Сравнение показателей перспективных проводящих материалов для создания межсоединений

Показатель	Алюминий	Алюминиевые сплавы	Алюминиевые сплавы с промежуточным барьером	Золото с промежуточным барьером	Вольфрам
<i>Физические свойства</i>					
Электропроводность	Хор.	Хор.	Хор.	Хор.	Уд.
Сопротивление омического контакта	Ср.	Ср.	Ср.	Ср.	Ср.
Адгезия	Хор.	Уд.	Хор.	Хор.	Уд.
Однородность поверхности	Уд.	Ср.	Ср.	Хор.	Хор.
Температура плавления	Ср.	Ср.	Ср.	Ср.	Отл.
Устойчивость к электромиграции	Пл.	Ср.	Хор.	Ср.	Отл.
Устойчивость к диффузии	Отл.	Отл.	Отл.	Пл.	Отл.
Устойчивость к коррозии и окислению	Уд.	Уд.	Уд.	Хор.	Пл.
Стойкость обычных контактов	Уд.	Ср.	Хор.	Ср.	Хор.
Стойкость мелких контактов	Пл.	Уд.	Ср.	Уд.	Ср.
<i>Параметры процесса</i>					
Прочность сварного соединения	Хор.	Уор.	Хор.	Отл.	Уд.
Возможность формирования рисунка	Ср.	Отл.	Уд.	Пл.	Ср.
Возможность создания многослойных структур	Уд.	Ср.	Ср.	Пл.	Ср.
Качество перекрытия ступенек	Ср.	Ср.	Ср.	Ср.	Хор.
Качество перекрытия ступенек (в структурах с субмикронными размерами)	Отл.	Уд.	Уд.	Уд.	Хор.
Простота процесса	Уор.	Ср.	Ср.	Ср.	Ср.

ции чистым Al удаление  $\text{SiO}_2$  происходит даже при комнатной температуре, в то время как при металлизации кремния сплавом Al+Si этого не наблюдается и имеет место более высокое контактное сопротивление, которое уменьшается только после отжига.

Для металлизации на основе Al характерна электромиграция — перенос массы металла в результате диффузии по границам зерен при протекании токов высокой плотности. В результате электромиграции могут образовываться свищи, раковины, бугорки и утолщения. Существенное снижение электромиграции (примерно на порядок) может быть достигнуто при добавлении к Si примерно 4% Cu. Однако при этом понижается коррозионная стойкость пленок в присутствии хлора и затрудняется их плазмохимическое травление. Наибольшей стойкостью к электромиграции обладают пленки Al, имеющие так называемую бамбуковую структуру, состоящую из цепочки мо-

нокристаллических  $\langle 111 \rangle$  зерен Al размером 20—40 мкм. Такая структура пленок может быть получена при оптимально выбранных режимах осаждения Al и нагреве подложки до  $T=450\text{ K}$ . Кроме того, повышение стойкости к электромиграции может быть достигнуто путем анодирования поверхности пленки Al.

Другой особенностью металлизации на основе Al является проникновение при термообработке Al внутрь контактных окон на глубину более 1 мкм. Если на участках контакта есть диффузионный переход с глубиной менее 1 мкм, то при этом может произойти замыкание перехода. Для уменьшения замыкания переходов в Al добавляют Si (около 1%), однако при этом возникает проблема образования осадков: при отжиге добавка Si растворяется в Al, но при охлаждении до комнатной температуры выделяется в виде монокристаллических узлов, эпитаксиальных слоев или же эпитаксиальных канавок. Формирование структуры того или иного вида зависит от содержания Si в Al, температуры отжига в степени охлаждения. Особенно интенсивно осаждение Si происходит на краях окисленных участков, в результате чего большая часть площади контактного окна покрывается толстым слоем Si, существенно увеличивая контактное сопротивление. Кроме того, после отжига распределение Si в пленке Al становится крайне неоднородным. Si, как правило, скапливается на границе раздела Al—Si и на поверхности.

Сравнивая различные типы металлизации, приведенные в табл. 1.5, можно сделать вывод, что для элементов с размерами, которые характерны для современных ИС, наиболее подходят сплавы Al. Однако по мере уменьшения ширины линий все более существенную роль начинают играть три недостатка Al: ограниченные возможности по плотности пропускаемого через него тока, недостаточно стабильный контакт с Si и низкая коррозионная стойкость.

### 1.3. ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

Разработка и освоение промышленного выпуска сверхбыстродействующих СБИС, а в недалеком будущем УБИС невозможны без кардинального решения проблемы межсоединений. При увеличении быстродействия до предельно возможного (20 пс для кремниевых и 10 пс для транзисторов на арсениде галлия) возникает парадоксальная ситуация, при которой быстродействие СБИС определяется не быстродействием дискретных транзисторов, а в первую очередь паразитным сопротивлением и емкостью межсоединений. При этом СБИС в целом следует рассматривать уже не как совокупность активных элементов, связанных друг с другом через межсоединения, а скорее как некую сложную многоуровневую систему проводников, возбуж-

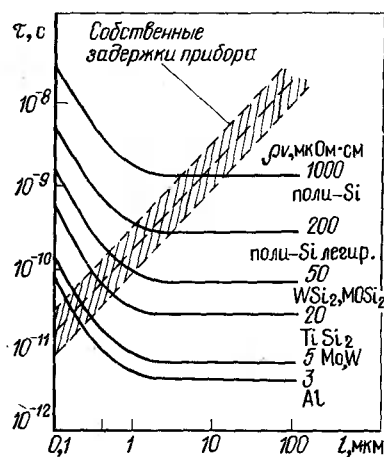


Рис. 1.2. Зависимость времени задержки на активных элементах и токоведущих дорожках длиной 1 мкм от ширины линий топологического рисунка

даемую активными элементами. Если еще сравнительно недавно быстрдействию СБИС на МОП-структурах в основном определялось собственными временами задержки активных элементов, то по мере уменьшения их размеров и увеличения габаритов кристаллов СБИС оно все в большей степени начинает определяться задержками на внутрисхемных межсоединениях

(рис. 1.2). Выбранная для сравнения длина дорожек (1 мкм) примерно соответствует максимальной длине межсоединений из материала затвора в МОП-СБИС. Межсоединения должны обеспечивать значения времени задержки на них меньше, чем время задержки компонентов, поэтому легированный поликремний в качестве материала затворов приемлем лишь для ИС с большими значениями ширины линий, а для ИС с проектными нормами 1—3 мкм очевидна необходимость использования для затворов материалов с более низкими удельными сопротивлениями.

Из материалов межсоединений полупроводниковых приборов и ИС наименьшим удельным сопротивлением обладает Al, но в МОП-ИС он используется в основном в качестве материала верхнего уровня металлизации, так как даже легированный кремнием алюминий интенсивно взаимодействует с кремнием подложки при температурах более 450 °С и не может применяться в качестве материала самосовмещенных со сток/истоками затворов, обычно изготавливаемых перед проведением высокотемпературных процессов активации примесей в сток/истоках, термического окисления и оплавления стекол.

Тугоплавкие металлы с удельным сопротивлением около 5 мкОм·см, в частности вольфрам и молибден, можно использовать для создания верхнего уровня металлизации и затворов, однако оксиды этих металлов летучи, и поэтому они несовместимы с традиционной технологией изготовления МОП-ИС, в которой после изготовления затворов необходимы процессы, протекающие в окислительной атмосфере, например формирование оксида кремния и оплавление фосфоросиликатного стекла.

Наиболее подходят для низкоомных затворов силициды металлов, так как при определенных режимах окисления на их



поверхности можно выращивать качественные пленки термического оксида кремния в технологическом маршруте, аналогичном традиционному маршруту изготовления МОП-ИС с поликремниевыми затворами.

Диффундирующим реагентом при формировании силицидов всех тугоплавких металлов является кремний, высота потенциального барьера Шотки у силицидов находится в узком диапазоне 0,55—0,65 эВ, температура формирования ниже температуры последующих термических операций, а температура образования эвтектического сплава с кремнием выше температуры типовых процессов при изготовлении ИС. Таким образом, ни один из этих параметров не ограничивает выбора определенного силицида в качестве материала затвора. Устойчивость различных силицидов к окислительной атмосфере не одинакова, однако для любого из них можно подобрать режим окисления для получения на их поверхности качественного оксида кремния, не содержащего оксид металла. Химическая стойкость силицидов также непостоянна; наиболее ярким примером является высокая скорость травления силицидов металлов группы IVA в растворах с плавиковой кислотой, обычно используемых для очистки поверхности или травления оксида на различных этапах изготовления ИС. Но и это не является решающим фактором при выборе силицида, так как перспективные методы сухого травления исключают эту проблему.

Окончательный выбор силицида для изготовления затворов определяют такие параметры, как его удельное сопротивление и химическая активность металла при взаимодействии с оксидом кремния, которая зависит от разности удельных теплот образования оксида металла и оксида кремния.

Если оксид металла значительно более стабилен, чем оксид кремния, т. е. энтальпия его образования более отрицательна, то существует вероятность восстановления подзатворного оксида при взаимодействии его с силицидом. Если же оксид кремния намного стабильнее оксида металла, то при формировании силицида путем термообработки слоя нанесенного на кремний металла возникают проблемы из-за наличия на поверхности кремния естественного оксида толщиной около 2 нм. Для формирования силицида в реакции взаимодействия металла с кремнием предпочтителен металл с энтальпией образования оксида несколько более отрицательной, чем у оксида кремния. Дополнительным условием выбора металла для формирования силицида в качестве материала разводки и затворов является возможность селективного по отношению к силициду удаления непрореагировавшего металла при жидкостном травлении.

Сравнение свойств различных тугоплавких металлов и их силицидов показывает, что для разводки и затворов ИС наиболее подходит дисилицид титана, обладающий низким удельным

сопротивлением и удовлетворяющий всем перечисленным требованиям [34, 35].

В стандартном процессе изготовления *n*-МОП-ИС с поликремниевыми затворами на поверхности кремниевой подложки *n*-типа над областями транзисторов формируют маску нитрида кремния с расположенным под ней тонким буферным слоем оксида, снижающим механические напряжения между нитридом и подложкой. В немаскированные участки проводят ионное легирование бора для создания самосмещенных с границами транзисторов антиканальных областей, локальным окислением кремния выращивают толстый оксид, окружающий области МОП-ПТ, и удаляют нитрид кремния; в области МОП-ПТ проводят ионное легирование мышьяком для подгонки порогового напряжения МОП-ПТ. Затем удаляют буферный оксид и наращивают подзатворный оксид. Для ИС с проектными нормами 3 мкм его толщина обычно составляет 60 нм, а для ИС с нормами 1 мкм она снижается до 15 нм. Осаждением из газовой фазы при низком давлении наносят слой легированного фосфором поликремния толщиной 500 нм и методом фотолитографии формируют затворы и 1-й уровень разводки, а далее ионным легированием мышьяком с высокой дозой изготавливают самосмещенные с затворами сток/источковые области МОП-ПТ. Термическим окислением на поверхности затворов и сток/источков наращивают слой беспористого оксида толщиной 150 нм и для увеличения толщины диэлектрика осаждают слой фосфоросиликатного стекла толщиной 800 нм. Вскрывают контактные окна, проводят оплавление фосфоросиликатного стекла, сглаживающее рельеф ступенек, и формируют алюминиевую металлизацию.

Процесс изготовления *n*-МОП-ИС на основе силицида (рис. 1.3) [34] аналогичен стандартному. Отличие заключается в том, что в качестве материала затвора использован дисилицид титана (*A*), который наносится напылением с использованием мишени из сплава титана с кремнием или совместным напылением титана и кремния из различных мишеней. Для снижения удельного сопротивления дисилицида после напыления проводят термообработку при 800 °С. Рисунок затвора создают методом сухого травления дисилицида (*B*), после чего создается слой оксида кремния (*B*) и осаждается алюминий (*Г*). Основное преимущество данного маршрута состоит в возможности выращивания плотного оксида кремния одновременно с окислением сток/источков, однако для реализации этой возможности необходимо оптимизировать параметры процесса напыления силицида таким образом, чтобы в нем было достаточно кремния. К недостаткам маршрута относится необходимость дополнительного легирования области канала для компенсации смещения порогового напряжения по сравнению с пороговым

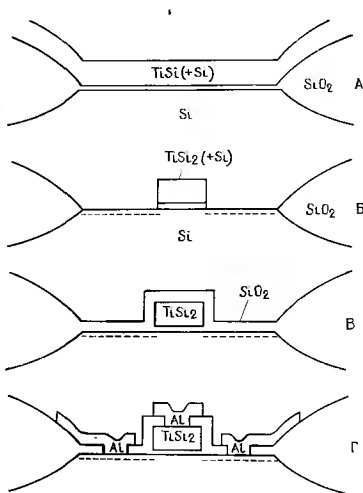


Рис. 1.3. Цилиндричный процесс изготовления  $n$ -МОП-ИС

напряжением МОП-ПТ с поликремниевым затвором. Этот недостаток может быть устранен в аналогичном по последовательности полицидном процессе изготовления  $n$ -МОП-ИС, в котором в качестве материала затвора служит полицид, получаемый напылением дисилицида титана или титана на пленку поликремния с последующей термообработкой для получения низкоомного дисилицида.

На рис. 1.4 [34] показана технологическая последовательность изготовления МОП-ИС, обеспечивающая формирование дисилицида на поверхности сток/истоков самосовместенно с полицидным затвором (salicide-процесс) без использования дополнительных операций фотолитографии. После создания, как в стандартном процессе, рисунка поликремниевых затвора осаждают слой оксида кремния (А) и проводят его анизотропное сухое травление селективно к кремнию, в результате чего боковые поверхности затвора остаются маскированными слоем оксида. Нанесают пленку титана (В) и проводят термообработку, в процессе которой на поверхности сток/истоков и затвора

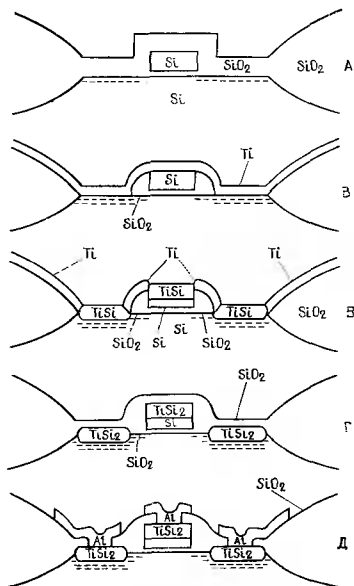


Рис. 1.4. Самцидный [self-aligned-silicide (polysilicide)] процесс изготовления МОП ИС

образуется дисилицид, а затем непрореагировавший титан селективно стравливают (B) с поверхности оксида жидким травителем. Поверхность дисилицида окисляют (Г), вскрывают контактные окна и формируют алюминиевую металлизацию (Д). В отличие от стандартного процесса сток/истоки в этом процессе можно формировать после создания оксида на боковой поверхности затвора, что предотвращает смыкание стока и истока и устраняет воздействия горячих электронов в МОП-ПТ малых размеров.

На рис. 1.5 [34] показан процесс изготовления МОП-ИС, обеспечивающий возможность самосовмещенного формирования дисилицида титана на поверхности поликремнивого затвора (silicide-процесс) без существенного усложнения стандартного

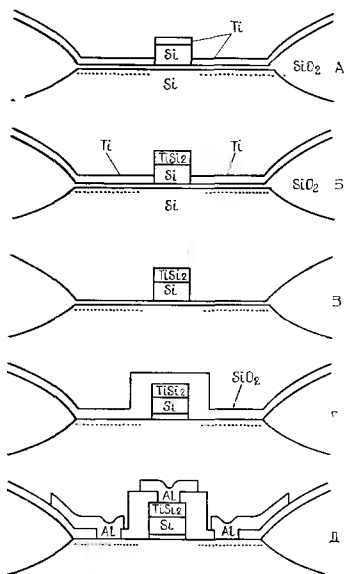


Рис. 1.5. Сталцидный (STL self-aligned-silicide) процесс изготовления МОП-ИС

процесса, заключающегося, в частности, в использовании операции анизотропного травления оксида. Важная особенность данного процесса состоит в необходимости наличия подзатворного оксида на поверхности стоков/истоков после создания рисунка затвора, а дисилицид на его поверхности формируется напылением титана (А), термообработкой (Б) и селективным удалением непрореагировавшего титана с поверхности оксида (В). Затем поверхность стоков/истоков и затворов окисляется (Г), вскрываются контактные окна и формируется алюминиевая металлизация (Д).

Для создания затворов пленки силицидов тугоплавких металлов можно наносить методами ионного распыления или осаждения из газовой фазы.

В силицидном процессе изготовления МОП-ИС дисилицид титана наносят непосредственно на подзатворный оксид, поэтому для его формирования предпочтительнее метод осаждения из газовой фазы, так как при использовании ионного распыления в подзатворном оксиде возможно дефектообразование при воздействии на него ионов высокой энергии. Кроме того, методы химического осаждения из газовой фазы обеспечивают качественное покрытие осаждаемой пленкой ступенек рельефа, что необходимо для предотвращения обрывов дорожек затворов.

В salicide- и stalicide-процессах равномерное покрытие рельефа ступенек при нанесении пленки титана необязательно, более того, в stalicide-процессе оно нежелательно. Поэтому с учетом возможности предварительной очистки поверхности поликремния перед осаждением непосредственно в камере в этих процессах предпочтительнее использовать метод нанесения распылением.

В полицидном процессе для формирования дисилицида наносят пленку титана на поликремний с последующей термообработкой, поэтому допускается любой метод нанесения, однако предпочтительнее метод распыления с предварительной очисткой поверхности поликремния в объеме вакуумной камеры.

Во всех методах формирования пленок дисилицида титана, включая метод химического осаждения из газовой фазы, для снижения их удельного сопротивления необходима высокотемпературная обработка, при которой должно быть обеспечено минимальное взаимодействие пленок с окружающей средой, так как кислород и азот, растворяясь в дисилициде, существенно влияют на его проводимость. Поэтому термообработку следует проводить в условиях высокого вакуума или в инертной среде. Однако оборудование для отжига подложек в вакууме очень сложно и непроизводительно, а при отжиге в инертной среде необходимы тщательная очистка газов и еще большее усложнение оборудования, чтобы устранить обратный диффузионный поток азота и кислорода из окружающей атмосферы.

Возможность использования стандартного оборудования для проведения термообработки в атмосфере азота обеспечивается наличием на пленке титана тонкого слоя кремния, предотвращающего проникновение кислорода и азота к расположенной под ним пленке до полного протекания реакции образования дисилицида. Поэтому наиболее удобно для нанесения пленок оборудование, обеспечивающее получение дисилицида путем совместного осаждения титана и кремния из различных источников, а затем позволяющее в едином вакуумном цикле формировать на поверхности титана тонкий слой кремния.

Если же использование кремния на поверхности титана при формировании дисилицида отжигом в азоте недопустимо, как,

например, в salicide- и stalicide-процессах, то в качестве защитной пленки можно использовать пленку Mo, которую после отжига следует удалить вместе с непрореагировавшим Ti в селективном травителе.

В определенных случаях желателен взаимодействие образующегося при отжиге силицида Ti с N<sub>2</sub>, как, например, в полинитридном процессе. При этом образующийся над силицидом нитрид Ti служит эффективным барьерным слоем, препятствующим взаимодействию с материалом затвора формируемой далее алюминиевой металлизации.

В процессе формирования и последующих отжигов силицидов имеет место их взаимодействие с примесями, содержащимися в кремнии. Установлено, например, что в дисилициде W коэффициент диффузии легирующих кремний элементов на 1—2 порядка больше ( $3,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  при 800°C), чем в кремнии, что увеличивает диффузию примесей из кремния в силицид и повышает поверхностное сопротивление расположенных под ним слоев (правда, в большинстве случаев это несущественно, так как они шунтированы низкоомным силицидом).

Основным преимуществом низкоомных силицидов тугоплавких металлов по сравнению с другими соединениями при использовании в технологии изготовления ИС является возможность формирования на их поверхности однородного оксида кремния при отжиге в окислительной атмосфере. Основным механизмом формирования силицидов тугоплавких металлов — это диффузия кремния через силицид, поэтому неудивительно, что окисление силицидов происходит по аналогичному механизму. Следует отметить, однако, что кремний, содержащийся в силициде, не участвует в реакции окисления, а доставка кремния к растущему слою оксида осуществляется из расположенного под силицидом кремниевого слоя. Но если этот источник кремния недостаточен или если реакция окисления протекает слишком быстро по сравнению с процессом диффузии кремния, например, при низкой температуре процесса окисления, то оксид может содержать большое количество атомов металла. При окислении дисилицида титана в диапазоне температур выше 750°C оксид практически всегда не содержит атомов титана.

Скорости окисления силицидов различных тугоплавких металлов примерно равны, несколько превышают скорость окисления сильно легированного фосфором поликремния и в несколько раз больше скорости окисления монокристаллической кремниевой подложки с ориентацией поверхности по плоскости (100), а по качеству выращенные на поверхности силицида пленки оксида аналогичны полученным окислением поверхности поликремния, хотя несколько уступают им по диэлектрической прочности.

В основном силициды металлов применяют при изготовлении ИС с малыми проектными нормами, поэтому для формирования их рисунка целесообразно использование процессов сухого травления. Исключение составляют самосовмещенные процессы формирования дорожек силицида при отжиге пленки металла, нанесенной на рисунок поликремния, в котором сухому травлению подвергается не силицид, а поликремний. Силициды тугоплавких металлов можно травить в разных газовых смесях на плазмохимическом оборудовании различных систем, выбор которых определяется необходимой степенью селективности скорости травления силицида по сравнению с оксидом кремния и необходимым профилем боковых стенок формирующихся токопроводящих дорожек. Наилучшие результаты при этом дает травление силицидов тугоплавких металлов и, в частности, дисилицида титана в атмосфере паров фторсодержащих соединений.

Следует отметить, что дисилицид Ti с очень большой скоростью травится в жидких растворах, содержащих даже незначительное количество плавиковой кислоты, поэтому разработка методов сухого травления этого материала весьма актуальна.

В табл. 1.8 приведены свойства силицидов различных материалов [34, 35].

Таблица 1.8. Свойства силицидов

Силицид	Удельное сопротивление, мкОм·см	Реагент, диффундирующий через силицид	Высота потенциального барьера Шоттки, эВ	Удельная теплопроводность образования оксида в атмосфере травления с оксидом кремния $4 \cdot 10^3$ Дж/атом	Устойчивость к HF	Температура образования силицида, °С	Минимальная температура образования эвтектического сплава с кремнием, °С
TiSi <sub>2</sub>	15—16	Si	0,6	—14,5	Очень плохая	600	1320
ZrSi <sub>2</sub>	35—40	—	0,55	—24	То же	700	1355
HfSi <sub>2</sub>	45—50	Si	—	—28,5	"	750	1300
VSi <sub>2</sub>	50—55	Si*1	0,55	+5,5	Плохая	500	1385
NbSi <sub>2</sub>	50	—	—	+11,5	"	650	1295
TaSi <sub>2</sub>	35—45	Si	0,59	+10,7	"	650	1385
CrSi <sub>2</sub>	600	—	0,57	+17,5*3	"	450	1300
MoSi <sub>2</sub>	40—90	Si	0,55	*2	Средняя	525	1410
WSi <sub>2</sub>	26—90	Si	0,55	*2	"	550	1440
CoSi <sub>2</sub>	18—20	Si*1	0,64	+51	Очень плохая	550	1195
InSi <sub>3</sub>	—	—	0,94	+43	То же	960	1470
NiSi <sub>2</sub>	50	Ni	0,70	+50	"	750	966
PdSi	30—35	Pd, Si	—	+88	Хорошая	700	720
PtSi	28—35	Pt	0,87	+98	"	300	830

\*1 Диффузия металла с образованием силицидов.

\*2 Оксид летучий.

\*3 Температура плавления оксида <1000 °С.



Таблица 1.9. Сопоставление методов осаждения пленок

Процесс	Испарение	Распыление	Осаждение из газовой фазы
Силицидный	2	3	1
Полицидный:			
металл	2	1	3
силициды	3	2	1
Самцидный	2	1	3
Сталицидный	2	1	3
Оксидный	2	1	?
Молибденовый	1	3	2
Факторы, определяющие выбор метода осаждения:			
низкая энергия ионов	+	-	+
контроль стехиометрии	-	+	-
степень покрытия ступенек	-	+ или -	+
вероятные примеси	O, C, H	Ag, H	F, C, H

Выбор метода осаждения (испарение, ионное распыление, осаждение из газовой фазы) существенно зависит от используемой технологии изготовления МОП-структур. В процессах, использующих молибден и силициды, необходимо осаждение материала на тонкий подзатворный диэлектрик, поэтому метод ионного распыления малопригоден, поскольку высокоэнергетические частицы могут внести дефекты в оксид. Тем не менее можно применять ионную очистку поверхности непосредственно перед осаждением того или иного материала. Следует отметить, что в отличие от исходных металлических пленок тонкие пленки силицидов всегда имеют низкий уровень примесей, поскольку последние вытесняются в процессе реакции на поверхность, а затем селективно удаляются. В оксидном процессе осаждение обогащенного металлом силицида производится методом реактивного ионного распыления или методом одновременного распыления из двух мишеней, поскольку все другие методы неприемлемы из-за трудности управления стехиометрией состава осаждаемого материала. В полицидном процессе для осаждения силицидов и металлов наиболее пригоден метод осаждения из газовой фазы. В табл. 1.9 проведено сопоставление различных методов осаждения по трехбалльной системе [34, 35].

Хотя возможно непосредственное осаждение пленок силицидов, обладающих сравнительно небольшим сопротивлением, на практике чаще всего используют двухэтапный процесс: осаждение составных элементов и их последующий отжиг с образованием силицидов (отжига не требует лишь процесс осаждения из газовой фазы). Хотя отжиг в принципе совместим с МОП-процессом, он нежелателен, поскольку предъявляет высокие требования к степени очистки применяемых при отжиге

газов, составу газовой атмосферы в процессе отжига и усложняет термическое оборудование. Температуру и продолжительность отжига силицидов выбирают в зависимости от материала; в значительной степени они зависят от требуемого удельного сопротивления пленки. С учетом общей тенденции перехода к низкотемпературным процессам предпочтителен быстрый термический отжиг, который проводится хотя и при достаточно высокой температуре, но в очень короткий промежуток времени (несколько секунд), в течение которого не успевает происходить перераспределение примесей в диффузионных областях.

Несмотря на то что силициды тугоплавких металлов для затворов и межсоединений СБИС становятся все более популярными (в особенности силицид титана), тем не менее надо иметь в виду, что удельное сопротивление  $TiSi_2$  примерно в 5—6 раз выше, чем  $Al$ , что резко увеличивает и без того большое время задержки на токоведущих дорожках (см. рис. 1.2).

С ростом степени интеграции роль межсоединений на кристалле возрастает, они занимают все большую площадь кристалла и по существу определяют все основные параметры СБИС быстрого действия, площадь кристалла, энергию переключения, помехоустойчивость, надежность и др. Если с уменьшением размеров быстрого действия логических элементов возрастает, то быстродействие межсоединений уменьшается из-за уменьшения поперечного сечения и соответствующего увеличения погонного сопротивления пропорционально квадрату коэффициента масштабирования. В результате этого, начиная с некоторого уровня интеграции, задержки в межсоединениях могут превосходить задержки сигналов в самих логических элементах.

В [36] представлена модель интегральной схемы со степенью интеграции  $N$  и числом входов-выходов кристалла  $N_k$  в виде функционального поля, глубина которого определяется средним числом каскадов логической цепи  $H$ , а ширина — числом входных-выходных контактов  $N_k$ . Из модели следует, что степень интеграции (т. е. число логических элементов в ИС на кристалле) может быть определена как «площадь» функционального поля:

$$N = (1/\alpha) N_k H,$$

где  $\alpha$  — среднее число входов-выходов логического элемента (для простейшего вентиля  $\alpha = 3$ ).

Приведенное в [36] соотношение может быть переписано в виде известного эмпирического закона Рента

$$N_k = \alpha N^p,$$

где  $P$  — показатель Рента.

При относительно невысоких значениях степени интеграции, когда влиянием межсоединений можно пренебречь, функцио-

нальное быстродействие ИС тем выше, чем больше значение показателя Рента. Однако при больших значениях степени интеграции, когда быстродействие логических цепей определяется межсоединениями, функциональное быстродействие ИС снижается с ростом показателя Рента.

Следует отметить, что предельное быстродействие кремниевых и арсенид-галлиевых транзисторов достигается при охлаждении их до температуры жидкого азота. При этом уменьшается тепловое рассеяние носителей, что приводит к увеличению подвижности электронов и, как следствие, к увеличению быстродействия приборов. Ожидают, что надежность приборов при пониженных температурах должна возрасти на несколько порядков, поскольку почти все механизмы деградации (особенно при толщине слоев около 10 нм), такие, как взаимная диффузия, коррозия и электромиграция, включают термически активный компонент и имеют экспоненциальную зависимость от температуры. Однако прогнозируемое повышение надежности приборов на практике подвергается сомнению из-за возможности появления сильных механических повреждений от напряжений, возникающих вследствие различия коэффициентов теплового расширения материалов при их охлаждении до азотных температур. Тем не менее возможность уменьшения сопротивления материалов внутрисхемных и межсхемных соединений представляет существенный интерес для повышения быстродействия СБИС. Характерно, что при температуре жидкого азота диэлектрические потери уменьшаются, в то время как теплопроводность ряда материалов сильно возрастает (рис. 1.6,а), что существенно облегчает отвод тепла, выделяющегося при работе СБИС. Сопротивление алюминиевых проводников на постоянном токе при температуре жидкого азота уменьшается примерно в 5—10 раз [37]. Дальнейшее снижение сопротивления межсоединений возможно при использовании высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

При разводке из ВТСП связь между схемой управления и регистром получается безрезистивной. Полосковая линия связи в этом случае обладает полосой пропускания до 100 ГГц, что обеспечивает прохождение импульсов с фронтом 3,2 пс. Несмотря на то что в линии длиной 1 см задержка составляет 50 пс, это не является ограничивающим фактором для частоты сдвига информации в регистре. ВТСП дают заметное увеличение в быстродействии в том случае, если сами транзисторы обладают высокими скоростными характеристиками, что, в первую очередь, достигается субмикронными размерами затвора и малым контактным сопротивлением. При соответствующих параметрах транзистора разводка из ВТСП может обеспечить работу цифровых устройств (на кристалле размером 1×1 см) с тактовой частотой 10 ГГц. Разводка из Al, охлаждаемая до 77 К, при

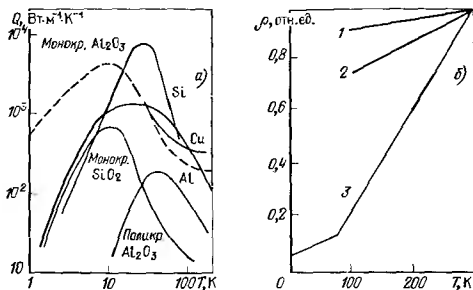


Рис. 1.6. Теплопроводность материалов при криогенных температурах (а) и зависимость сопротивления для материалов межсоединений от температуры (б):

1 — поликремний; 2 — легированный поликремний  $n$ -типа; 3 — алюминий

длине более 2 см и частотах более 0,1 ГГц обладает большим затуханием, в силу чего ее нельзя использовать для частот более 1—10 ГГц. В то же время линия из ВТСП имеет полосу пропускания до 100 ГГц, если ее длина несколько десятков сантиметров, и даже в том случае, если длина увеличивается до нескольких метров, то полоса пропускания уменьшается всего лишь в 2—3 раза. Таким образом, если вычислительная система находится в объеме нескольких кубических метров, то с помощью ВТСП-связи можно обеспечить обмен информацией между различными модулями с частотой до 10 ГГц, что недостижимо с помощью разводки из Al, охлажденной до 77 К. Весьма привлекательной является система с общей шиной, которая при использовании ВТСП превращается в сверхпроводящую систему при простой организации и простом программном обеспечении [38].

В настоящее время наиболее освоена техника синтеза ВТСП на основе  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , где в качестве  $R$  опробованы Y, La, Nd, Eu, Cd, Ho, Er, Lu, Yb, Dy, Tm. Для получения пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  оправдано распыление в диодных, триодных и магнетронных РС. Было установлено, что при осаждении пленок ВТСП с помощью планарной ВЧ МРС определяющее влияние оказывает расстояние между мишенью и подложкой. Когда это расстояние составляет 35 мм, а осаждение проводится на подложки из MgO в смеси 80% Ar+20%  $\text{O}_2$ , то при ВЧ-мощности 175 Вт при температуре подложки  $650^\circ\text{C}$  скорость роста пленки достигает 7 нм/мин. Температура перехода в сверхпро-

водящее состояние  $T_0$  для пленок  $\text{EgV}_2\text{Si}_3\text{O}_{7-x}$  лежит в диапазоне 86—92 К.

Сравнительно недавно (в январе 1988 г.) появилось сообщение о создании нового вида ВТСП на основе  $\text{Bi-Sr-Ca-Si-O}$ , который не содержит таких экзотических элементов, как редкоземельные металлы. Низкая стоимость и высокая технологичность висмутосодержащих ВТСП создают предпосылки для их широкого использования в качестве межсоединений ИС с  $T_0=105$  К. Максимально достигнутая плотность тока для ВТСП-пленок при 77 К составляет  $3,5 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

#### 1.4. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СБИС

Диэлектрический материал для разделения различных уровней металлизации должен иметь высокую электрическую прочность, низкие диэлектрические потери, малую плотность пор, гладкую поверхность, низкую плотность дефектов, высокую механическую прочность и эластичность, а также низкие механические напряжения. Пленка диэлектрика должна служить барьером для переноса примесей и обладать низкой диэлектрической проницаемостью, чтобы обеспечить минимальные эффекты, связанные с паразитной емкостью металлизированных дорожек.

При разработке сложных конструкций ИС используется двухуровневая металлизация на основе Al. Однако поскольку Al не тугоплавкий металл и химически высокоактивен, это предъявляет специфические требования к межуровневому диэлектрику. С одной стороны, температура осаждения диэлектрического слоя не должна превышать 400 К, а с другой, диэлектрик должен оставаться стабильным при 450 К. Он не должен быть гигроскопичным и должен обладать достаточной механической прочностью в непосредственном контакте с Al. Кроме того, диэлектрик должен обеспечивать возможность получения плоского (неступенчатого) профиля поверхности.

Наиболее подходящие материалы для межслойных диэлектриков — это пленки различных легированных оксидов, изготовленные методом низкотемпературного химического осаждения из газовой фазы (в случае  $\text{SiO}_2$ ) или осаждения, интенсифицированного плазмой (в случае  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Сравнение свойств этих материалов, а также фосфор- и борофосфоросиликатных стекол по различным параметрам проведено в табл. 1.10 и 1.11 [34].

К преимуществам пленок, полученных в плазме, относятся существенно меньшая плотность дефектов и конформное покрытие ступенек. Кроме того, эти пленки обладают повышенной стойкостью к растрескиванию благодаря тому, что напряжения в них носят сжимающий характер, в отличие от растягивающих

Таблица 1.10. Свойства оксида и нитрида кремния, полученных различными методами

Показатель	SiO <sub>2</sub> (осаждение из паровой фазы)	SiO <sub>2</sub> (осаждение в плазме)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (осаждение в плазме)
Плотность проколов, см <sup>-2</sup>	1—10	1	0,05
Плотность «вкрапления» частиц, см <sup>-2</sup>	10—100	0,2	0,2
Перекрытие ступенек	Плохое	Отличное	Отличное
Адгезия к Al	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Стойкость к растрескиванию	Плохая	Хорошая	Хорошая
Тип внутренних напряжений в пленке	Растягивающие	Сжимающие	Сжимающие
Пробивное напряжение, В/см	8·10 <sup>8</sup>	8·10 <sup>8</sup>	2·10 <sup>8</sup>
Удельное сопротивление, Ом·см	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>	2·10 <sup>16</sup>
Диэлектрическая постоянная	3,8	4,5	7,5

Таблица 1.11. Сравнение используемых и перспективных диэлектриков для создания межсоединений на кристалле

Показатель	Фосфоросиликатное стекло		Борофосфоросиликатное стекло (нанесенное при атмосферном давлении)	SiO <sub>2</sub> (осаждение в плазме)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (осаждение в плазме)
	нанесенное при атмосферном давлении	нанесенное при низком давлении			
Перекрытие ступенек	Уд.*	Уд.*	Уд.*	Хор.	Хор.
Плотность дефектов	Пл.	Уд.*	Уд.*	Хор.	Хор.
Внутренние напряжения и устойчивость к растрескиванию	Уд.	Уд.	Хор.	Хор.	Хор.
Оплавление	Уд.	Уд.	Хор.	Пл.	Пл.
Коррозионное воздействие на Al	Пл.	Пл.	Уд.	Хор.	Хор.
Гладкость поверхности	Пл.	Уд.*	Пл.	Хор.	Хор.
Диэлектрическая проницаемость	Хор.	Хор.	Хор.	Хор.	Уд.
Адгезия к Al и Si	Хор.	Хор.	Хор.	Хор.	Хор.

\* Хорошие показатели после оплавления.

напряжений в пленках, полученных осаждением из паровой фазы.

Борофосфоросиликатное стекло имеет ряд преимуществ перед другими диэлектриками прежде всего в части малых внутренних напряжений и высокой коррозионной стойкости. Пленки, полученные в плазме, по сравнению с любыми пленками, полученными в паровой фазе, имеют более гладкую поверхность и

высокую степень покрытия ступенек. Плотность дефектов у этих пленок очень мала, а сжимающие напряжения повышают стойкость к растрескиванию.

#### 1.5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

В качестве маскирующих слоев для фотошаблонов чаще всего используют пленки Сг. Основное требование к пленкам Сг при изготовлении фотошаблонов — отсутствие сквозных пор при сравнительно малых толщинах (50 нм), хорошая адгезия к подложке и стабильная скорость травления.

Пленки Сг на стеклянные подложки осаждают преимущественно термовакuumным методом с помощью резистивного нагрева. Для снижения дефектности пленок и устранения пор в ряде случаев последовательно осаждают два или три слоя. Травление таких довольно «толстых» пленок [толщиной 0,15—0,25 мкм] происходит послойно и неравномерно, что служит причиной образования клина травления и отклонения геометрических размеров от номинала. Поэтому для повышения разрешающей способности фотошаблонов желательно иметь однослойную пленку Сг толщиной  $< 0,1$  мкм с минимальным числом проколов.

Увеличить силу адгезии пленки к подложке можно в результате улучшения химической очистки поверхности подложки и нагрева ее в процессе осаждения пленки. Однако при осаждении пленки на нагретую подложку увеличиваются растягивающие напряжения в пленке, вызывающие появление микротрещин. Поэтому наряду с термовакuumным методом испарения «чешуйчатого» Сг из лодочек с предварительным нагревом стеклянных подложек в последние годы начинает использоваться метод ионно-плазменного распыления хромовой мишени в контролируемой среде аргона при давлении порядка  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Сопоставление свойств пленок Сг, полученных обоими методами, приведено в табл. 1.12 [39].

Пленки, полученные обоими методами, имеют сходную структуру, однако в пленках, осажденных термовакuumным методом, обнаруживаются микротрещины размером от 5 до 15 нм, в то время как в пленках, осажденных ионно-плазменным методом, они не наблюдаются, что связано, по-видимому, с меньшими внутренними напряжениями и лучшей адгезией их к подложкам. В то же время количество фаз оксидов и в особенности силицидов Сг гораздо больше в пленках, осажденных ионно-плазменным методом. Малый размер областей когерентного рассеяния и наличие сложного переходного слоя у пленок Сг, осажденных ионно-плазменным методом, определяют малую скорость и неравномерность травления в жидких травителях,

Таблица 1.12. Свойства пленок хро

Метод нанесения	Толщина пленки, нм	Адгезия, Н/мм <sup>2</sup>		Оптическая плотность при 0,407 мкм. опти. ед.	Удельное электросопротивление, мкОм·см
		начальная	конечная		
Ионно-плазменный	60	1030	1460	2,08	150
Термо-вакуумный	60	830	1300	1,9	200

в то время как скорость и равномерность ионно-химического травления для пленок, полученных обоими методами, малы.

У пленок, полученных по ионно-плазменной технологии, переходный слой хром—стекло содержит большое количество соединений Cr с кремнием и некоторыми другими компонентами стекла (O<sub>2</sub>, B, Mg и др.). Большое количество и форма фазовых включений определяют высокую адгезию этих пленок к подложке. Кроме того, внутреннее напряжение сжатия в этих пленках мало, что также увеличивает силу сцепления пленки с подложкой. Мелкозернистость пленок и, как следствие, более высокая оптическая плотность позволяют применять более тонкие слои хрома, что повышает разрешающую способность фотошаблонов, необходимую для получения элементов с микронными и субмикронными размерами. Дефектность этих пленок примерно в 1,5—2 раза ниже дефектности пленок, полученных термовакuumным методом.

#### 1.6. ТЕРМОВАКУУМНЫЙ МЕТОД ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК

До сравнительно недавнего времени термовакuumный метод (испарение и конденсация веществ в высоком вакууме) был наиболее распространенным способом получения тонких пленок, используемых в производстве ИС.

Широкому распространению термовакuumного метода способствовали:

низкая стоимость и простота реализации процесса;  
универсальность, позволяющая в одной и той же установке получать пленки самых различных материалов;

стерильность процесса, позволяющая при наличии высокого (и при необходимости сверхвысокого) вакуума получать пленки, практически свободные от загрязнений;

возможность не только осаждать пленки на подложку, но и одновременно получать требуемую конфигурацию при использовании механических «свободных» масок;



ма, полученных различными методами

Внутреннее напряжение		Травление		
Вид	Значение, Н/м <sup>2</sup>	Время, с		Характер травления
		Раствор HCl+H <sub>2</sub> O	Цериевый травитель	
Сжимающее	0,5·10 <sup>8</sup>	40—60	250—280	Равномерное, незначительные остатки Равномерное, остатков нет
Растягивающее	1,6·10 <sup>8</sup>	15—30	120—150	

высокая скорость испарения веществ и возможность регулирования ее в широких пределах путем изменения подводимой к испарителю мощности;

возможность вести процесс в высоком вакууме и в окислительной или восстановительной среде разреженного газа;

высокая производительность при групповой загрузке и обработке подложек.

Первоначально для реализации термовакuumного метода использовали главным образом испарители поверхностного типа с резистивным нагревом в виде лент, лодочек, спиралей, а также испарители тигельного типа с косвенным нагревом. Разновидностью термовакuumного метода является испарение «вспышкой». Оно осуществляется с помощью поверхностных испарителей дискретного действия для испарения проволоки из бухт или мелкодисперсных частиц из специальных дозаторов. Эти испарители могут иметь сами различные конструкции, однако во всех случаях обеспечиваются такие условия, при которых проволока или мелкодисперсные частицы подаются на поверхность раскаленной ленты или лодочки со скоростью, равной скорости испарения частиц этого вещества. При соблюдении этих условий в пространстве над испарителем одновременно присутствуют в парообразной фазе все компоненты сложного вещества в таком же соотношении, в каком они содержатся в твердой фазе, в результате чего на поверхности подложки могут быть получены пленки требуемого стехиометрического состава. При испарении проволоки из Al и его сплавов с Si и Cu сохраняются малый размер зерна и гладкая поверхность осаждаемой пленки, что обеспечивает хорошую воспроизводимость последующих процессов фотолитографии и травления.

К достоинствам этого метода относятся низкая стоимость оборудования, сравнительно высокая степень использования испаряемого материала, отсутствие радиационных дефектов в создаваемой структуре, низкий уровень загрязнений, возможность осаждения пленок сплавов с различными точками плавления

компонентов, а к недостаткам — возможность разбрызгивания испаряемого материала на подложки, высокие требования к качеству материала проволоки (отсутствие раковин, газовых включений и др.).

Начиная с 70-х годов широкое распространение получили электронно-лучевые испарители (ЭЛИ), в которых нагрев испаряемого вещества происходит за счет кинетической энергии электронов, бомбардирующих поверхность испарения. Практически точечная фокусировка электронного пучка позволяет получать большую удельную мощность (до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) и очень высокую температуру, что обеспечивает возможность испарения любых, даже самых тугоплавких материалов с достаточно высокой скоростью. При бестигельном и автоигельном испарении ЭЛИ позволяют получать высокую чистоту осаждаемой пленки. Быстрое перемещение нагретой зоны при отклонении потока электронов и вместе с тем легкость регулирования и контроля мощности нагрева и скорости испарения также относятся к достоинствам ЭЛИ. Однако малый срок службы испарителей, значительное изменение их молекулярно-кинетических характеристик по мере испарения осаждаемого материала и трудность его непрерывной или дозированной подачи, необходимость использования сложных внутрикамерных устройств с планарным вращением подложкодержателей для выравнивания равномерности пленки по толщине не позволяют использовать ЭЛИ в установках и линиях непрерывного действия.

### 1.7. ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК

Стремление перейти к полностью автоматизированным непрерывным технологическим процессам существенно повысило за последние годы интерес к получению пленок путем распыления материалов ионной бомбардировкой. Распыление является низкотемпературным процессом и может применяться для получения пленок металлов (включая тугоплавкие), сплавов (в том числе многокомпонентного состава), полупроводников и полупроводниковых соединений, а при использовании ВЧ-напряжения или же реактивной среды — для получения диэлектрических пленок, т. е., по сути дела, почти всех применяемых в микроэлектронике материалов. Условия получения чистых пленок для всех видов распылительных систем (РС) идентичны — это сочетание сравнительно высоких скоростей осаждения с низким давлением реактивных газов в области конденсации пленки, что чаще всего достигается непрерывной «промывкой» рабочего объема РС потоком чистого инертного газа. Для очистки пленки от газовых включений в ряде случаев в процессе осаждения ее подвергают бомбардировке высокоэнергетиче-

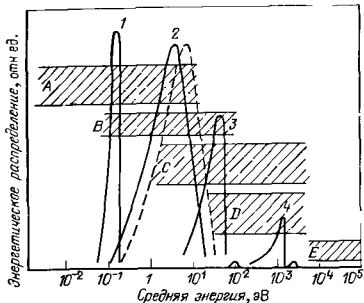


Рис. 1.7. Характер распределения ионов и нейтральных частиц по энергиям при различных вакуумно-плазменных процессах:

1 — энергия частиц при гермическом испарении; 2 — энергия распыленных частиц у мишени (сплошная линия) и у подложки (пунктирная линия); 3 — энергия ионов и нейтральных частиц при распылении со смещением и при проведении ионного покрытия (4); А — область термической активации, повышающей миграцию конденсирующихся атомов; В — область десорбции атомов загрязняющих примесей; С — область образования активационных центров (зарядовые дефекты, структурные дефекты, дефекты материала); D — область распыления атомов загрязняющих примесей и обратного распыления; E — область имплантации примесей

скими частицами подачей на подложкодержатель отрицательного смещения от 30 до 200 В [3].

Существующие РС можно разделить на две основные группы: 1) ионно-плазменные, когда мишень находится в газоразрядной плазме, создаваемой с помощью тлеющего, дугового или ВЧ-разрядов, а распыление происходит за счет бомбардировки мишени ионами, извлекаемыми из плазмы; 2) с автономными ионными источниками без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков.

В зависимости от процесса существенно меняется энергия ионов и нейтральных частиц (рис. 1.7) [40].

Распылительные системы на постоянном токе (РС ПТ) диодного, тродного [3] и магнетронного [19—23] типов применяются, главным образом, для распыления металлов и сплавов, в отличие от ВЧ-систем, используемых в основном для распыления диэлектрических мишеней [16].

До сравнительно недавнего времени наибольшее распространение имели диодные ПТ- и ВЧ-системы. Ограничения в применении процесса распыления для промышленных целей были обусловлены, главным образом, низкими скоростями осаждения ( $0,2-2 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$ ), высоким рабочим давлением (1—10 Па) и большим напряжением (2—5 кВ), подаваемым на разрядное устройство, что снижало производительность процесса и препятст-

Таблица 1.13. Составление основных параметров диодных и магнетронных РС

Параметр	Диодная РС ПТ	Магнетронная РС ПТ
Степень ионизации рабочего газа	Очень низкая (0,1 %)	Очень высокая
Степень использования электронов для ионизации рабочего газа	~1 %	Практически все находящиеся у мишени электроны участвуют в ионизации рабочего газа
Напряжение на мишени при постоянных давлении и мощности	Низкая степень ионизации вызывает низкую плотность тока и требует высокого напряжения для горения разряда (2—5 кВ)	Высокая степень ионизации и высокая плотность тока позволяет работать при более низком напряжении (0,3—0,8 кВ)
Давление рабочего газа	Низкая степень ионизации требует высокого давления для горения разряда (1,3—13 Па)	Высокая степень ионизации позволяет работать при низком давлении (0,5 Па)
Мощность	Ограничена искрением при напряжении 5 кВ	Ограничена эффективностью охлаждения мишени
Экранирование	Экран необходим для устранения распыления обратной стороны мишени	Локализация разряда у мишени не требует экрана
Скорость осаждения	Ограничена плотностью мощности	Практически не ограничена для металлов
Площадь мишени	Ограничена	Неограничена

вовало получению пленок с минимальным уровнем загрязнений и радиационных дефектов. Положение коренным образом изменилось после появления магнетронных распылительных систем (МРС) — диодных систем, в которых взаимодействие электрического и магнитного полей в сочетании с формой распыляемой поверхности мишени создает такую конфигурацию магнитных ловушек для электронов, при которой токи дрейфа электронов замыкаются на себя [19—23]. В результате в МРС совпадают три максимума: функции распределения электронов по энергиям, числа актов ионизации, которые создает один электрон на единице пути своего направленного движения, и числа электронов, выбиваемых одним ионом из мишени. Это обеспечивает высокую степень ионизации газа в МРС и, как следствие, целый ряд преимуществ МРС по сравнению с диодными РС на постоянном токе (табл. 1.13).

МРС допускает широкое разнообразие формы распыляемой поверхности мишени и пространственного расположения и перемещение подложек в процессе осаждения пленок. Эмиссионная характеристика МРС очень медленно меняется во времени

в результате постепенной эрозии материала мишени в зоне интенсивного распыления. МРС по существу является источником с большим запасом распыляемого материала, что позволяет строить на основе МРС установки непрерывного действия, производя ионную очистку, травление и осаждение материала в едином вакуумном цикле, необходимом для построения гибкого автоматизированного производства СБИС и УБИС.

#### 1.8. ВОЗБУЖДАЕМОЕ ПЛАЗМОЙ И ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ ПАРОВОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

В последние годы для получения пленок поликремния (в том числе легированного фосфором, бором и кислородом), нитрида и оксида кремния, фосфоросиликатных стекол, металлов и их силицидов все шире начинают применять осаждение из паровой и газовой фаз в реакторах пониженного давления (РПД). Пленки в РПД можно осаждать без плазменной стимуляции процесса, однако при этом необходим высокотемпературный нагрев пластин (так, кремний в РПД осаждают при 1100—1200 °С). Столь высокая температура пластин, необходимая для реализации пиролитических реакций, не позволяет проводить осаждение пленок на ранее осажденные слои или пленочные структуры, если последние могут расплавиться, испариться, вступить в химическую реакцию или диффундировать в осаждаемую пленку. Например, не представляется возможным осаждать пленку  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на Al. Значительное перераспределение легирующей примеси вблизи границы раздела пленки с подложкой под воздействием высокой температуры ограничивает минимальную толщину и электропроводность слаболегированных пленок в том случае, когда последние осаждаются на подложки в сильнолегированной приповерхностной области.

Активация процесса осаждения с помощью НПП снимает температурные ограничения, что по существу позволяет осаждать пленки на любые ранее созданные структуры и устраняет возникновение внутренних напряжений в пленках при последующем охлаждении пластин [11].

Широкое использование плазменной стимуляции процессов осаждения в РПД сдерживается двумя причинами. Во-первых, бомбардировка растущей пленки частицами высоких энергий создает радиационные нарушения, для устранения которых необходим высокотемпературный отжиг, что, по существу, сводит к нулю преимущества низкотемпературного процесса. Во-вторых, в НПП образуется множество нейтральных и ионизованных фрагментов молекул, что сильно ограничивает выбор исходных материалов для осаждения пленок. Так, удобные во многих отношениях комплексные металлоорганические соеди-

нения разлагаются в плазме, образуя разнообразные мономеры, в результате чего осаждаются нежелательные полимеры. Кроме того, возбуждение и стабильное горение газового разряда требует строгого контроля давления и состава газовой среды. Поэтому в последнее время стремятся использовать НГП только для диссоциации молекул исходного продукта, не допуская в то же время бомбардировки растущей пленки частицами высоких энергий. Для этого могут служить СВЧ-плазменные системы ( $f=2,45$  ГГц) с отдельными областями возбуждения НГП и последующей диссоциацией исходных продуктов в рабочей камере реактора [11] либо СВЧ-системы с электронно-циклотронным резонансом [27].

Большие потенциальные возможности имеет стимуляция процессов осаждения пленок с помощью лазеров с перестраиваемой длиной волны, что может обеспечить разрыв строго определенных химических связей, необходимых для получения пленок того или иного материала [28]. При лазерном фотолизе можно независимо изменять мощность лазера, длину волны излучения и положение пластины в пространстве. Поскольку фотолиз протекает вдоль пути распространения лазерного луча, получаемые при этом пленки содержат меньшее число примесей, чем при плазменной стимуляции, когда пластины могут загрязняться примесями, образующимися в результате бомбардировки стенок реактора высокоэнергетическими ионами. С помощью фотолиза могут быть получены пленки металлов, а также  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др. Скорость осаждения пленок при фотолизе определяется мощностью лазерного импульса, давлением в камере и площадью, на которую осаждается пленка, и обычно лежит в диапазоне от 20 до 300 нм/мин. Изоляционные пленки, полученные методом фотолиза, характеризуются малой плотностью дефектов и высоким пробивным напряжением. Пленки пригодны в качестве межслойных диэлектриков, для изготовления масок в процессе диффузии и пассивирующих слоев в производстве СБИС.

Возбуждаемое плазмой и лазерным излучением осаждение пленок из паровой и газовой фаз при пониженном давлении находится в стадии интенсивного развития и не исключено, что в ближайшие годы оно станет одним из основных методов получения тонкопленочных структур в производстве СБИС и УБИС.

## Глава 2

# ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

### 2.1. РАСПЫЛЕНИЕ МИШЕНИ

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования ионного распыления (ИР) показывают, что основным механизмом взаимодействия между бомбардирующими ионами и атомами материала является процесс передачи импульса, т. е. распыление осуществляется за счет упругих столкновений, приводящих к прямому выбиванию атомов из равновесных положений [41, 44]. Можно выделить три качественно различных случая: режим первичного выбивания атомов из равновесных положений, режим линейных каскадов и режим тепловых пиков. В режиме первичного выбивания бомбардирующий ион передает энергию атомам мишени, которые могут либо сразу покинуть поверхность (распылиться), либо распылиться после небольшого числа упругих столкновений с приповерхностными атомами, необходимого для поворота вектора импульса. В двух других режимах выбиваемые из равновесных состояний атомы получают энергию, достаточную для выбивания вторичных, третичных и других атомов, часть которых может достичь поверхности материала и преодолеть поверхностный барьер.

Ионное распыление материала начинается, когда энергия ионов  $E_i$  превысит некоторую величину  $E_{пор}$ , получившую название пороговой энергии распыления. Из табл. 2.1, в которой приведены значения пороговых энергий распыления некоторых материалов ионами Ne, Ag, Kf и Xe, видно, что  $E_{пор}$  слабо зависит от массы сталкивающихся частиц и лежит в диапазоне 10–30 эВ. При  $E_i < E_{пор}$  ионы не распыляют материал, и при взаимодействии с атомарно-чистой поверхностью происходят их отражение, адсорбция с последующей десорбцией и нейтрализация, осуществляемая электронами, эмиттированными из материала под действием электрического поля ионов. Если на поверхности материала присутствуют адсорбированные инородные частицы и химические соединения, то в результате ионной бомбардировки происходят их десорбция и химические превращения (например, полимеризация).

Процесс выхода в вакуум адсорбированных атомов отличается от выхода распыленных атомов из объема материала тем, что вылетающая частица всегда выходит из верхнего поверхностного слоя, ее энергия связи обычно меньше энергии связи атомов в объеме. Если массы атомов адсорбирующего вещества и адсорбента сильно различаются, то возможны большие различия в выходе (распылении) адсорбированных частиц. Де-

Таблица 2.1. Значения пороговых энергий распыления

Материал	Атомный номер $Z_a$	Молярная масса $A$ , г/моль	Число атомов в единице объема $N_s$ с $6 \cdot 10^{23}$ ат/см <sup>3</sup>	$E_{свб}^*$ $1,6 \cdot 10^{-10}$ Дж	$E_{св}^*$ $1,6 \cdot 10^{-10}$ Дж	
					Расчет	Эксперимент
Be	4	9,0	12,3	3,48	13,92	—
B	5	10,8	13,7	5	20	—
C	6	12,8	11,3	7,41	29,64	—
Mg	12	24,3	4,31	1,59	6,4	—
Al	13	27,0	6,04	3,26	13,0	—
Si	14	28,0	5,04	3,91	15,64	20,9
P	15	31,0	4,55	1,37	5,48	—
Ti	22	47,9	5,66	4,34	17,36	—
V	23	51,0	6,63	3,7	14,8	—
Cr	24	52,0	7,64	3,68	14,72	—
Mn	25	54,9	8,01	3,15	12,6	—
Fe	26	55,9	8,48	4,15	16,6	17
Ni	28	58,7	9,03	4,41	17,64	—
Cu	29	63,5	8,52	3,56	14,24	25
Ge	32	72,6	4,53	3,77	15,08	22,3
As	33	74,9	4,61	1,32	5,28	9,4
Nb	41	92,9	5,45	7,5	30	—
Mo	42	96,0	6,39	6,9	27,6	—
Ag	47	107,8	5,85	2,7	10,8	21
Ta	73	181,0	5,52	8,7	34,8	—
W	74	183,9	6,09	8,76	35	—
Pt	78	195,0	6,61	5,56	22,24	—
Au	79	197,0	5,90	3,92	15,68	—

сорбция при ионной бомбардировке может осуществляться прямым выбиванием адсорбированного атома падающим ионом, за счет его выбивания отраженным от поверхности материала ионом, а также выбиванием распыленным атомом материала.

При ионной бомбардировке поверхностные слои монокристаллов превращаются вначале в поликристаллические, а затем в аморфные. Доза ионного облучения  $D_n$ , Кл/см<sup>2</sup>, определяется выражениями

$$D_n = j_n t \quad (2.1)$$

нли, ион/см<sup>2</sup>,

$$D_n = j_n t / (ze), \quad (2.2)$$

где  $j_n$  — плотность ионного тока на поверхность материала, А/см<sup>2</sup>;  $t$  — продолжительность облучения, с;  $e$  — заряд электрона, Кл;  $z$  — кратность заряда иона. Доза аморфизации монокристаллического кремния  $D_n$  ионами аргона с энергией 30 кэВ при температуре мишени 300 К составляет  $5 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> [1], следовательно, при  $j_n = 0,1$  мА/см<sup>2</sup> аморфизация наступает примерно через 1 с после начала обработки. Значения  $D_n$  полупро-



различных материалов ионами инертных газов

$4\pi n_A$	$(n_A + n_B)^2$ для ионов Ar	$E_n < 1,6 \cdot 10^{-16}$ Дж			
		Расчет	Эксперимент		
		Ne <sup>+</sup>	Ar <sup>+</sup>	Kr <sup>+</sup>	Xe <sup>+</sup>
0,598	23	12	15	15	14
0,670	29	—	—	—	—
0,710	42	—	10	—	—
0,940	6,8	—	—	—	—
0,962	13,5	13	13	15	18
0,959	16,1	—	15	—	—
0,984	5,6	—	—	—	—
0,992	17,5	22	20	17	18
0,985	14	21	23	25	28
0,983	15	22	22	18	20
0,975	13	—	—	—	—
0,972	17,1	22	14—20	25	23
0,964	18,3	20—23	7—21	25	20
0,948	15	17	12—17	16	15
0,916	16,5	23	25	22	18
0,908	5,8	—	—	—	—
0,842	35,6	27	25	26	32
0,830	33,2	24	24	28	27
0,79	13,7	12	15	15	17
0,593	58,7	25	26	30	30
0,588	59,5	35	33	30	30
0,565	39	27	25	22	22
0,561	28	20	20	20	18

водников сильно зависят от температуры, резко увеличиваясь с ее ростом, очевидно, за счет отжига радиационных повреждений. В металлах подобного рода отжиг происходит уже при комнатной температуре.

Среднее расстояние, проходимое внедренным в материал ионом до его остаивки, зависит от энергии и атомного номера иона, а также атомного номера и кристаллической структуры материала. В большинстве случаев важно знать не средний пробег ионов в материале, а среднюю глубину их проникновения от поверхности. Средняя глубина проникновения ионов аргона в диапазоне энергий (0,5—5,0) кэВ составляет для кремния 3,5, для двуокиси кремния 5,0, для золота 1,3, для алюминия 1,5 нм/кэВ [1]. Толщина нарушенного слоя приблизительно равна удвоенной средней глубине проникновения ионов в материал и возрастает с увеличением дозы ионного облучения. Основная доля энергии ионов (70—90%) выделяется в материале в виде тепла, менее 5% расходуется на расплынение, а оставшаяся часть затрачивается на радиационное повреждение материала, внедрение ионов, вторичную электронную эмиссию и электромагнитное излучение в широком спектре частот.

Для поликристаллических материалов угловое распределение распыленных атомов при нормальном падении бомбардирующих ионов с энергией в диапазоне 1—10 кэВ в первом приближении описывается законом косинуса. При  $E_{и} < 1$  кэВ наблюдается «подкосинусное» распределение распыленных атомов, когда большее число частиц распыляется параллельно поверхности мишени и меньшее — перпендикулярно. При  $E_{и} > 10$  кэВ имеет место «надкосинусное» и даже гауссово распределение распыленных частиц. Аналитические выражения для описания различных видов углового распределения распыленных частиц приведены в [15].

При наклонном падении ионов средняя энергия распыленных атомов  $E_p$  возрастает; с уменьшением массы бомбардирующих ионов  $E_p$  уменьшается. Распыленные атомы тяжелых материалов обладают наибольшим значением  $E_p$ , а легкие — наибольшим значением скорости распыления  $v_p$ .

Процесс распыления материалов количественно характеризуется коэффициентом распыления (КР), который определяется как среднее число атомов, выбиваемых с поверхности материала одной падающей частицей. Падающими частицами могут быть ионы (атомарные и молекулярные), нейтральные атомы, нейтроны, электроны и фотоны с большой энергией. В настоящей главе рассматривается процесс физического распыления материалов ионной бомбардировкой, поэтому, согласно определению КР, ат./ион:

$$Y_p = N_a / N_{и}, \quad (2.3)$$

где  $N_a$  — число выбитых (распыленных) атомов материала;  $N_{и}$  — число ионов, бомбардирующих материал. При бомбардировке ионизированными молекулами, состоящими из одинаковых атомов, каждый такой атом учитывают отдельно. В случае же молекул, содержащих разные атомы, целесообразно определять КР в расчете на одну первичную молекулу. В режиме линейных каскадов КР материала при бомбардировке ионами двухатомных молекул (состоящих из одинаковых атомов) приблизительно вдвое больше, чем при бомбардировке атомарными ионами. В режиме же тепловых пиков КР двухатомными молекулами может превышать удвоенный КР для атомарных ионов.

Согласно теории физического распыления аморфных и поликристаллических материалов, развитой П. Зигмундом [41] при ионной бомбардировке по нормали к поверхности в области энергий  $E_{суб} \ll E_{и} < E_{и}^*$ , где  $E_{суб}$  — энергия сублимации атома материала мишени, а

$$E_{и}^* = \frac{515a^2 Z_{и} Z_a (m_{и} + m_a)}{m_a}, \quad (2.4)$$

где  $a$  — характерный радиус экранирующего электронного облака по модели Томаса — Ферми, равный  $0,8853a_0(Z_n^{2/3} + Z_a^{2/3})^{-1/2}$ ,  $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$  м — боровский радиус атома водорода;  $Z_n$ ,  $Z_a$  — соответственно атомные номера и массы бомбардирующего иона и материала мишени. КР материалов прямо пропорционально зависит от энергии, и его можно оценить по формуле

$$Y_p(E_n) = \frac{3\beta m_n m_a E_n}{\pi^2 (m_n + m_a)^2 2E_{суб}}, \quad (2.5)$$

где  $\beta$  — безразмерный параметр, зависящий от  $m_n/m_a$ ;  $E_{суб}$  — энергия сублимации атома материала мишени. В табл. 2.2 приведены рассчитанные по формуле (2.4) значения  $a$  и  $E_n$  для некоторых материалов, бомбардируемых ионами аргона.

Энергетическая эффективность процесса ионного распыления  $\eta_{эф}$  определяется массой материала  $m$ , распыляемой в единицу времени с единицы площади, отнесенной к плотности мощности  $W_n = j$  и  $U_n$  (где  $j_n$  и  $U_n$  — плотность ионного тока и ускоряющее ионы напряжение), затрачиваемой на реализацию процесса распыления. Величина  $E_n = eU_n$  определяет энергию бомбардирующих материал ионов. В случае распыления материала однозарядными ионами  $m = Y_p(E_n) A_m j_n / (N_A e)$ , где  $A_m$  — атомная масса распыляемого материала;  $N_A$  — число Авогадро. Тогда, согласно определению,

$$\eta_{эф} = \frac{V_p(E_n)}{E_n} \frac{A_m}{N_A}. \quad (2.6)$$

Из выражения (2.3) видно, что энергетическая эффективность процесса распыления зависит от энергии ионов. Значения энергии ионов, которые соответствуют максимальной энергетической эффективности процесса распыления материалов, совпадают с  $E_n^*$ , приведенными в табл. 2.2. При этом максимальная доля энергии ионов расходуется на процесс распыления материалов.

В области энергий  $E_n > E_n^*$  рост КР с энергией ионов замедляется и определяется из выражения

$$Y_p(E_n) = 4.2 \cdot 10^{18} \beta \frac{\Sigma_n(E_n)}{2E_{суб}}. \quad (2.7)$$

Величина  $\Sigma_n(E_n)$  представляет собой сечение ядерного торможения ионов и рассчитывается по формуле

$$\Sigma_n(E_n) = \frac{Z_n Z_a e^2 a m_n}{(m_n + m_a) \epsilon_0} \sigma_n(E_n^{np}), \quad (2.8)$$

где

$$E_n^{np} = \frac{4\pi\epsilon_0 m_a a E_n}{(m_n + m_a) Z_n Z_a e^2} \quad (2.9)$$

Таблица 2.2. Значение параметров

Параметр	C	Al	Si	Ti	Cr	Ni
$a \cdot 10^{-11}$ м	1,47	0,33	1,29	1,19	1,18	1,15
$E_n^*$ , $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж	310	320	330	330	330	340

Таблица 2.3. Значения  $\sigma_n$ 

$E_n^{np}$	0,002	0,004	0,01	0,02	0,04	0,1
$\sigma_n (E_n^{np})$	0,120	0,154	0,211	0,261	0,311	0,372

— приведенная энергия ионов;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\sigma_n(E_n^{np})$  — приведенное сечение ядерного торможения ионов, значения которого в зависимости от  $E_n^{np}$  приведены в табл. 2.3.

Кроме энергии ионов КР материала зависит от [1. 6]:

а) массы бомбардирующих ионов  $m_n$ , увеличиваясь с возрастанием  $m_n$  и атомарного номера иона в области энергий, используемых для ИР;

б) атомного номера распыляемого материала  $Z_a$ . Наблюдается сложная периодическая зависимость КР от  $Z_a$ , в которой в пределах периода таблицы Д. И. Менделеева КР возрастает по мере заполнения электронных  $d$ -оболочек;

в) угла падения ионов на поверхность материала  $\alpha$ , с ростом от 0 (отсчет ведется от нормали к поверхности) до  $70^\circ$  наблюдается увеличение КР материалов. Для многих материалов в первом приближении зависимость КР от  $\alpha$  в этой области можно оценить по формуле

$$Y_p(\alpha) = Y_p(0) / \cos \alpha. \quad (2.10)$$

где  $Y_p(0)$  — КР при нормальном падении ионов. Зависимость (2.10) легко объяснить из механизма физического распыления. Действительно, КР при нормальном падении ионов прямо пропорционален энергии, рассеиваемой в поверхностном слое материала, в пределах которого упругие столкновения с атомами приводят к распылению. При угле падения  $\alpha$  длина пробега ионов, а следовательно, и число столкновений в этом слое в  $1/\cos \alpha$  раз больше. Значение угла падения ионов  $\alpha_{max}$ , при котором наблюдается максимальный КР материала  $Y_{pmax}$ , зависит от энергии ионов и смещается в сторону больших углов с увеличением  $E_n$ ;

г) чистоты обработки поверхности. Шероховатые поверхности имеют меньший КР, чем гладкие. Это связано с частичным

$a$  и  $E_n^*$  для некоторых материалов

Cu	Ge	Nb	Mo	Ta	W	Pt	Au
1,14 360	1,12 350	1,06 380	1,06 390	0,93 440	0,93 450	0,92 460	0,91 450

для ионов со средней массой

0,2	0,4	1,0	2,0	4,0	10	20	40
0,403	0,405	0,356	0,291	0,214	0,128	0,081	0,049

улавливанием распыленных атомов соседними микрокеровностями. Однако по мере удаления поверхностного слоя КР для поверхностей с различной чистотой обработки выравнивается (у гладких поверхностей — понижается, у шероховатых — возрастает), приближаясь к определенной характерной для топографии поверхности, сформированной только ионной бомбардировкой;

д) температуры распыляемого материала  $T_{р.м.}$  Для поликристаллических и аморфных материалов в диапазоне температур от комнатной до 600 К, обычно используемых при ИР, значение КР не зависит от температуры. Для монокристаллических полупроводников КР не зависит от температуры до 400 К, если не происходит фазового магнитного перехода, вызывающего изменения кристаллической структуры.

Разработанная Зигмундом [41] теория ионного распыления не в состоянии объяснить экспериментально наблюдаемое резкое увеличение коэффициента распыления при температурах, значительно ниже тех, при которых происходит интенсивное испарение материала мишени. В [43] показано, что совпадение теории с данными эксперимента может быть достигнуто, если предположить, что бомбардирующие мишень ионы переводят часть атомов на ее поверхности в активированное состояние, при котором энергия их связи с атомами подложки становится значительно меньше. В активированном состоянии могут находиться атомы, получившие избыточную энергию от проникших ионов или атомов отдачи. Перевод активированных атомов в свободное состояние (испарение) связан с преодолением активационного барьера, значительно меньшего того, который существует для неактивированных атомов. Поскольку концентрация активированных атомов на поверхности прямо пропорциональна интенсивности ионного облучения, то это приводит к

зависимости элементного состава на поверхности от плотности ионного тока в пучке. Физическая природа появления активированных атомов не ограничивается получением энергии от проникающих ионов и атомов отдачи. Для двухатомных молекул может наблюдаться переход из синглетного состояния в триплетное. Помимо этого существуют многообразные процессы, связанные с образованием дефектной структуры в поверхностном слое, в которой энергия связи поверхностных атомов с атомами подложки значительно меньше той, которой обладают атомы, находящиеся в нормальном состоянии. Таким образом, при ионном облучении происходит динамическое активирование поверхности, суть которого сводится к появлению на поверхности слабосвязанных атомов.

В [44] предложен метод расчета КР, основанный на найденной автором универсальной аналитической форме поперечного сечения смещения атомов твердого тела, с помощью которого можно адекватно определять энергетические зависимости КР для любой комбинации ион — твердое тело и учитывать зависимость КР от атомного номера подвергаемого ионной бомбардировке материала. Это существенно упрощает процедуру расчетов при разработке технологических циклов ионной и ионно-плазменной обработки широкого класса материалов. В [44] детально рассмотрены закономерности процесса распыления металлов и зависимость КР от энергии, заряда, массы иона, угла его падения на поверхность, дозы ионов, а также заряда ядра, массы, энергии связи атома мишени, кристаллического строения, плоскости среза и направления ее вращения, загрязнения поверхности оксидом и пленками, степени шероховатости и порности образца, природы остаточного газа и его давления, температуры образца и некоторых других условий процесса распыления.

Для количественной характеристики процесса ИР материалов удобно пользоваться понятием скорости распыления  $v_p$ , определяемой по толщине поверхностного слоя материала, удаляемого в единицу времени. Согласно [6], скорость ИР материала при падении ионов по нормали к его поверхности может быть определена по формуле, нм/с:

$$v_p = 6,25 \cdot 10^{25} j_i Y_p A_m / (N_A \rho), \quad (2.11)$$

где  $j_i$  — плотность ионного тока, А/см<sup>2</sup>;  $Y_p$  — КР материала, ат./ион;  $A_m$  — атомная масса распыляемого материала, г/моль;  $N_A$  — число Авогадро, ат./моль;  $\rho$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>.

При наклонном падении ионов на поверхность распыляемого материала скорость ИР определяется как

$$v_p(\alpha) = 6,25 \cdot 10^{25} [Y_p(\alpha) (A_m / N_A \rho)] j_i \cos \alpha, \quad (2.12)$$

где  $Y_p(\alpha)$  — КР материала при угле падения ионов  $\alpha$ . атом/ион.

Таблица 2.4. Скорость распыления материалов в дной ВЧ-системе

Материал	$v_p$ , мм/с	$\omega$ , Вт/см <sup>2</sup>	Материал	$v_p$ , мм/с	$\omega$ , Вт/см <sup>2</sup>
Al	0,20—0,27	1,6	Ti	0,08	2,0
Au	0,30—1,50	1,6	SiO <sub>2</sub>	0,20	1,6
Cu	0,30—0,60	1,6	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,10	1,6
W	0,11	1,6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	1,6
Pt	1,50	2,0	ФР AZ-340	0,12—0,5	1,6
Ni	0,83	2,0	ФР KTER	0,12—0,5	1,6

Отметим, что в системах ионно-плазменного распыления (ИПР) нельзя независимо регулировать энергию ионов, ионный ток и давление, а также проводить распыление под наклонными углами. Поэтому скорость ИПР материалов обычно относят к плотности мощности  $\omega$  на мишени или катоде.

Из рис. 2.1,а видно, что  $v_p$  линейно возрастает с увеличением  $\omega$  и скорости распыления материалов различаются не более чем в 2 раза. Для неорганических материалов линейная зависимость  $v_p$  от  $\omega$  наблюдается во всем диапазоне плотностей мощности вплоть до 1,3 Вт/см<sup>2</sup>, тогда как для фоторезиста при  $\omega \geq 1,0$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается резкое возрастание  $v_p$ , связанное с нагреванием образца до температур, превышающих допустимые для органического фоторезистивного материала (рис. 2.1,б) [1, 6].

Приведенные в табл. 2.4 скорости распыления могут существенно различаться, поскольку зависят от вида конструкции ВЧ-систем, согласования ВЧ-генератора с распылительной системой, а также от возвращения распыляемого материала на мишень вследствие процессов обратного отражения и диффузии.

Кроме того, на скорость распыления существенное влияние оказывает количество химически активных газов и паров (в пер-

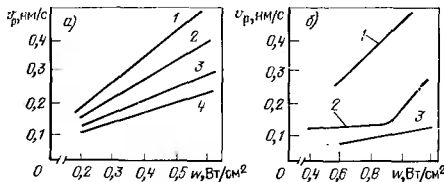


Рис. 2.1. Зависимость скорости распыления  $v_p$  в аргоне различных материалов от плотности мощности  $\omega$ :

а — в дной ВЧ-РС при давлении аргона 0,7 Па (1 — кремний; 2 — диоксид кремния; 3 — нитрид кремния; 4 — фоторезист KTER); б — в дной РС постоянного тока при давлении аргона 7 Па (1 — золото; 2 — фоторезист KTER; 3 — алюминий)

вую очередь  $O_2$  и  $H_2O$ ), содержащихся в остаточной среде рабочей камеры после ее откачки вакуумными насосами. Концентрация химически активных газов и паров зависит от сорбционной способности материала мишени и интенсивности ее распыления.

## 2.2. ПЕРЕНОС РАСПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА ОТ МИШЕНИ К ПОВЕРХНОСТИ КОНДЕНСАЦИИ

Процесс переноса распыленного материала от мишени до поверхности конденсации зависит от средней энергии распыленных частиц, их углового распределения, давления рабочего газа, расстояния между распыляемой и приемной поверхностями, а также в некоторых случаях от наличия электрических и магнитных полей, определяющих движение ионизированных атомов распыленного материала.

В отличие от процесса термовакuumного осаждения, при котором средняя энергия испаренных частиц составляет доли электрон-вольта ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ), средняя энергия распыленных частиц  $E_p$  в области энергий, обычно используемых при распылении 0,5—5 кэВ, лежит в диапазоне от 10 до 100 эВ. При наклонном падении ионов  $E_p$  возрастает в соответствии с законами сохранения импульса энергии, в то время как при уменьшении массы бомбардирующих ионов и атомов распыляемого материала  $E_p$  уменьшается.

В экспериментальных исследованиях наблюдается уменьшение КР материалов, когда давление рабочего газа превышает 1 Па, что связано с увеличением вероятности возвращения распыленных атомов на мишень в результате процессов обратной диффузии и обратного рассеяния (отражения). Под обратной диффузией следует понимать диффузионное возвращение на мишень распыленных атомов, имеющих среднюю кинетическую энергию  $\bar{E}_p$ , равную средней кинетической энергии атомов инертного газа ( $E_g$ ). При этом очевидно, что возвращение распыленных атомов на мишень за счет обратной диффузии может происходить с расстояний, значительно превышающих среднюю длину их свободного пробега ( $\bar{\lambda}_p$ ). Под обратным рассеянием следует понимать возвращение распыленных атомов на мишень в результате их рассеяния на атомах инертного газа. Этот процесс происходит на расстояниях от мишени, не превышающих  $\bar{\lambda}_p$ , и характеризуется различием в кинетических энергиях соударяющихся частиц.

Среднее число столкновений, после которого энергия распыленных атомов станет равной тепловой энергии молекул или атомов используемого газа, а также длина пробега распыленных атомов, на который они «погасят» свою избыточную энер-



гию, могут быть рассчитаны на основе предложенной в [45] физической модели процесса переноса распыленных частиц, учитывающей тот факт, что энергия этих частиц  $E_p$  в сотни раз превышает среднюю кинетическую энергию атомов рабочего газа  $E_r$ . При  $m_a > m_r$  высокоэнергетические атомы распыленного материала движутся среди атомов газа направлению с незначительными искажениями траекторий из-за столкновений [угол рассеяния не может превышать  $\arcsin(m_r/m_a)$ ] до тех пор, пока их энергия не станет равной средней кинетической энергии атомов газа.

Первоначально распыленный атом с массой  $m_a$  имеет энергию  $E_p$  и отдает при каждом столкновении с атомами газа энергию

$$E_{\text{max}} = \frac{4m_a m_r}{(m_a + m_r)^2} \bar{E}_p. \quad (2.13)$$

Доля передаваемой энергии атому с массой  $m_r$  составляет  $q = E_{\text{max}}/\bar{E}_{\text{cp}} = 4m_a m_r / (m_a + m_r)^2$ . После первого столкновения у распыленного атома остается энергия  $\bar{E}_p(1-q)$ , после второго  $\bar{E}_p(1-q)^2$ , после  $n$ -го  $\bar{E}_p(1-q)^n$ . Для того чтобы определить среднее число столкновений  $\bar{N}$ , после которых средняя энергия распыленного атома с начальной энергией  $\bar{E}_p$  станет равной энергии  $\bar{E}_r$ , необходимо приравнять  $\bar{E}_r = \bar{E}_p(1-q)^{\bar{N}}$ , откуда

$$\bar{N} = \frac{\lg(\bar{E}_r/\bar{E}_p)}{\lg\{1 - (E_{\text{max}}/\bar{E}_p)\}}. \quad (2.14)$$

С повышением давления инертного газа при распылении материалов с массой атомов  $m_a$ , большей массы атомов газа  $m_r$ , основным процессом возвращения распыляемых частиц на мишень является обратная диффузия, в результате которой снижается эффективная скорость распыления мишени, а следовательно, и скорость осаждения пленки на подложку. Поэтому на практике для выбора оптимального технологического режима очень важно уметь оценивать давление газа, при котором начнется процесс обратной диффузии. Для расчетов зависимости КР материалов от давления газа и расстояния до поверхности конденсации в ряде случаев используют формулу Ф. Пеннинга и Д. Маубса, которые предположили, что для распыленных атомов можно пользоваться выражением, полученным В. де Готтом и Г. Позе для описания диффузии в газе испаряющихся атомов между двух бесконечных плоскостей [46]. Формула предусматривает равенство средних кинетических энергий распыленных частиц  $E_p$  и атомов газа  $\bar{E}_r$ :

$$Y_p(p) = Y_p \frac{2,3\lambda p_0(1)}{2,3\lambda r_0(1) + F_0 d}, \quad (2.15)$$

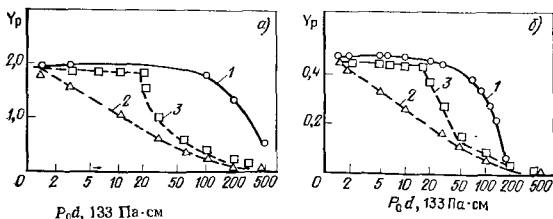


Рис. 2.2. Зависимость  $Y_p$  от  $\rho_0 d$  для меди (а) и для никеля (б):  
1 — эксперимент; 2 — расчет по формуле (2.15); 3 — расчет по формуле (2.19)

где  $Y_p$  — истинный КР материала без учета влияния обратной диффузии;  $\bar{\lambda} p_0(1)$  — средняя длина свободного пробега распыленных атомов при давлении  $p=1$  Па и температуре 273 К;  $p_0=273 p/T$  — давление газа, приведенное к  $T=273$  К;  $d$  — расстояние от мшени до поверхности конденсации. Рассчитанные по формуле (2.15) зависимости  $Y_p$  меди и никеля от произведения  $\rho_0 d$  по сравнению с экспериментальными данными дают более чем на порядок заниженные значения  $\rho_0 d$  для начала обратной диффузии (рис. 2.2) [6]. Поэтому формула (2.15) не может быть использована для инженерных расчетов при выборе технологического режима распыления и геометрии РС, что показывает необходимость разработки новой физической модели процесса переноса распыленных частиц в среде рабочего газа.

Среднюю длину направленного пробега  $\bar{L}_k$  распыленных атомов, на которой они в результате столкновений с атомами газа теряют свою избыточную по сравнению с  $\bar{E}_T$  энергию, можно определить по формуле

$$\bar{L}_k = \lambda_{\infty}(1) \bar{N} / p_0, \quad (2.16)$$

где  $\bar{\lambda} p_{\infty}(1)$  — средняя длина свободного пробега распыленных атомов при  $p=1$  Па и  $T \gg C$  ( $C$  — постоянная Сазерленда).

Введем понятие средней длины направленного пробега при единичном давлении газа  $\bar{L}_k(1) = \bar{L}_k p$ , которую в соответствии с (2.16) можно определить как

$$\bar{L}_k(1) = \bar{\lambda} p_{\infty} N. \quad (2.17)$$

В табл. 2.5 приведены рассчитанные по формуле (2.17) значения  $\bar{L}_k(1)$  для ряда металлов при распылении их ионами аргона с энергией 0,6—4 кэВ.

Таблица 2.5. Средняя длина направленного пробега распыленных атомов

Распыляемый материал	Ti	Cu	Ni	Fe	Mo	Au	Ta	W	Pt
$\bar{L}_k(1), 10^{-2}$ Па·м	1,41	2,13	2,33	2,54	3,58	3,55	5,80	5,95	6,07

С учетом первоначального направления движения распыленных атомов в газе зависимость КР от произведения  $p_0d$  можно записать при  $p_0d < \bar{L}_k(1)$  в виде

$$Y_p(p) = Y_p, \quad (2.18)$$

а при  $p_0d > \bar{L}_k(1)$  в виде

$$Y_p(p) = Y_p \frac{2,3\bar{\lambda}p_0(1)}{2,3\bar{\lambda}p_0(1) + p_0d - \bar{L}_k(1)}. \quad (2.19)$$

Давление газа, при котором начинается процесс возвращения распыленного материала на мишень в результате обратной диффузии, определяется по формуле

$$p_0 = \bar{L}_k(1)/d. \quad (2.20)$$

Как видно на рис. 2.2 (кривые 3), зависимости  $Y_p = f(p_0d)$  для меди и никеля, рассчитанные по формуле (2.19), значительно точнее описывают экспериментальные данные, чем зависимости, рассчитанные по формуле (2.15). Найденные по формуле (2.20) значения  $p_0d$ , при которых начинается обратная диффузия (начало уменьшения КР на рис. 2.2), хорошо согласуются с экспериментом и могут быть использованы при выборе оптимальных технологических режимов распыления и травления материалов. Более резкое уменьшение КР с ростом  $p_0d$  на рассчитанных по формуле (2.19) зависимостях по сравнению с экспериментальными в области обратной диффузии связано с допущением о передаче максимальной доли энергии  $E$  от распыленных атомов атомам газа и с аппроксимацией распределения распыленных атомов по энергиям  $E_p$ .

При  $m_a < m_r$  основным процессом, определяющим возвращение частиц на мишень в области  $p_0d < \bar{L}_k(1)$  является обратное рассеяние. Зависимость КР от давления газа при условии изотропности рассеяния может быть представлена в виде

$$Y_p(p) = (1/2)Y_p \{1 + \exp[-p_0d/(\bar{\lambda}p_\infty(1))]\}. \quad (2.21)$$

В области  $p_0d > \bar{L}_k(1)$  распыленные частицы возвращаются на мишень как за счет обратного рассеяния, так и за счет обратной диффузии, и зависимость КР от давления газа имеет вид

$$Y_p(p) = \frac{(1/2)Y_p \{1 + \exp[-p_0d/(\bar{\lambda}p_\infty(1))]\} 2,3\bar{\lambda}p_0}{2,3\bar{\lambda}(p_0(1) + p_0d)}. \quad (2.22)$$

### 2.3. ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНКИ НА ПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Основными факторами, определяющими процесс формирования пленки, являются формы и взаимное пространственное расположение распыляемой и приемной поверхностей, а также коэффициент конденсации (КК) на различных участках приемной поверхности. Используются мишени в виде диска, прямоугольника, кольца, усеченного конуса, круглых стержней и плоских полосок, цилиндра, а также козырька, состоящего из двух прямоугольных пластин. Наиболее распространенными видами приемной поверхности являются плоскость, полусфера и цилиндр, которые при размещении на них подложек в большинстве случаев приобретают рельефную форму [15]. Решающим фактором обеспечения высокой равномерности является выбор формы и взаимного пространственного расположения мишени и приемной поверхности при оптимально выбранном расстоянии между ними и устранении эффектов «затенения» отдельных участков приемной поверхности при наличии на ней рельефа.

Процесс конденсации материалов при ионном распылении существенно отличается от процесса конденсации при термовакuumном испарении, поскольку при ионном распылении не существует критической температуры и критической плотности пучка частиц и конденсация пленок происходит при любых критически возможных плотностях пучка и температурах подложки, что объясняется высокой энергией распыленных частиц.

Значение и распределение КК по площади приемной поверхности зависят от температуры и ее распределения, а также чистоты и кристаллографического совершенства материала подложек. С ростом температуры и увеличением степени загрязнения поверхности, а также при увеличении угла падения частиц КК уменьшается. Таким образом, скорость и распределение скорости осаждения  $v_{ос}$  по приемной поверхности  $F_{пр}$  зависят:

от значения и распределения скорости распыления по поверхности мишени (или мишеней)  $F_m$ ;

от формы мишени и закона углового распределения распыленных частиц;

от механизма переноса распыленных частиц (диффузионного или направленного) и расстояния от мишени до приемной поверхности;

от формы приемной поверхности и распределения коэффициента конденсации по ней.

Расчет распределения скорости осаждения, а следовательно, и толщины пленки на приемной поверхности с учетом всех перечисленных факторов практически невозможен. Поэтому при расчете конструкции РС обычно делают следующие упрощающие предположения:

КК принимают равным 1 и одинаковым на всей приемной поверхности;

функцию, учитывающую закон углового распределения распыленных частиц, а также форму и взаимное расположение приемной поверхности и поверхности мишени определяют в предположении косинусного закона распределения или небольших отклонений от него;

скорость распыления  $v_p = f(F_M)$  считают постоянной по всей поверхности мишени или имеющей ступенчатое распределение.

С учетом сделанных предположений в [15] приведен расчет распределения скоростей осаждения и толщины пленки на плоской приемной поверхности для мишеней дисковой, кольцевой, прямоугольной, полосковой формы, а также формы козырька из двух прямоугольных пластин. Расчеты выполнены для косинусного закона распыления с учетом отклонения от этого закона, а также для неоднородного распыления мишеней. Показано, что при ВЧ-распылении наибольшую площадь с заданной равномерностью обеспечивает мишень козырьковой формы.

Обычно распыление выполняют с одной стороны мишени, а ее противоположную сторону охлаждают проточной водой и защищают от распыления специальным металлическим экраном, находящимся под потенциалом анода. Измерение траектории ионов около края мишени, к которому они по сравнению с центральной областью подходят под большим углом, вызывает локальное увеличение плотности тока и усиливает эффект распыления у краев мишени. В результате на краях подложки наблюдается наиболее резкое изменение толщины пленки, которое может существенно отличаться от расчетного. Этот нежелательный эффект можно уменьшить, удлинив края экрана или придав ему изогнутую форму. В некоторых случаях экран может полностью закрывать боковые поверхности мишени, имея отверстие для ее распыления лишь в центральной части.

При распылении с одинаковой плотностью ионного тока по всей поверхности дисковой мишени (так называемом однородном распылении) скорость осаждения в точке, находящейся на расстоянии  $r$  от проекции центра мишени на плоскость осаждения, определяется выражением

$$I_{o(r)} = \frac{v_p}{2} \left\{ 1 + \frac{R^2 - r^2 - D^2}{[(D^2 + R^2 - r^2) + (2rD)^2]^{1/2}} \right\}, \quad (2.23)$$

где  $v_p$  — скорость распыления с единицы площади мишени;  $R$  — радиус мишени;  $D$  — расстояние между мишенью и плоскостью осаждения, параллельной поверхности мишени.

Введя безразмерные параметры  $a = D/R$  и  $b = r/R$ , получим [4, 47]:

$$I_{o(b)} = \frac{v_p}{2} \left\{ 1 + \frac{1 - b^2 - a^2}{[(a^2 + 1 - b^2)^2 + (2ab)^2]^{1/2}} \right\}. \quad (2.24)$$

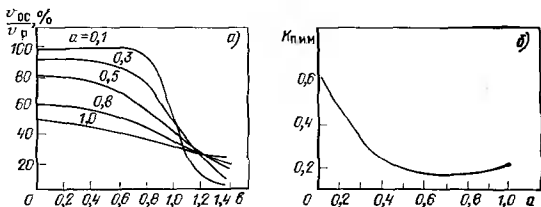


Рис. 2.3. Зависимость  $v_{ос}/v_p$  от параметра  $b=r/R$  (а) и  $K_{п.л.м}$  от параметра  $a=D/R$  (б)

На рис. 2.3,а приведены расчетные кривые, характеризующие процесс осаждения при допущении, что имеет место косинусный закон эмиссии, отсутствует столкновение распыленных атомов с атомами рабочего газа и коэффициент прилипания распыленных атомов к подложке равен единице.

В подавляющем большинстве случаев неравномерность пленок по толщине не должна превышать 5%. При этом желательно иметь максимально большую площадь приемной поверхности, на которой обеспечивается требуемая равномерность. В диодных ПТ- и ВЧ-системах с плоскопараллельными электродами в форме дисков при распылении с равномерной плотностью ионного тока по поверхности мишени площадь приемной поверхности, на которой обеспечивается 5%-ная равномерность пленок по толщине,  $F_0$  значительно меньше площади мишени  $F_m$ .

Показателем степени полезного использования мишени является коэффициент  $K_{п.л.м} = F_0/F_m$ . Из приведенной на рис. 2.3,б зависимости  $K_{п.л.м}$  от параметра  $a$  видно, что в подавляющем большинстве случаев  $K_{п.л.м} < 0,25$ . Как показали проведенные расчеты и экспериментальные исследования в распылительных системах с дисковой или прямоугольной мишенью, имеющими небольшие размеры по сравнению с расстоянием мишень-подложка, для улучшения равномерности осаждаемых пленок целесообразно увеличивать плотность тока на периферийных областях мишени. Создание РС с двумя мишенями в виде кольца и диска открывает возможности управления равномерностью толщины пленок путем изменения режимов распыления кольцевой мишени. Незначительное увеличение достигнутого значения  $K_{п.л.м}$  может быть получено разделением мишени на большое количество очень тонких колец с оптимальным режимом распыления каждого кольца, однако практическая реализация такого способа распыления встречает ряд трудностей. Поэтому даль-

Таблица 2.6. Средняя энергия, эВ, при распылении различных металлов в планарной и цилиндрической МРС

Металл	Атомная масса	Средняя энергия, эВ		
		Планарный магнетрон	Цилиндрический магнетрон	Расчетное значение
Al	27,0	11	13	13
Cr	52,0	16	20	16
Ni	58,7	15	15	19
Cu	63,5	12	17	12
Mo	95,0	42	47	26
Ip	114,8	15	20	9
Ta	181,0	98	107	38
W	183,8	98	100	40
Pt	195,2	48	—	30

нейшее увеличение  $K_{п.и.м}$  и получение заданной равномерности пленок по толщине на подложках со сложным профилем приемной поверхности (при наличии «ступенек», «окон» и др.) требует создания мишеней с трехмерной поверхностью распыления. В частности, для этой цели могут быть использованы комбинированные РС на основе обычных дисковых мишеней в сочетании с магнетронными РС в виде колец конической или плоской формы.

Процесс осаждения пленки на подложку сопровождается ее нагревом:

кинетической энергией атомов осаждаемого материала;

выделяемым при конденсации теплом;

кинетической энергией нейтрализованных и отраженных у мишени атомов;

излучением плазмы.

В табл. 2.6 приведены экспериментально полученные значения средней энергии атомов металлов при распылении в Аг при давлении 0,16 Па напряжения разряда 500—800 В и разрядном токе от 2 до 3 А. Энергия в планарном магнетроне была обычно на 5—20 % меньше, чем в цилиндрическом магнетроне [48].

В приведенных в табл. 2.6 расчетных значениях не учтен вклад отраженных и нейтрализованных ионов. Однако выделяемая при этом энергия сопоставима, а в некоторых случаях превосходит энергию, которая выделяется в процессе конденсации материала пленки на подложке. Так, при осаждении с помощью МРС Al со скоростью 0,6 мкм/мин удельный энергетический поток за счет конденсации атомов Al составляет примерно 1,7, за счет кинетической энергии атомов Al около 4,4, за счет кинетической энергии отраженных нейтрализованных ионов Al — около 1,5 Дж/(мин·см<sup>2</sup>).

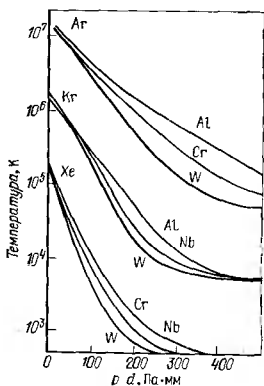


Рис. 2.4. Зависимость температуры распыленных атомов Al, Cr, Nb и W при распылении в Ar, Kr и Xe от  $pd$

Значительная энергия распыленных атомов (до 100 эВ) и отраженных атомов рабочего газа (до 16 эВ) не позволяет осаждать пленки металлов на сверхтопкие слои диэлектриков, используемых при создании структур металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-структур) и интегральных структур на тугоплавких сверхпроводниках на основе Nb, NbN, Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Al, Nb<sub>3</sub>Ge, в которых используются сверхтопкие промежуточные слои диэлектриков. В обоих случаях необходима термо-

линизация, т. е. «гашение» кинетической энергии осаждающихся и отраженных атомов в результате многократных столкновений высокоэнергетических атомов с атомами рабочего или «буферного» газа.

В [48, 49] приведены расчеты термолинизации распыленных атомов Al, Cr, Nb, W в Ar, Kr, Xe (рис. 2.4), а также отраженных нейтрализованных ионов Ar, Kr, Xe (рис. 2.5), которые в ряде случаев оказывают определяющее влияние на нагрев подложек. Приведенная на рис. 2.6 результирующая кривая показывает, что для газов, имеющих сравнительно небольшую атомную массу (например, Ne), распыляемые атомы, имеющие начальную энергию 20 эВ, снижают ее на ~90% при  $pd =$

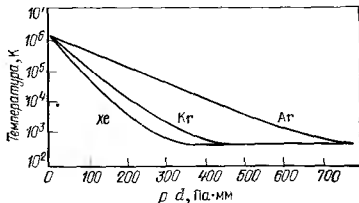
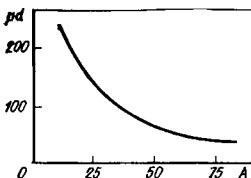


Рис. 2.5. Зависимость температуры отраженных нейтрализованных ионов Ar, Kr и Xe от  $pd$



Рис. 2.6. Зависимость  $pd$ , при которой энергия распыленных атомов снижается на 90 % от атомной массы рабочего газа (начальная энергия распыленных атомов 20 эВ)



$\approx 200$  Па·мм, в то время как для газов, обладающих большей атомной массой (Ar, Kr, Xe),  $pd \approx 100$  Па·мм.

Как показано в [49], энергия распыленных атомов резко снижается и одновременно существенно возрастает скорость осаждения при увеличении атомной массы используемого рабочего газа (рис. 2.7). В этой же работе получены экспериментальные данные по нагреву подложек в планарных конструкциях МРС при осаждении пленок Al, Cr, Ni, Co, Mo, In, Ta, W в Ar, а также при распылении Al и Cr в присутствии  $O_2$ . Там же приводятся данные по нагреву подложек в процессе осаждения с помощью цилиндрической МРС пленок Nb, Ag, Ta, W и сплава Pb—Sn в Ar, а также при распылении Mo в Ne, Ar, Kr и Xe. При распылении в аргоне атомов легких металлов энергия составляет 10—15 эВ, а при распылении Ta и W—100 эВ. При использовании реактивного распыления энергия составляла 500 эВ для молекул  $Cr_2O_3$  и 1150 эВ для молекул  $Al_2O_3$ . Показано, что излучение плазмы не вносит существенный вклад в нагрев подложек, в то время как нейтрализуемые и отраженные ионы дают основной вклад в нагрев подложки в планарной и цилиндрической конструкциях МРС. Сравнительно высокие энергии (порядка 100 эВ) имеют место, когда при среднем значении КР отношения атомных масс материала мишени и рабочего газа имеют большое значение (комбинации Mo—Ne,

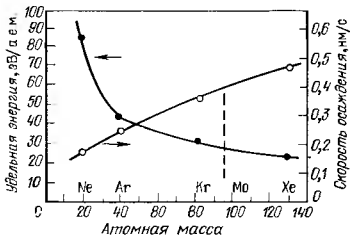


Рис. 2.7. Зависимость удельной энергии и скорости осаждения от атомной массы рабочего газа при распылении Mo в цилиндрической МРС при  $p = 0,13$  Па,  $U_p = 500 \div 1000$  В,  $I_p = 1 \div 3$  А

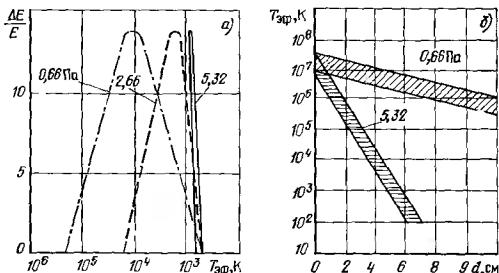


Рис. 2.8. Распределение по энергиям распыленных атомов Nb перед осаждением на подложку при различном давлении Ag (а) и зависимость эффективной температуры атомов Nb от расстояния мишень — подложка при различном давлении Ag при осаждении пленок Nb (б)

Ta—Ag, W—Ag). При этом нагрев подложек определяется ионами, которые нейтрализуются и отражаются у мишени.

Давление рабочего газа оказывает определяющее влияние на распределение по энергиям распыленных атомов (рис. 2.8,а) [50]. Видно, что при давлении Ag  $p=5,32$  Па эффективная температура атомов Nb близка к температуре подложки (650 К). Однако на подложку одновременно поступает поток отраженных от мишени атомов Ag. Рассчитанная по теории упругих соударений максимальная и минимальная энергия отраженных атомов Ag при напряжении на мишени 400 В составляет соответственно 160 и 60 эВ. Эффективная температура атомов Ag существенно снижается по мере увеличения расстояния до мишени (рис. 2.8,б). При давлении Ag  $p=5,32$  Па  $T_{эф}$  атомов Ag снижается до температуры подложки (650 К) на расстоянии от мишени около 7,5 см. Поскольку в МРС благодаря наличию магнитной ловушки вблизи мишени создается локальная зона высокого давления, то это позволяет для термализации частиц использовать также легкие газы [ $H_2$ , He], которые не могут проникнуть в зону плазменного кольца и по существу не принимают участия в процессе распыления. Экспериментально показано, что добавка  $H_2$  в Ag (до 55%) не изменяет скорости осаждения [51]. Распыление мишени по-прежнему производят ионы Ag, в то время как легкие газы «гасят» кинетическую энергию частиц при их подходе к подложке.

Для снижения загрязнения пленок посторонними газовыми включениями используют:

распыление со смещением, когда к электроду, на котором закреплены подложки, прикладывается отрицательное напряжение, в результате которого возникает направленный поток положительных ионов к подложке. Бомбардируя растущую пленку, ионы инертного газа удаляют с ее поверхности слабосвязанные молекулы адсорбированных газов, оксиды и другие загрязнения;

геттерное распыление материалов, обладающих высокой газопоглощающей способностью (Ta, Ti, Nb и др.), при котором производится предварительное осаждение на водоохлаждаемые стенки рабочей камеры пленки распыляемого материала, поглощающей активные газы и уменьшающей их содержание в зоне разряда.

Отрицательное смещение на подложку может быть подано в системах распыления и ВЧ-распыления. Выбор напряжения смещения оказывает существенное влияние на свойства пленок. При малом смещении не обеспечивается эффективное удаление загрязнений. Если же смещение чрезмерно велико, то может иметь место захват ионов инертных и активных газов приповерхностной решеткой (зависящий от вида и энергии ионов, от материала пленки, от температуры и других факторов) и ряд побочных явлений (рекристаллизация пленки, появление дефектов и др.). Оптимальные напряжения смещения лежат в очень широком диапазоне: Cu — 35, Ag — 35, Au — 40, Ni — 50, Pd — 75, Rh — 100, Mo — 150, Pt — 150, W — 200, Nb — 200, Ta — 200 В.

В некоторых случаях в начальный период распыления на подложку подают не отрицательное, а небольшое положительное смещение. Очистки подложки при этом не происходит, а возникает направленный поток отрицательных ионов, приводящий к возникновению промежуточного тонкого слоя оксида, в результате чего обеспечивается хорошая адгезия пленки к подложке.

#### 2.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Сравнение энергетической эффективности процесса ионного распыления материалов в различных системах, а также эффективность самих РС можно проводить, используя два основных критерия [52].

1. Энергетическую эффективность процесса ионного распыления  $\xi_{\text{п}}$ , кг/Дж, определяемую массой вещества  $m_{\text{р}}$ , распыляемого в единицу времени с единицы площади, отнесенной к плотности мощности  $W_{\text{уд}}$ , затрачиваемой на реализацию процесса распыления:

$$\xi_{\text{п}} = m_{\text{р}} / W_{\text{уд}} \quad (2.25)$$

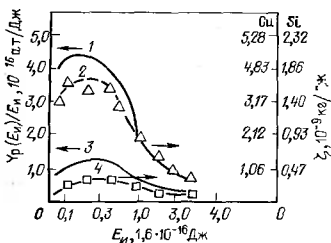


Рис. 2.9. Теоретические (1, 3) и экспериментальные (2, 4) зависимости  $Y_p(E_n)/E_n$  и энергетической эффективности  $\zeta_n$  процессов ионного распыления меди (1, 2) и кремния (3, 4) от энергии ионов аргона  $E_n$ .

Величина  $W_{уд} = j_n U_n$ , где  $j_n$  — плотность ионного тока на поверхности распыляемого материала;

$U_n$  — напряжение, ускоряющее ионы. Величины  $E_n = eU_n$  определяют энергию бомбардирующих материал ионов. В случае распыления материала однозарядными ионами  $m_p = Y_p \times X(E_n) A_m j_n / (N_A e)$ , где  $Y_p(E_n)$  — коэффициент распыления материала ионами с энергией  $E_n$ ;  $A_m$  — атомная масса распыляемого материала;  $N_A$  — число Авогадро;  $e$  — заряд электрона. Подставляя выражения для  $m_p$  и  $W_{уд}$  в (2.25), получаем

$$\zeta_n(E_n) = \frac{Y_p(E_n)}{E_n} \frac{A_m}{N_A}. \quad (2.26)$$

Из выражения (2.26) следует, что энергетическая эффективность процесса распыления зависит от энергии бомбардирующих ионов, которая для различных РС может меняться в широком диапазоне: от  $(4,8-8) \cdot 10^{-17}$  Дж (300–500 эВ) для магнетронных до  $(3,2-5,6) \cdot 10^{-16}$  Дж (2–3,5 кэВ) для диодных РС. Зависимость  $\zeta_n$  от  $E_n$  определяется зависимостью  $Y_p(E_n)/E_n$  от  $E_n$ . Из кривых, приведенных на рис. 2.9, видно, что максимальные значения  $\zeta_n$  для меди и кремния наблюдаются для энергий ионов в диапазоне  $(4,8-8) \cdot 10^{-17}$  Дж (300–500 эВ). Это означает, что в данном диапазоне энергий ионов наблюдается максимальная энергетическая эффективность процесса распыления, т. е. максимальная доля энергии ионов расходуется на распыление материала. Увеличение энергии ионов вызывает рост КР материала, но доля энергии, расходуемой на распыление, уменьшается в большей степени, поэтому энергетическая эффективность процесса снижается. Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 2.9, наблюдаются при распылении любых материалов и являются общими энергетическими характеристиками процесса распыления. Значения энергии ионов  $E_n^*$ , которые соответствуют максимальной энергетической эффективности процесса распыления материалов, лежат в диапазоне  $(5-7,4) \cdot 10^{-17}$  Дж (310–460 эВ) и хорошо согласуются с экспериментальными данными.

2. Энергетическую эффективность системы ионного распыления  $\xi_c$ , кг/Дж, определяемую отношением массы вещества  $m_c$ , распыляемого в единицу времени, к мощности  $W_c$ , подводимой к системе:

$$\xi_c = m_c / W_c. \quad (2.27)$$

Подставляя  $m_c = \xi_n I_n U_n$ , где  $I_n$  — ионный ток на поверхность распыляемого материала (мишени), в формулу (2.27), получаем

$$\xi_c = \xi_n (E_n) I_n U_n / W_c. \quad (2.28)$$

Из выражения (2.28) следует, что энергетическая эффективность РС определяется энергетической эффективностью реализуемого в ней процесса распыления  $\xi_n(E_n)$  и коэффициентом преобразования подводимой к системе мощности в мощность, непосредственно затрачиваемую на процесс распыления  $\chi = I_n U_n / W_c$ . Выражения для  $W_c$ , а следовательно, и для  $\chi$  могут быть различными в зависимости от вида РС. В табл. 2.7 приведены рабочие параметры различных РС, коэффициенты преобразования подводимой мощности, энергетические эффективности процесса ионного распыления меди ионами аргона в различных РС, а также энергетические эффективности самх РС.

Для ПТ-диодных и ПТ-магнетронных РС  $W_c = I_p U_p$ , где  $I_p$  — ток разряда,  $U_p$  — напряжение на разрядном промежутке. Учитывая, что  $I_p = I_n(1 + \gamma)$ , где  $\gamma$  — коэффициент вторичной электронной эмиссии, и оценивая  $U_n = 0,7 I_p$  из формулы (2.28), получаем

$$\xi_c = \xi_n (E_n) 0,7 / (1 + \gamma). \quad (2.29)$$

Из представленных на рис. 2.9 кривых следует, что при бомбардировке Си ионами Ag с энергиями  $4,8 \cdot 10^{-17}$  Дж (300 эВ) и  $4,8 \cdot 10^{-16}$  Дж (3 кэВ) значения  $\gamma$  соответственно составляют 0,05 и 0,2 электрон/ион, а значения  $\xi_n$   $3,7 \cdot 10^{-9}$  и  $1,1 \cdot 10^{-9}$  кг/Дж. Подставляя эти значения в формулу (2.29), получаем, что по Си  $\xi_c$  ПТ-магнетронной системы равна  $2,4 \cdot 10^{-9}$  кг/Дж, а ПТ-диодной  $0,6 \cdot 10^{-9}$  кг/Дж. Таким образом, ПТ-магнетронная система в 4 раза более энергетически эффективна при распылении Си, чем ПТ-диодная, т. е. при одной и той же подводимой мощности в магнетронной системе распыляется в 4 раза больше Си. Кроме того, в приведенных расчетах не учитывалось, что ПТ-диодная система работает при давлении на порядок выше, чем ПТ-магнетронная, и поэтому в ней должно наблюдаться возвращение распыленных атомов на мишень в результате обратной диффузии и рассеяния. Эти процессы, влияние которых на коэффициент распыления рассмотрено в [45], еще больше снижают энергетическую эффективность диодной ПТ-системы по сравнению с магнетронной.

Таблица 27. Рабочие параметры ос

Вид РС	$p$ , Па	$U$ , кВ	$P_{и}$ , $1,6 \cdot 10^{-16}$ Дж
Диодная на постоянном токе	1—15	3,0—5,0	2,0—3,5
ВЧ-диодная	0,5—5	Ампл. 1,0—2,0	0,7—1,5
Триодная	0,05—0,7	1,0—2,0	1,0—2,0
Триодная с локализацией плазмы магнитным полем	$(1-15) \times 10^{-2}$	1,0—2,0	1,0—2,0
С автономным ионным источником	$(1-15) \times 10^{-3}$	1,0—3,0	1,0—3,0
Магнетронная на постоянном токе	0,3—1,5	0,4—0,8	0,3—0,5
ВЧ-магнетронная	0,1—0,7	Ампл. 0,7—1,0	0,5—0,7

Для ВЧ-диодной и ВЧ-магнетронных РС мощность, подводимая к системе  $W_c$ , не может быть выражена через ток и напряжение разряда, а измеряется с помощью специальных устройств [53]. Значения  $U_{и}$  в ВЧ-системах определяются из сравнения скоростей распыления материалов в них со скоростями распыления этих материалов в РС постоянного тока. Значение  $U_{и}$  в ВЧ-системах составляет около 3/4 амплитудного значения  $U_{и}$ . Как видно из табл. 27, энергетическая эффективность ВЧ-диодных систем несколько выше, чем ПТ-диодных систем (при условии полного согласования РС с ВЧ-генератором). Это связано с более низкими значениями энергии бомбардирующих ионов  $(1,1-2,4) \cdot 10^{-16}$  Дж (700—1500 эВ), что увеличивает энергетическую эффективность процесса распыления в большей степени, чем уменьшается коэффициент преобразования подводимой мощности  $\chi$ . Энергетическая эффективность ПТ-магнетронных систем выше, чем у ВЧ-магнетронных, поскольку в последние при примерно одинаковых энергиях бомбардирующих ионов ионные точки значительно меньше.

Для триодных РС подводимая к системе мощность складывается из мощности, идущей на накал термокатода (термокатодов), мощности дугового разряда и мощности, выделяемой на мишени, а произведение  $I_{и}U_{и}$  с достаточной точностью определяется произведением  $I_{и}U_{м}$ , где  $I_{и}$  — ток на мишени,  $U_{м}$  — напряжение на мишени. Для триодных систем с локализацией плазмы магнитным полем и РС с автономными ионными источниками в значение  $W_c$  добавляется мощность питания электромагнитов, в РС с автономными ионными источниками и ноннолучевых системах, в которых напряжение, ускоряющее ионы, прикладывается не к мишени, а к ускоряющему электроду перед мишенью, энергия бомбардирующих мишень ионов может быть в 1,3—1,5 раза меньше произведения заряда ионов на ус-

НОВЫХ ВИДОВ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

$I_m, A$	$W, кВт$	$\chi$	$\zeta_{II}, 10^{-3} кг/Дж$	$\zeta_c, 10^{-3} кг/Дж$
0,5—0,8	2,0—5,0	0,5—0,6	0,9—1,4	0,5—0,7
1,0—2,0	3,0—5,0	0,2—0,6	1,6—2,5	0,5—1,0
3,0—5,0	10—15	0,3—0,7	1,4—2,1	0,6—1,0
10—15	35—40	0,3—0,7	1,4—2,1	0,6—1,0
0,2—0,5	8,0—10	$(0,3—1,5) \times 10^{-1}$	1,0—2,1	$(0,6—1,5) \times 10^{-2}$
15—20	8—15	0,6—0,7	3,0—3,8	2,1—2,3
2,0—4,0	3,0—5,0	0,3—0,6	2,5—3,0	0,9—1,5

коряющее напряжение. В триодных РС и в системах с автономными ионными источниками нельзя работать при низких напряжениях на мишени (300—500 В), при которых наблюдается максимальная энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов. Это связано с тем, что ионный ток на мишени пропорционален  $U_m^{3/2}$ , вследствие чего при низких напряжениях на мишени значения ионного тока малы. Значение  $I_m$  при одной и той же величине  $U_m$  тем меньше, чем больше удалена мишень от области плазмы. Этим объясняется, в частности, низкий коэффициент преобразования и низкая энергетическая эффективность РС с автономными ионными источниками [50] по сравнению с высоким значением этих параметров для МРС, поэтому последние наиболее целесообразно применять для процессов нанесения материалов в промышленных установках.

### Глава 3

## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

### 3.1. МЕХАНИЗМ РАЗРЯДА, ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МРС

Реализуемый в МРС аномальный тлеющий разряд происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. Электроны, эмиттируемые в мишени под действием ионной бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям вблизи поверхности мишени. В результате многократных столкно-

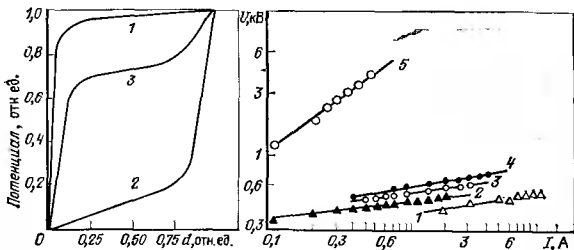


Рис. 3.1. Распределение потенциала в разрядном промежутке МРС с цилиндрическими электродами

Рис. 3.2. Типичные ВАХ:

1 — МРС планарного типа с прямоугольной мишенью; 2 — МРС с цилиндрической полой мишенью; 3 — МРС планарного типа с кольцевой мишенью; 4 — МРС с цилиндрической мишенью; 5 — обычная диодная РС без магнитного поля (во всех случаях распыления Al для МРС  $p=0,13$  Па, для диодной РС  $p=6,5$  Па)

вений электронов с атомами рабочего газа (обычно Ar) резко увеличивается степень ионизации плазмы и возрастает плотность ионного тока (примерно в 100 раз по сравнению с диодными РС без магнитного поля), что приводит к существенному (в 50—100 раз) увеличению скорости распыления материала мишени.

В зависимости от магнитной индукции реализуемый в МРС режим может иметь три различных вида (рис. 3.1). Если магнитное поле слабое ( $B < 0,01$  Тл), то наблюдается режим с преимущественным положительным объемным зарядом у катода, когда основная часть приложенного напряжения падает в темном катодном пространстве (ТКП) (кривая 1). При средних значениях магнитной индукции ( $0,01 < B < 0,09$  Тл) возникает второй вид разряда — режим с отрицательным объемным зарядом у анода, когда основная часть приложенного напряжения падает вблизи анода (кривая 2). В сильных магнитных полях ( $B > 0,1$  Тл) режим с анодным падением потенциала частично модифицируется и вновь становится заметным падение потенциала в ТКП (кривая 3).

Переход режима разряда из одного вида в другой зависит не только от магнитной индукции, но также от конструкции МРС, давления рабочего газа и ряда других факторов. Поскольку магнитная индукция увеличивает траекторию движения электронов, то при этом одновременно возрастает число их столкновений с атомами рабочего газа и можно считать, что наложение магнитного поля эквивалентно увеличению давления газа.



В первом приближении эквивалентное давление  $p_0 \approx p_0 \omega_e \tau_e$  (где  $p_0$  — рабочее давление в отсутствие магнитного поля;  $\tau_e$  — время между столкновениями электрона с атомами рабочего газа;  $\omega_e$  — циклотронная частота электрона). Поскольку  $\omega_e = (e/m)B$ ,  $\tau_e \approx \lambda_e / p_0 [2(e/m)U_\phi]^{1/2}$  [где  $e/m$  — удельный заряд электрона,  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг;  $B$  — индукция магнитного поля;  $\lambda_e$  — средняя длина свободного пробега электрона при  $p=1$  Па;  $U_\phi$  — приложенное напряжение], то

$$\omega_e \tau_e \approx \lambda_e B (e/m)^{1/2} / (2^{1/2} p_0 U_\phi^{1/2}). \quad (3.1)$$

Приняв типичные для МРС условия ( $p_0 = 10^{-1}$  Па;  $U_\phi = 400$  В;  $B = 0,01$  Тл;  $\lambda_e = 2 \cdot 10^{-1}$  м при  $p_0 = 1$  Па), получим

$$\omega_e \tau_e = \frac{2 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^5}{1,41 \cdot 10^{-1} \cdot 20} \approx 300. \quad (3.2)$$

Для стационарного режима существования разряда в МРС характерны следующие условия:  $\omega_e \tau_e \gg 1$ ;  $\omega_i \tau_i < 1$ ;  $r_i > l > r_e$ , где  $r_i$  и  $r_e$  — циклотронные радиусы иона и электрона соответственно;  $\omega_i$  — циклотронная частота иона;  $\tau_i$  — время между столкновениями свободного пробега иона;  $l$  — характерный размер системы.

О механизме разряда в МРС наиболее полное представление дает вольт-амперная характеристика (ВАХ). Типичные ВАХ для МРС с планарной и цилиндрической мишенью при распылении Al в Ag приведены на рис. 3.2. Как показали исследования [54, 55], существенное влияние на ВАХ оказывают рабочее давление, магнитная индукция, материал мишени и степень его эрозии (рис. 3.3). С уменьшением давления ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений, и форма ВАХ постепенно изменяется от криволинейной к прямолинейной (рис. 3.3,а). Аналогичное влияние оказывает увеличение магнитной индукции (рис. 3.3,б). Близкие к линейным зависимости наблюдаются при больших значениях  $B$ .

Поскольку при низком давлении разряд в МРС поддерживается в основном за счет вторичных электронов, эмиттируемых с мишени в результате ионной бомбардировки, то на ВАХ большое влияние оказывает материал мишени (рис. 3.3,в), и форма ВАХ постепенно видоизменяется по мере эрозии мишени (рис. 3.3,г). В результате эрозии мишени в зоне распыления образуется своеобразный полый катод и улучшаются условия локализации плазмы, что приводит к сдвигу ВАХ в область меньших рабочих напряжений, причем этот сдвиг растет с увеличением давления.

ВАХ экстраполируется выражением

$$I = \beta (U - U_0)^2, \quad (3.3)$$

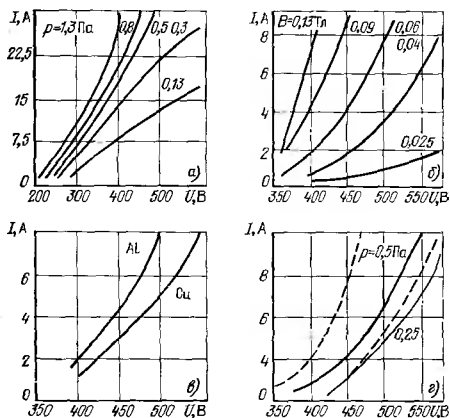


Рис. 3.3. Зависимость ВАХ от давления  $A_g$  при распылении  $Al$  в планарной МРС при  $B=0,03$  Тл (а); от индукции магнитного поля при распылении  $Al$  в планарной МРС при  $p=0,3$  Па (б); от материала мишени при распылении  $Al$  и  $Cu$  в планарной МРС при  $p=0,3$  Па и  $B=0,08$  Тл (в); от степени эрозии конической мишени для новой (сплошные линии) и эродированной (штриховые линии) мишени при  $B=0,06$  Тл и различном давлении  $A_g$  (г)

где  $\beta$  — коэффициент, зависящий от конструкции МРС и операционных параметров процесса;  $U_0$  — минимальное напряжение, необходимое для существования разряда (напряжение гашения).

В [56] было установлено, что  $U_0$  с ростом давления  $A_g$  от 0,1 до 1 Па сперва резко падает с 400 до 250 В, а затем медленно снижается, достигая 200 В при  $p \approx 10$  Па. Значение  $\beta$  при изменении давления от 0,1 до 10 Па увеличивается от 50 до  $\sim 300$  А/кВ<sup>2</sup>. Реальные значения  $U_0$  и  $\beta$  зависят также от конструкции МРС, материала мишени и вида используемого рабочего газа. Показано, что квадратичная зависимость тока от напряжения обусловлена пространственным зарядом, который ограничивает электронный ток, текущий от мишени вдоль линий магнитного поля. Электроны эффективно улавливаются магнитным полем так, что их поперечная подвижность в темном катодном пространстве определяется частотой столкновений с атомами. При обычно применяемых магнитных полях и давлениях подвижность электронов уменьшается на несколько поряд-

ков по сравнению с подвижностью при отсутствии магнитного поля и обычно меньше, чем подвижность ионов.

Наличие в МРС неоднородных скрещенных электрического и магнетронного полей не позволяет полностью описать все параметры разряда с помощью существующих теорий. В результате исследований МРС в области характерных для магнитных индукций 0,03—0,1 Тл и давлений 0,1—10 Па в [54, 55] была разработана модель, описывающая в первом приближении процессы, происходящие в МРС, на основе которой были получены аналитические выражения для ВАХ и разработана методика расчета МРС, связывающая скорость распыления с параметрами процесса (магнитной индукцией, давлением рабочего газа, напряжением на мишени, плотностью ионного тока), геометрией разрядного устройства и пространственным расположением подложек, при котором на их планарных и рельефных участках обеспечивается требуемая равномерность конденсата. Приведенные в [54, 55] выражения пригодны для приближенного расчета МРС в начальный период работы, когда мишень имеет плоскую поверхность и на ней нет ярко выраженной зоны эрозии.

Поскольку расчет рабочих параметров МРС по формулам, приведенным в [54, 55], требует знания входящих в эти формулы констант, для чего необходимы достаточно сложные эксперименты и трудоемкие вычисления, то в [57] для моделирования рабочих характеристик МРС предложено использовать методы корреляционного и регрессивного анализа. Там же приведены примеры использования этих методов для получения линейных и нелинейных (гиперболических) моделей, адекватно описывающие условия эксперимента.

Корреляционно-регрессивный анализ можно применять при исследовании МРС и при использовании их в технологии осаждения тонких пленок. Поскольку подобного рода анализ позволяет получать модели, связывающие основные характеристики МРС с важнейшим параметром — скоростью осаждения пленки, то он дает возможность сократить материальные ресурсы, а также время, необходимое для исследования и отработки технологии. Модели можно использовать на стадии создания и разработки технологии и в процессе эксплуатации оборудования в качестве алгоритмов управления процессом осаждения пленок. Пространственное распределение атомов материала распыляемой мишени при использовании источника магнетронного типа приведено в [58].

Эффективность процесса плазмообразования в МРС в 5—6 раз выше, чем в диодных РС без магнитного поля. Энергетическая эффективность процесса распыления, определяемая зависимостью КР от энергии ионов, имеет максимальное значение в диапазоне 300—500 эВ, который характерен для МРС.

Поскольку в МРС высокая эффективность процесса плазмообразования сочетается с высокой эффективностью процесса распыления, то МРС характеризуется максимальным значением энергетической эффективности по сравнению со всеми другими видами распылительных систем. Параметры МРС с возбуждением на постоянном токе [59] имеют следующие типичные значения:

Плотность плазмы, см <sup>-3</sup>	10 <sup>10</sup> —10 <sup>14</sup>
Энергия, эВ:	
первичных электронов	2—20
вторичных электронов	400—800
ионов	0,2—2
отраженных от мишени атомов рабочего газа	50—150
распыленных атомов мишени	20—100
Гиромангнитный радиус, мм:	
электрона	1—3
иона	5—50
Ширина темного катодного пространства, мм	3
Давление рабочего газа, Па	0,3—1,5
Ток разряда, А	0,25—100
Напряжение разряда, В	400—800
Плотность ионного тока, А/см <sup>2</sup>	0,1—0,2
Магнитная индукция, Тл	0,01—0,05
Диаметр мишени, м	0,005—5
Материал мишени	Металлы, сплавы, соединения
Скорость распыления, мкм/мин:	
для материала с малым коэффициентом распыления (W, Mo и др.)	0,1—0,5
для материалов с большим коэффициентом распыления (Ag, Au, Pt, Cu)	1,0—1,5*
Энергетическая эффективность по Си, кг/Дж	(3—4) · 10 <sup>-9</sup>

\* До 12 мкм/мин для Си в режиме самораспыления мишени при плотности тока 250 мА/см<sup>2</sup>.

Основными достоинствами МРС являются:

- универсальность процесса, позволяющая получать пленки металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков;
- высокая скорость осаждения (до нескольких мкм/мин) и возможность ее регулирования в широких пределах;
- сохранение соотношения основных компонентов при распылении веществ сложного состава;
- высокая чистота пленок;
- высокая адгезия пленок к подложке;
- возможность изменения структуры и свойств пленок за счет потенциала смещения на подложке, давления и состава газовой среды, одновременного распыления нескольких мишеней и других способов;
- низкая пористость пленок даже при малых толщинах;

более низкое по сравнению с обычной диодной РС радиационное и тепловое воздействие на обрабатываемую структуру;

возможность проведения процесса в реактивной среде разреженного газа, что позволяет получать пленки нитридов, карбидов, оксидов и других соединений;

способность ряда материалов при высоких плотностях тока на мишени к самораспылению;

более высокая энергетическая эффективность процесса по сравнению с обычными распылительными системами диодного и триодного типов;

способность процесса к формализации, т. е. возможность составления (на основе аналитических зависимостей технологических параметров получаемых структур от операционных параметров процесса) математического описания (алгоритма) процесса и последующего управления им с помощью ЭВМ или микропроцессора;

инверсность процесса, позволяющая использовать его для осаждения и травления широкого класса материалов;

адаптивность (жизненность) процесса, т. е. способность длительного существования в условиях непрерывного появления новых конкурентоспособных процессов;

возможность создания линий непрерывного действия, поскольку мишени обладают достаточно большим запасом распыляемого материала, а использование количественных соотношений между различными параметрами процесса позволяет автоматически управлять режимами осаждения тонких пленок.

К недостаткам МРС относятся:

сравнительно невысокий коэффициент использования материала мишени (около 25 % для плоской мишени) и необходимость для его увеличения усложнения формы мишени или конструкции магнитной системы;

сравнительно высокая неравномерность осаждаемой пленки по толщине за счет распыления материала из узкой зоны эрозии, имеющей форму кольца или эллипса в виде V-образной канавки. Углубление этой канавки по мере распыления мишени уменьшает пространственный угол распыления, вследствие чего уменьшается равномерность пленки по толщине. Повышение равномерности пленки требует планетарного или возвратнопоступательного перемещения подложек, что существенно усложняет конструкцию внутрикамерного устройства;

появление сильноточных дуг на поверхности мишени или между мишенью (катодом) и анодом вследствие структурных неоднородностей, а также наличие оксидных пленок и загрязнений на поверхности мишени, что вызывает нестабильность процесса осаждения и ухудшает качество формируемых пленок. Для устранения дуг необходимо высокое качество материала мишени, ее предварительная тренировка. Кроме того, система электропитания должна быть устойчива к сильным перегрузкам, которые могут возникать при появлении дуги;

наличие потока высокоэнергетических электронов, создающих основную температурную нагрузку на подложку (до 60%); это требует изоляции держателя подложек от корпуса установки, а также использования дополнительной диафрагмы (анода), позволяющих ограничить попадание на подложку высокоэнергетических электронов;

наличие потока отраженных нейтрализованных ионов Ar энергией до 160 эВ, требующее их термализации, когда осаждение пленок производится на тонкие изоляционные слои;

сравнительно высокое давление рабочего газа [0,3—1,5 Па], требующее его эффективной очистки для устранения загрязнения пленок посторонними газовыми включениями.

### 3.2. КОНСТРУКЦИИ КАТОДНЫХ УЗЛОВ

Основные принципы конструирования МРС, анализ способов построения катодных узлов, магнитных систем, систем электропитания, напуска и откачки газов, а также методов повышения эффективности использования материалов мишени приведены в [59].

Катодный узел — один из важнейших элементов МРС. Обычно он состоит из мишени, изготовленной из распыленного материала, и ее водоохлаждаемого держателя. При изготовлении мишени и катодного узла в целом требуется обеспечить:

высокую чистоту (99,999 %), а также высокую плотность материала мишени, а при использовании мишеней из сплавов (например, Al — Si, Al — Si — Cu и др.) точность легирования материала мишени примесями и их равномерное распределение по всему объему мишени;

эффективное охлаждение мишени, чтобы ее температура в процессе распыления не превышала 100 °С;

максимальное использование материала мишени (что особенно важно при распылении таких дорогостоящих материалов, как Pt, Au и др.).

В материале мишени недопустимы инородные включения, пустоты, трещины, неравномерное распределение легирующих примесей, поскольку в противном случае загрязняются формируемые слои, распыление поверхности мишени становится неоднородным, появляются дугообразование в процессе распыления и ряд других побочных явлений. Мишени изготавливают: холодной или горячей прокаткой металлов, литьем металлов в воздухе, вакууме или защитной атмосфере, плавкой составных элементов сплавов в заданных пропорциях в одном объеме в вакууме с последующим быстрым охлаждением, а также горячей или холодной прессовкой на воздухе, в вакууме или в защитной атмосфере.

Для получения металлических мишеней с общей чистотой 99,999 % успешно применяют метод зонной очистки, при котором зона расплава медленно перемещается вдоль заготовки, а процесс очистки многократно повторяется в одном направлении. При этом инородные включения и примеси оказываются сосредоточенными на конце слитка, который удаляют при его последующей механической обработке. Однако при изготовлении мишеней из сплавов Al — Si (1—2 %), Al — Cu (4 %), Al — Si (4 %), Cu (2 %) и других режим зонной очистки не может быть использован непосредственно, поскольку легирующая примесь должна быть равномерно распределена вдоль всей зоны расплава. В этом случае используют метод зонного впаивания многократным прохождением зоны расплава вверх и вниз слитка до тех пор, пока не будет достигнуто контролируемое распределение легирующей примеси по всему объему мишени.

В процессе распыления в результате интенсивной ионной бомбардировки мишень может разогреваться до высокой температуры (около 400 °С), что приводит к окислению ее поверхности, усилению диффузионных процессов в сплавных мишенях, может вызвать деформацию мишени и даже ее расплавление, а это снижает эффективность процесса распыления и качество формируемых пленок. Поэтому в процессе распыления необходимо эффективное охлаждение мишени.

Существует много конструктивных вариантов катодных узлов с прямым (рис. 3.4,а) и косвенным (рис. 3.4,б) охлаждением мишеней проточной водой. Непосредственный контакт проточной воды с тыльной стороной мишени обеспечивает максимальную эффективность процесса охлаждения, однако опасность прорыва воды при образовании трещины в мишени или при чрезмерном увеличении зоны эрозии существенно ограничивает применение этого способа охлаждения. Поэтому наиболее распространены конструкции с косвенным охлаждением, использующие водоохлаждаемый держатель, в котором подерживающая мишень плата является неразъемной составной частью несущей конструкции катодного узла (рис. 3.4,в). В конструкции катодного узла (рис. 3.4,г) крепление двух профилированных мишеней выполнено с помощью выемок на их боковых поверхностях, полюсных наконечников и обычного винтового соединения. Охлаждение мишени осуществляется через полюсные наконечники и водоохлаждаемый держатель. Подобного рода катодные узлы наиболее подходят для распыления мишеней из материалов с хорошей теплопроводностью, в основном Al и его сплавов, а также Ag и Cu.

Хороший тепловой контакт мишени с держателем обеспечивается припоями на основе In, Bi, Pb и Sn. Держатели изготавливают из материала с хорошей теплопроводностью (Cu, Al)

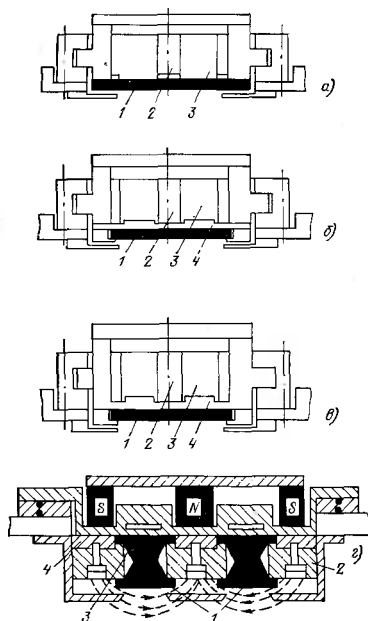


Рис. 34. Конструкция водоохлаждаемых катодных узлов с прямым (а) и косвенным (б—г) охлаждением:

1 — катод-мишень; 2 — магнитная система; 3 — канал охлаждения; 4 — держатель мишени

(нержавеющую сталь из-за плохой теплопроводности применяют значительно реже).

Помимо механического крепления мишеней с помощью винтов для этой цели в некоторых случаях используют собственную магнитную систему. При включении электромагнита (перед началом распыления) с помощью полюсных наконечников специальной формы и прижимных вставок магнитное поле прижимает мишень к поверхности держателя в центре и по периметру.



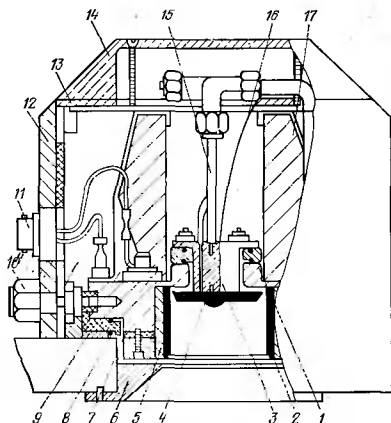


Рис. 3.5. Конструкция водоохлаждаемого катодного узла распылительной пушки:

1 — кольцевое уплотнение анода; 2 — катод-мишень; 3 — анодный узел; 4 — заземленный анод; 5 — держатель мишени; 6 — заземленный экран; 7 — катодный узел; 8 — уплотнение; 9 — изоляторы; 10 — выводы воды; 11 — высоковольтный ввод; 12 — корпус; 13 — верхнее магнитное кольцо; 14 — крышка; 15 — канал охлаждения; 16 — заземление; 17 — магнит

Катодный узел так называемой распылительной пушки (s-gun), широко используемый при индивидуальной обработке пластины, представлен на рис. 3.5. Отличительная особенность такого катодного узла — мишень цилиндрической формы. Магнитное поле внутри полого катода создает ловушку для вторичных электронов, что сводит к минимуму нагрев подложек высокоэнергетическими электронами. Катод-мишень в подобного рода распылительных пушках может иметь не только цилиндрическую, но также коническую или даже более сложную форму [59].

Применительно к установкам и линиям непрерывного действия степень совершенства катодных узлов МРС может характеризоваться обобщенным параметром — суммарным количеством энергии  $W_{эф}$ , кВт·ч, затрачиваемой на осаждение пленки толщиной 1 мкм на площадь подложкодержателя со стандартными размерами:

$$W_{эф} = PL_{ск} / (60v_{ск}h), \quad (3.4)$$

где  $P$  — мощность, приложенная к мишени;  $L_{ск}$  — длина сканирования конвейера с подложками;  $v_{ск}$  — скорость сканирования конвейера;  $h$  — толщина пленки;  $W_{эф}$  обратно пропорционально скорости осаждения и является функцией полезного выхода материала мишени (чем выше коэффициент распыления материала, тем меньше  $W_{эф}$ ).

На скорость осаждения оказывает влияние глубина эрозии мишени, а также наличие экрана для устранения вторичных электронов, уменьшающего апертуру зоны сканирования. Применительно к МРС типа inset изменение скорости эрозии мишени сравнительно невелико до тех пор, пока расход энергии не превысит 400 кВт·ч, после чего начинается ее резкое возрастание. Поэтому после того, как будет израсходовано 350 кВт·ч энергии и глубина эрозии достигнет 1/2 толщины мишени, ее рекомендуется перевернуть и вести распыление с обратной стороны. Полностью мишень МРС типа inset может наработать от 650 до 700 кВт·ч, и при этом может быть обеспечено осаждение пленки Al толщиной 1 мкм на 650 партий (комплектов) пластин площадью 300×300 мм. Путем оптимизации формы экрана и размеров его апертуры экран можно очищать одновременно со сменной мишенью. Поскольку степень загрязнения пленки посторонними газовыми примесями зависит от скорости осаждения пленки, целесообразно экранировать те области зоны распыления, в которых скорость распыления низкая, и использовать только участки, где скорость распыления высокая.

Реализация процесса металлизации ИС Al требует решения двух основных проблем: повышения экономической эффективности и снижения температуры нагрева пластин от МРС. Экономическая эффективность включает три наиболее важных критерия:

время, необходимое для завершения цикла осаждения партии пластин;

число циклов, которое может быть выполнено без замены мишени;

степень использования материала мишени.

В промышленных установках и линиях конвейерного типа наибольшее распространение получила МРС с плоской мишенью без экрана (рис. 3.6,а), с фасонной мишенью, снабженной экраном (рис. 3.6,б), а также с мишенью Л-образной формы (рис. 3.6,в). Сопоставление этих конструкций МРС по трем параметрам: энергии  $W$ , кВт·ч, затрачиваемой на осаждение пленки толщиной 1 мкм; средней скорости осаждения пленки  $v_{ос}$ , мкм/мин, и времени  $t$ , мин, необходимого для получения пленки толщиной 1 мкм на площади 300×300 м, приведено в табл. 3.1 [23].

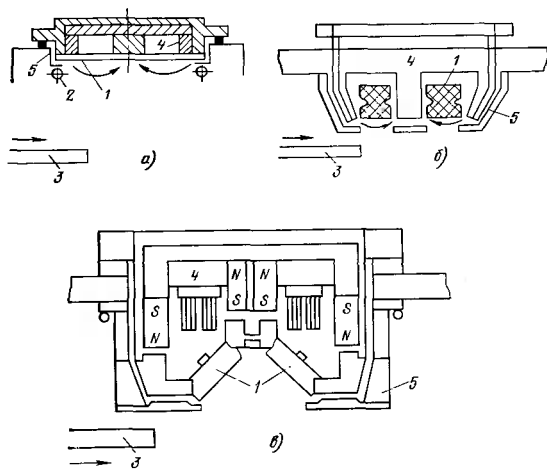


Рис. 3.6. Конструкции катодных узлов МРС-типа:

а — planar, б — inset; в — focest; 1 — мишень; 2 — анод; 3 — пластина; 4 — магнитная система; 5 — экран

МРС с фокусированным потоком атомов расплывенного материала focest состоит из четырех мишеней, расположенных под углом друг к другу внутри опорной конструкции (рамы). Наклон мишеней обеспечивает эффективный захват вторичных электронов, и поэтому лишь незначительная их часть проникает к подложке, нагревая ее. Зона осаждения у focest составляет  $325 \times 70$  мм, что значительно меньше, чем у inset ( $150 \times 400$  мм). Однако при одной и той же плотности мощности скорость осаж-

Таблица 31. Параметры процесса расплывения для различных мишеней

Материал мишени	Плоская мишень без экрана			Фасонная мишень с экраном			Л-образная мишень с экраном		
	W	$v_{oc}$	t	W	$v_{oc}$	t	W	$v_{oc}$	t
Al	0,85	0,58	5,1	1,0	0,50	6,0	0,56	1,6	3,4
Cu	0,46	1,10	2,7	0,54	0,93	3,2	0,30	2,9	1,8
Au	0,43	1,15	2,6	0,51	0,98	3,1	0,28	3,0	1,7

Таблица 3.2. Скорость подъема температуры за 1 мин при использовании различных видов МРС

Подложка		Температура, °С		
Материал	Толщина, мкм	planar	inset	focest
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	250	1150	77	308
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	625	450	30	120
Si	500	1230	82	328
SiO <sub>2</sub>	625	870	58	232

дения у focest в 2 раза больше, чем у inset, а поэтому пленки, получаемые с помощью этой МРС, имеют меньшее количество посторонних газовых включений, правда, они подвергаются более сильному нагреву от МРС. При распылении алюминия плотность мощности теплового потока к подложке в зависимости от типа МРС составляет: для системы planar 2,1, для inset 0,14; для focest 0,56 Вт/см<sup>2</sup>. Скорость подъема температуры, помимо конструкции МРС, зависит от материала подложки и его толщины (табл. 3.2).

### 3.3. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

При проектировании магнитной системы к ней предъявляются следующие основные требования:

формирование вблизи катода одной или нескольких замкнутых пространственных конфигураций магнитного поля определенной формы (круг, овал) с обеспечением требуемой магнитной индукции 0,02—0,1 Тл;

стабильность магнитной индукции в условиях длительной эксплуатации и температурного воздействия;

коррозионная стойкость материала магнита и конструктивных материалов системы в целом при интенсивном водоохлаждении.

Обычно магнитная система состоит из магнита, создающего поле с требуемой индукцией, и полюсных наконечников, непосредственно примыкающих к мишени и обеспечивающих формирование требуемой (оптимальной для данной конструкции МРС) конфигурации магнитного поля. В качестве источников магнитного поля чаще всего применяются постоянные магниты на основе бариево-стронциевых ферритов, сплавов альнико и сплавов кобальта с редкоземельными элементами. Все эти материалы обладают достаточно высокой коэрцитивной силой и остаточной индукцией и могут длительно сохранять эти параметры в нормальных условиях распыления, ферритовые маг-

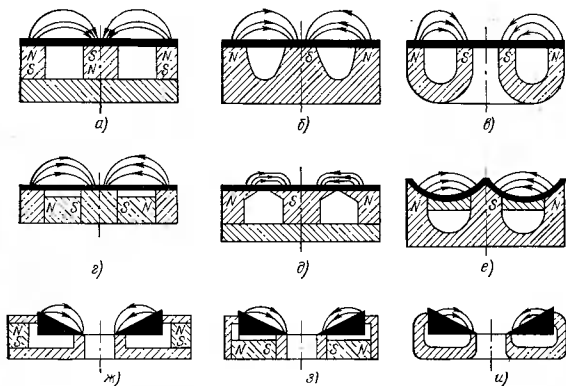


Рис. 3.7. Конструкционные варианты магнитных систем

ниты не подвержены коррозии, что позволяет располагать их внутри водоохлаждаемого катодного узла.

Наиболее простой является магнитная система, состоящая из наборных магнитных блоков, перекрытых общим полюсным наконечником (рис. 3.7,а). Система на основе магнита сложной формы (рис. 3.7,б) позволяет более эффективно сконцентрировать магнитное поле и снизить потери. Однако предпочтительна система с магнитами подковообразной формы (рис. 3.7,в). Систему можно сделать более компактной, применив кольцевые магниты с радиальным намагничиванием (рис. 3.7,г), однако изготовление таких магнитов достаточно сложно. Кроме того, в подобной системе имеет место значительное рассеяние магнитного поля снизу катодного узла. Для создания в прикатодной области сильного магнитного поля, силовые линии которого почти параллельны распыляемой мишени (что необходимо для более равномерного распыления зоны эрозии), наиболее подходит магнитная система с полюсными наконечниками специальной формы (рис. 3.7,д). Однако при этом магнитная индукция резко снижается с увеличением расстояния, поэтому эффективное распыление может быть достигнуто только в том случае, если мишени имеют малую толщину. Если необходимо распылять толстые мишени, то не следует сильно увеличивать площадь полюсных наконечников. Максимальная локализация плазмы характерна для системы с мишенью вогну-

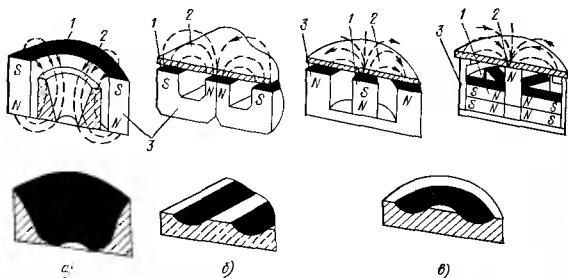


Рис. 3.8. Конструкционные варианты базовых магнитных систем с кольцевым (а), прямоугольным (б), центральным и секционированным (в) магнитами и соответствующие им зоны эрозии:

1 — катод-мишень; 2 — магнитные силовые линии; 3 — магниты

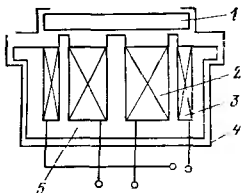
той формы (рис. 3.7,е). Несмотря на некоторую сложность изготовления, эта система считается одной из самых эффективных. Для МРС с конической мишенью вполне пригодна достаточно простая магнитная система с вертикальными (рис. 3.7,ж) или радиальными (рис. 3.7,з) магнитами. Значительно более эффективна система, в которой практически устранено рассеяние магнитного поля (рис. 3.7,и). Однако для нее требуется магнит специальной формы.

В базовых конструкциях для так называемых распылительных пушек наиболее широкое распространение получили системы с кольцевым магнитом (рис. 3.8,а), а также с магнитом прямоугольной формы (рис. 3.8,б) в высокопроизводительных установках непрерывного действия для металлизации интегральных схем. В планарных МРС с круглой мишенью применяются системы с центральным и секционированным магнитами (рис. 3.8,в).

Форму и геометрические размеры полюсных наконечников (определяющие конфигурацию магнитного поля над поверхностью мишени) выбирают в зависимости от требуемой геометрии зоны эрозии мишени и применяемого магнитного материала. Полюсные наконечники чаще всего изготавливают из мягкого железа или холодноплавленной стали. В идеальном варианте силовые линии магнитного поля должны входить и выходить по нормали к поверхности мишени для устранения распыления ее краев и обеспечения максимального поперечного компонента поля в этой области.

Рис. 3.9. Электромагнитная система с двумя соосными катушками:

1 — мишень; 2 — обмотка внутренней катушки; 3 — обмотка внешней катушки; 4 — корпус катады; 5 — сердечник



Помимо постоянных магнитов применяют (правда, значительно реже) электромагниты, которые позволяют оперативно изменять магнитную индукцию и форму поля за счет электрических параметров системы его возбуждения. Это существенно расширяет технологические возможности МРС, делает их более гибкими и обеспечивает возможность проводить процесс распыления в оптимальных режимах.

Все более широкое применение находят установки для индивидуальной (поштучной) металлизации пластины, когда пленка осаждается при фиксированном положении МРС и подложкодержателя с пластиной. При этом трудно получить воспроизводимость пленки по толщине, при большом диаметре пластины (более 100 мм), в течение длительного времени работы установки. Дело в том, что в зоне эрозии мишени образуется V-образная канавка, которая углубляется по мере распыления мишени, в результате чего пространственный угол распыления материала уменьшается и распределение пленки по толщине нарушается.

Обеспечение равномерности пленки по толщине важно не только в отношении свойств самой пленки, но и увеличения срока службы мишени. Образование V-образной канавки в зоне эрозии и ее углубление быстро выводит мишень из строя. Поэтому диаметр зоны эрозии и расстояние мишень — подложка выбирают, идя на компромисс между сроком службы мишени, скоростью осаждения и равномерностью толщины пленки.

Чтобы неравномерность осаждения пленки не превышала  $\pm 5\%$ , была предложена оригинальная конструкция магнитной системы (рис. 3.9) [60], в которой магнитное поле у поверхности мишени создается с помощью двух электромагнитных катушек (наружной и внутренней), намотанных на сердечник соосно. Подобного рода магнитная система упрощает управление диаметром кольца тлеющего разряда. Диаметр кольца регулируется для получения оптимальной равномерности в зависимости от глубины зоны эрозии мишени путем изменения циклически (10 раз и более в процессе осаждения пленки на одну пластину) с целью предотвращения образования на мишени узкой V-образной зоны эрозии. Циклическое изменение диаметра кольца тлеющего разряда предпочтительно, поскольку при этом обеспечивается формирование широкой зоны эрозии и сохраня-

ется большой пространственный угол распыления материала мишени, в результате чего может быть обеспечено осаждение пленки Al толщиной до 2 мкм, у которой неравномерность не превышает  $\pm 5\%$  по всей площади пластины диаметром 125 мм.

Применение электромагнитов позволяет:

при большей ширине зазора получить значительно большие по сравнению с постоянными магнитами значения магнитной индукции и плавно ее регулировать для обеспечения оптимальных условий при распылении мишеней из различных материалов;

устранить процесс «старения», свойственный постоянным магнитам, который может изменять параметры процесса распыления.

Наряду с достоинствами применение электромагнитов имеет следующие недостатки:

необходимость дополнительного высокопоточного источника для питания обмоток электромагнита;

высокие требования к надежности электрической изоляции электромагнита, усложняющие конструкцию катодного узла;

дополнительный нагрев мишени тепловым потоком от обмоток электромагнита;

высокие удельная масса и объем электромагнита на единицу магнитной индукции по сравнению с постоянным магнитом.

Поэтому в промышленных установках для осаждения пленок с помощью МРС предпочитают использовать постоянные магниты.

Основные параметры постоянных магнитов приведены в табл. 3.3. В настоящее время наибольшее распространение получили три типа магнитов: ферритовые, на основе редкоземельных элементов и на основе металлических сплавов. К достоинствам ферритовых магнитов относятся их низкая стоимость и высокая коэрцитивная сила, а к недостаткам — температурная нестабильность параметров, сравнительно невысокая максимальная магнитная энергия и наличие остаточной намагниченности, хотя по этим параметрам они приблизились к теоретическому пределу.

Магниты на основе редкоземельных элементов сочетают высокие значения напряженности магнитного поля и остаточной намагниченности, но при этом имеют значительно большую стоимость. Остаточная намагниченность  $\text{Sm} - \text{Co}$ -магнитов практически достигла теоретических пределов. Дальнейшее улучшение этих параметров стало возможным благодаря разработке новых магнитных материалов на основе Nd, который к тому же дешевле Sm.

Широкое распространение получили магниты на основе сплава альнико, который легко поддается машинной обработ-



Таблица 3.3. Основные параметры постоянных магнитов

Тип магнита, состояние производства	Напряженность магнитного поля $H$ , кА/м	Остаточная намагниченность $B$ , Тл	$(HB)_{\max}$ , Тл кА/м	Температура Кюри, °С	Температурный коэффициент остаточной намагниченности, %/°С
Ферритовые сериные	220—330 (1300)	0,35—0,4 (0,48)	28—36 (45)	450	0,19
На основе редкоземельных элементов:					
SmCo <sub>5</sub> сериные	700 (24 000)	1,0 (1,1)	210 (240)	725	0,03—0,05
экспериментальные	3200	1,0	200	—	—
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub> сериные	560 (5600)	1,0 (1,4)	200 (3,90)	900	0,03
Fe—Pr—B—Si экспериментальные	520	1,1	240	—	—
Nd—Fe—B—Co—Al экспериментальные	880	—	96	780	—
Nd—Fe—B экспериментальные	880	1,3	330	500	0,071
Al—Ni—Co сериные	1300	—	290—360	300	—
экспериментальные	1400	—	360	312	0,142
На основе металлических сплавов:					
Al—Ni—Co сериные литые	56—150	0,7—1,3	40—80	860	0,012
» спеченные	48—140	0,8—1,1	32—44	—	—
Mn—Al экспериментальные	200—240 (3200)	0,5—0,6 (0,7)	40—56 (96)	300	0,12
Fe—Co—Cr экспериментальные	1000 (1200)	1,3 (1,6)	64 (380)	672	—

Примечание: в скобках—теоретически достижимые значения.

ке. В то же время высокая стоимость Co заставляет искать более дешевые металлические сплавы (например, на основе Mn и Al), близкие по своим свойствам к альнику.

#### 3.4. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Система электропитания (СЭ) должна обеспечивать: возможность использования достаточно больших мощностей (от 2 до 20 кВт); возможность плавного регулирования напряжения (от 0 до 1 кВт);

работу в режиме стабилизации мощности и стабилизации разрядного тока;

устойчивость к возникновению генерируемых плазмой колебаний напряжения (до нескольких кВ/вольт), а также колебаний тока, возникающих вследствие образования сильноточных дуг на поверхности распыляемой мишени;

надежное управление в ручном и автоматическом режимах с помощью блока, обеспечивающего согласование входных цепей системы электропитания с микропроцессорным или программным устройством.

Обычно СЭ содержит управляемый кремниевый выпрямитель, цепи обратной связи, обеспечивающие стабилизацию тока разряда, устройства защиты, контроля и управления, с помощью которых контролируется температура мишени (или температура охлаждающей воды на выходе), а также выходное напряжение, ток или расход жидкости, подводимой к МРС. При использовании электромагнитов СЭ содержит дополнительный сильноточный источник питания.

Важным и трудновыполнимым требованием к СЭ является устойчивость источников питания к сильным перегрузкам, которые могут возникать в результате появления сильноточных дуг на поверхности мишени-катода или между катодом и анодом. Дуги на поверхности мишени могут возникнуть вследствие неоднородности материала мишени, скопления заряда на локальных изолированных участках поверхности мишени, а также из-за наличия значительного ВЧ-компонента в зоне плотной плазмы. Дугообразование чаще всего наблюдается в новых мишенях из легкоплавких металлов, например Al. Оно имеет место также после длительного контакта мишени с влажным атмосферным воздухом при разгерметизации рабочей камеры при смене обрабатываемых пластин. Возникновение дуги может быть вызвано и структурными неоднородностями мишени: пустотами, диэлектрическими включениями и частицами, попадающими на мишень с анода, обрабатываемых пластин или внутрикамерной технологической оснастки. Наличие оксидных пленок на поверхности мишени, например  $Al_2O_3$ , вызывает появление положительного заряда на этих участках, резкого локального увеличения напряженности электрического поля, пробоя и возникновения дуги. Появление же дуги крайне нежелательно, поскольку она ухудшает качество формируемых пленок, загрязняет их, вносит дефекты в результате присутствия капельной фазы в потоке распыляемых атомов металла, вызывает локальный перегрев подложек и нестабильности процесса осаждения пленки.

Для защиты СЭ от токовых перегрузок, возникающих при дугообразованиях, применяют тренировку мишени в течение

нескольких часов для очистки ее поверхности, что позволяет существенно уменьшить вероятность дугообразования во время рабочего цикла.

Для питания встраиваемых в существующие вакуумные установки малогабаритных МРС, где требуются ток 4—6 А и напряжение 500—700 В, вполне пригодна простейшая бестрансформаторная схема с удвоением выпрямленного напряжения. В схеме имеются две емкости по 2000 мФ, набранные из конденсаторов К50—ЭФ. Регулировка напряжения осуществляется автотрансформатором ЛАТР-2. Как показали эксперименты, пульсация выпрямленного напряжения не оказывает существенного влияния на качество получаемых металлических пленок [62].

Система электропитания — один из основных и важнейших элементов любой МРС, поэтому от стабильности и надежности ее работы в значительной мере зависит эффективность процесса распыления.

Потребляемая МРС мощность обычно составляет от 1 до 20 кВт. Рабочее напряжение МРС лежит в диапазоне 0,4—0,7 кВ, поэтому увеличение мощности происходит в основном за счет увеличения тока. В МРС, потребляющих большую мощность, резко обостряется проблема предотвращения дугообразования между катодом и анодом, а также на поверхности мишени, поскольку такие вредные последствия, как ухудшение качества формируемых пленок в результате появления капельной фазы в потоке осаждаемого материала, нестабильность процесса осаждения, перегрев подложек, здесь значительно выше, чем в МРС малой мощности. Кроме того, максимальная плотность тока в МРС 30—50 мА/см<sup>2</sup> лимитируется условиями стабильной работы на заданном участке ВАХ, а также обеспечением надежного теплоотвода от катодного узла МРС. Рост производительности МРС требует увеличения площади мишени или же одновременного распыления материала из 2—3 мишеней сравнительно небольших размеров. При этом возрастает суммарное количество различных дефектов (нородности включения, трещины, пустоты, неравномерное распределение примесей в материале мишеней и др.), что увеличивает вероятность дугообразования и локализации разряда. Поэтому создание МРС большой мощности требует разработки устройств, обладающих высокой стабильностью и надежностью.

В широко используемых системах питания на основе управляемых выпрямителей реализуется режим стабилизации тока или мощности разряда путем применения цепей обратной связи и фазовым регулированием угла отпирания тиристоров. При этом быстродействующие системы ограничено частотой питающей сети и инерционностью цепей управления. Если в процессе экс-

платации МРС в результате появления плазменной дуги резко уменьшается сопротивление разрядного промежутка, то одновременно в первый момент возрастает ток управляемого выпрямителя (до момента срабатывания системы управления), что вызывает перегрузку источника питания и снижает стабильность технологического процесса. Более того, в режиме стабилизации мощности разряда при образовании дуги и снижении напряжения система управления реагирует немедленным увеличением силы тока, в результате чего еще более усугубляется вредное воздействие локализации разряда на процесс осаждения пленки.

В последнее время наряду с авторегуляторами начинают применять индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП), принцип работы которых основан на явлении резонанса в электрических цепях. ИЕП обладают высокой надежностью, экономичностью, простотой изготовления, наладки и обслуживания. Выходной ток ИЕП не зависит от сопротивления нагрузки, при дугообразовании он не изменяет своего значения, а поэтому мощность, выделяющаяся с МРС, снижается; одновременно снижается и вероятность локализации разряда от перегрева, появления капельной фазы и других явлений, что вызывает самоликвидацию плазменной дуги. Это позволяет применять ИЕП без каких-либо дополнительных мер защиты для тренировки новых катодных узлов МРС с целью очистки поверхности перед распылением для снижения вероятности дугообразования во время основного технологического цикла. Если же технологический цикл не допускает даже кратковременной локализации разряда, источники питания на базе ИЕП могут быть дополнительно снабжены быстродействующей эффективной защитой, основанной на закорачивании выходных цепей источника питания при понижении напряжения разряда до предельно допустимого. В этом случае быстродействие системы защиты определяется в основном временем срабатывания тиристорных коммутаторов. После промежутка времени, необходимого для выявления причин, вызывающих дугообразование, тиристорные ключи размыкаются, обеспечивая работу в номинальном режиме [63].

С целью компенсации потерь скорости осаждения материала по мере выработки мишени и образования глубокой зоны эрозии в ряде случаев применяют режим поддержания постоянной мощности разряда. Поскольку по мере углубления зоны эрозии возрастает магнитная индукция и одновременно снижается напряжение разряда, то для стабилизации мощности возникает необходимость в увеличении тока, что вызывает дополнительный разогрев мишени и повышает вероятность появления капельной фазы в потоке распыляемого материала. В связи с этим вопрос о целесообразности применения режима по-

стоякства мощности разряда должен решаться отдельно в каждом конкретном случае с учетом специфики распыления того или иного материала. Поскольку процесс эрозии идет достаточно медленно, то потеря в скорости осаждения становится заметной лишь после нескольких десятков часов непрерывного распыления мишени, поэтому нет необходимости в создании быстродействующих систем стабилизации мощности, и применительно к ИЕП эта задача может быть решена путем дискретного или же плавного регулирования величины выходного тока. Источники питания на основе ИЕП допускают параллельную работу на общую нагрузку, что позволяет регулировать ток в МРС и более рационально использовать оборудование, особенно в том случае, когда необходимо одновременное электропитание нескольких МРС.

### 3.5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛА МИШЕНИ

Существенным недостатком МРС является низкое использование материала мишени (ИММ), поскольку его интенсивное распыление происходит только на участке, находящемся непосредственно под областью плазмы, при этом обычно форма зоны эрозии мишени повторяет форму разряда (кольцо, эллипс и т. п.). Скорость распыления максимальна вдоль оси зоны разряда и убывает к ее периферии.

В МРС при питании постоянным током чаще всего применяются режим со стабилизацией тока разряда. При этом напряжение разряда зависит не только от материала мишени, магнитной индукции, давления и вида рабочего газа, но также и от формы зоны эрозии. Наибольшее распространение в промышленном производстве получили планарные МРС, у которых форма зоны эрозии в процессе распыления мишени постоянно изменяется (рис. 3.10), при этом по мере углубления канавки резко возрастает вероятность бомбардировки ее стенок частицами распыленного материала, что вызывает изменение скорости распыления и углового распределения распыляемого материала. При увеличении зоны эрозии магнитная индукция возрастает, но одновременно снижаются напряжение разряда и эффективность ИММ, которая обычно для плоской мишени не превышает 25 %, поскольку ширина зоны эрозии составляет 10—40 мм. Глубина зоны эрозии в процессе распыления увеличивается значительно быстрее, чем ширина, до тех пор, пока в центре зоны мишень не уменьшится по толщине на 70—80 %, после чего скорость распыления резко снижается и мишень становится уже непригодной для дальнейшей эксплуатации. При этом эффективность ИММ не превышает 40 %.

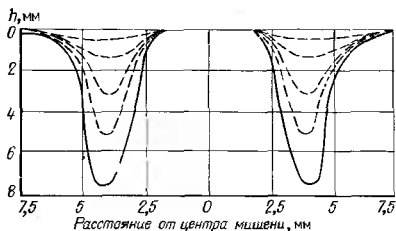


Рис. 3.10. Изменение глубины зоны эрозии планарного магнетрона с круглой мишенью в процессе ее распыления

Широкое применение МРС в технологии ИС, и в первую очередь для металлизации, требует решения проблемы повышения эффективности ИММ по следующим причинам:

высокая стоимость материала и изготовления мишени;

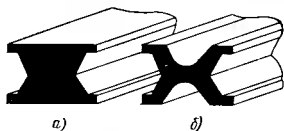
снижение производительности труда, когда требуется частая смена мишени;

низкое ИММ, которое для планарных магнетронов не превышает 20—30 %, в то время, как для диодных распылительных систем он составляет 38—43 %.

Самый распространенный способ повышения эффективности ИММ (примерно в 2 раза) — это изготовление мишени с профилированной поверхностью. Иногда для этой цели толщину мишени специально увеличивают вдоль осевой линии зоны разряда.

Фирма MRC (США) разработала, запатентовала и широко применяет в серийных МРС базовую конструкцию профилированной мишени типа inset (вставная мишень повышенной эффективности), предназначенную для металлизации МОП (металл—оксид—полупроводник) приборов и СБИС Al и его сплавами с Si и Cu, драгоценными металлами и другими материалами (Ti, Cu, Ni+7 % V, Cr и т. д.). Мишень выполняется в виде профилированного специальным образом бруска (рис. 3.11), в котором одна или две плоские поверхности, предназначенные для распыления, располагаются непосредственно под зоной плазмы. Бокковые поверхности мишени, не подвергающиеся распылению, имеют глубокую выемку по всей длине бруска, что упрощает операцию установки и смены мишени. Подобного рода профилированная мишень позволяет экономить значительное количество распыляемого материала еще на стадии изготовления мишени и повышает коэффициент ИММ до 50 %.

Рис. 3.11. Базовая конструкция профилированной мишени типа inset до распыления (а) и после двустороннего распыления (б)



Мишени типа inset выпускаются в виде трех модификаций. Помимо изображенной на рис. 3.11 мишени с X-образной зоной эрозии выпускаются мишени с  $\epsilon$ - и  $\mu$ -образными зонами эрозии. Мишени с  $\epsilon$ -образной зоной эрозии предназначены для распыления дорогостоящих материалов (Au, Ag, Pt, Pd и др.). Мишени с  $\mu$ -образной зоной эрозии наиболее пригодны для распыления материалов с плохой теплопроводностью (Ti, Cr, Ni+7% V и др.).

Второй способ повышения эффективности ИММ основан на изменении конфигурации магнитного поля с помощью магнитной системы специальной формы, в результате чего существенно увеличивается площадь мишени в зоне интенсивного распыления. Типичным примером реализации этого способа является секционированная магнитная система, полюсные наконечники специальной формы которой создают магнитное поле в виде дорожки большой протяженности (рис. 3.12). При этом зона разряда покрывает значительную часть  $\Delta$ -образной поверхности мишени, обеспечивая формирование зоны эрозии в виде изогнутой ленты.

Для повышения эффективности использования материала мишени могут применяться движущиеся относительно поверхности мишени магнитные поля, создаваемые постоянными или электрическими магнитами. Получение такого профиля, при котором зона распыления охватывает большую часть поверхности мишени, возможно несколькими способами: смещением поля постоянного магнита путем на-

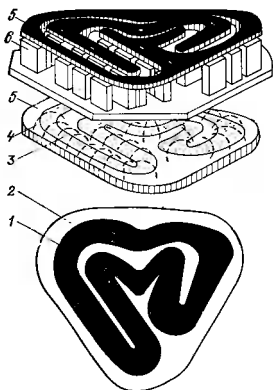


Рис. 3.12. Базовая конструкция мишени  $\Delta$ -образной формы с секционированным магнитным полем:

- 1 — зона эрозии мишени; 2 — мишень; 3 — зона плазмы; 4 — силовые линии магнитного поля; 5 — полюсные наконечники; 6 — магниты

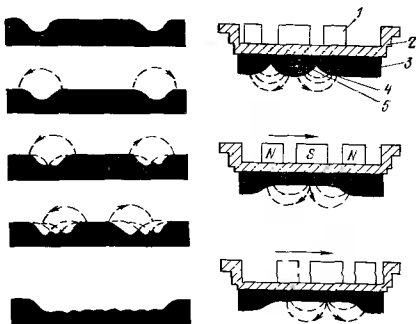


Рис. 3.13. Последовательность расширения зоны эрозии мишени с помощью подвижной магнитной системы:

1 — магнитная система; 2 — держатель мишени; 3 — катод-мишень; 4 — линии магнитного поля; 5 — зона эрозии

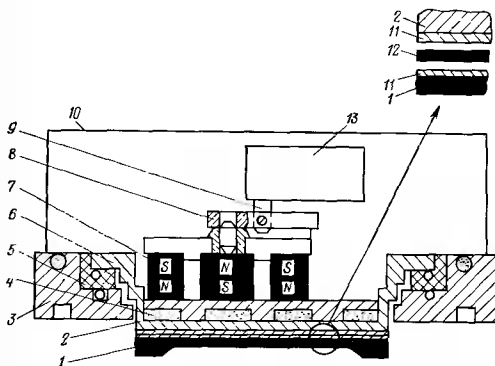


Рис. 3.14. Базовая конструкция MPC типа orbitorr:

1 — мишень; 2 — держатель мишени; 3 — анод; 4 — канал охлаждения; 5 — кольцевые уплотнения; 6 — фланец; 7 — магнит; 8 — эксцентрик; 9 — привод; 10 — крышка; 11 — металлизация обратной стороны мишени; 12 — легкоплавкий металл; 13 — электродвигатель



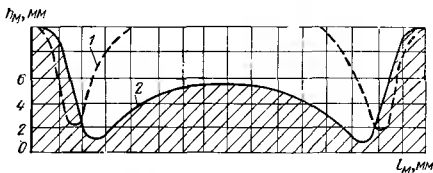


Рис. 3.15. Зона эрозии обычного планарного магнетрона (1) и магнетрона типа orbitorr (2)

ложения дополнительного электрического поля, перемещением мишени относительно магнитной системы или перемещением магнитной системы относительно неподвижной мишени (рис. 3.13).

В конструкции МРС типа orbitorr фирмы Sloan (США) (рис. 3.14) трехсекционная система с постоянными магнитами может перемещаться вдоль обратной стороны мишени по лентообразной траектории и формировать магнитное поле и зону разряда над двумя участками ее поверхности, в результате чего 80 % площади мишени покрыто зоной эрозии и эффективность ИММ достигает 60 %. Если при распылении плоской мишени в обычной МРС зона эрозии имеет вид глубоких узких канавок (рис. 3.15, 1), то в МРС типа orbitorr обеспечивается распыление всей центральной части мишени (рис. 3.15, 2), что помимо повышения коэффициента ИММ улучшает однородность толщины формируемых пленок по поверхности подложки и позволяет покрывать «ступеньки» на рельефных подложках.

### 3.6. РАСПЫЛЕНИЕ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Как видно из табл. 3.1, скорости осаждения материалов в МРС достигают 1,5 мкм/мин, однако, как показано в [64], эти скорости отнюдь не предел, поскольку они ограничены не возможностями самой системы, а критической удельной мощностью, которую выдерживает материал мишени без расплавления.

Для материала в твердом состоянии максимально допустимая удельная мощность, а следовательно, и скорость распыления ограничиваются его теплопроводностью. Для большинства металлов при нагреве теплопроводность постепенно снижается и при переходе из твердого состояния в жидкую фазу ее суммарное увеличение обычно не превышает пятикратного значения. В расплавленном состоянии к мишени можно подводить большие мощности, увеличивая тем самым скорость генерации

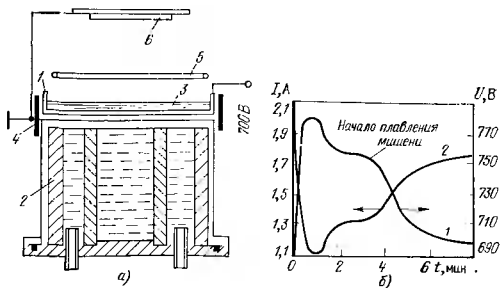


Рис. 3.16. Распыление из жидкой фазы:

*a* — схема устройства; *б* — изменение напряжения разряда (1) и разрядного тока (2) во времени

вещества и повышая температуру расплава до такого значения, при котором наряду с распылением начинается интенсивный процесс испарения. В связи с изложенным представляется целесообразным применять тепловую энергию (которая в настоящее время затрачивается на нагрев воды) на генерацию вещества путем его испарения и таким образом объединить процесс распыления и испарения в единый распылительно-испарительный процесс.

Распыление из жидкой фазы производили с помощью МРС, изображенной на рис. 3.16. Непосредственно под тиглем 1, изготовленным из немагнитного материала, располагали водоохлаждаемую магнитную систему 2, между корпусом которой и тиглем 1 был сделан зазор, ограничивающий отвод тепла от тигля в процессе его разогрева. В тигель помещали диски 3 из Си или Al, выполняющие роль мишени. Снижение лучистого теплоотвода от тигля обеспечивалось радиационным экраном 4. Анод 5 в виде охлаждаемой медной трубки располагали на расстоянии 25 мм над тиглем. При давлении аргона  $p = 0,5$  Па и  $U_p = 700$  В загорался разряд, локализованный магнитным полем у поверхности мишени. При этом в течение 5—10 мин материал мишени переходил в жидкое состояние, свечение разряда становилось более интенсивным, ток разряда возрастал, а напряжение на разрядном промежутке из-за ограниченной мощности источника питания снижалось (рис. 3.16, б). Характерно, что если при холодной мишени разряд гаснет при  $p < 0,1$  Па, то при распылении из жидкой фазы разряд устойчиво горит даже при  $p \approx 10^{-2}$  Па, что может быть объяснено самораспылением мишени под воздействием на нее интенсив-

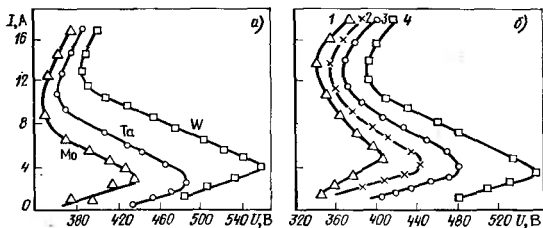


Рис. 3.17. Вольт-амперные характеристики разряда для мишеней из различных материалов при  $p=3 \cdot 10^{-2}$  Па (а) и для вольфрамовой мишени (б) при различных давлениях Ag (1— $7 \cdot 10^{-1}$ ; 2— $1 \cdot 10^{-1}$ ; 3— $7 \cdot 10^{-2}$ ; 4— $3 \cdot 10^{-2}$  Па)

ного потока ионов распыленного металла [64] и сравнительно высоким давлением пара распыляемого материала (которое для Си при температуре плавления составляет  $5 \cdot 10^{-2}$  Па). Когда давление пара становится достаточно большим и процесс ионизации паров достаточно интенсивным, чтобы поддерживать горение разряда, напуск Ag можно вообще прекратить, что существенно снижает процесс загрязнения пленки активными газами, обычно содержащимися в Ag.

Для получения пленок тугоплавких металлов нет необходимости проводить процесс из жидкой фазы. При температуре мишени, превышающей некоторую критическую (около  $0,7T_{пл}$ ), должен наблюдаться экспоненциальный рост коэффициента распыления. Кроме того, при разогреве мишени возникает термоэлектронная эмиссия, что приводит к увеличению степени ионизации плазмы и уменьшению сопротивления разрядного промежутка, в результате чего ВАХ приобретают S-образную форму (рис. 3.17). При этом скорость осаждения пленок W, Mo и Ta на подложку, находящуюся на расстоянии 15 см от мишени, составляла 0,3—0,5 мкм/мин. Как показали эксперименты, скорость генерации (а следовательно, и осаждения) вещества из жидкой фазы выше, чем из водоохлаждаемой мишени. Так, при мощности источника питания 1,5 кВт, плотности мощности на мишени  $40 \text{ Вт/см}^2$ , плотности ионного тока  $70 \text{ мА/см}^2$  и расстоянии от мишени до подложки 5 см скорость осаждения Си составляла от 4 до 5 мкм/мин, т. е. примерно в 2 раза превышала скорость осаждения, характерную для водоохлаждаемой медной мишени. Подача на подложкодержатель отрицательного смещения  $U_{см} = -100 \text{ В}$  вызывает ионный ток к подложке около 25% разрядного тока, что позволяет улучшить адгезию и другие свойства пленок.

Достигнутая скорость осаждения  $\text{Cu}$  5 мкм/мин отнюдь не является пределом, поскольку она была ограничена мощностью источника питания 1,5 кВт. Для поверхностного испарителя (которым в данном случае является мишень) имеет место резко выраженная зависимость скорости испарения от температуры, а следовательно, и от подводимой мощности. Это говорит о том, что скорость протекания процесса может на порядок превышать скорости распыления, характерные для МРС. При этом на подложку будет поступать поток распыленных и испаренных атомов, а также поток ионов, энергия которых может регулироваться потенциалом смещения на подложкодержателе. Помимо высокой скорости осаждения основное достоинство распыления из жидкой фазы — слабо выраженная тенденция к фракционированию при осаждении сплавов и высокая адгезия пленок к подложке.

### 3.7. СИСТЕМЫ РАСПЫЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитные пленки на основе пермаллоя широко используются при изготовлении ЗУ на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД). Пермаллоевые пленки должны иметь высокие магнитное сопротивление и удельную электропроводность, обладать малыми магнитострикцией и коэрцитивной силой. Они должны иметь хорошую адгезию к подложке, гладкую поверхность, в них должны отсутствовать остаточные механические напряжения и проколы, пленки должны хорошо покрывать «ступеньки» и обеспечивать высокую равномерность по толщине, которая определяет однородность магнитных полей в ЗУ. Для того чтобы правильно ориентировать ЦМД и иметь близкую к нулю магнитострикцию, необходимо в процессе нанесения магнитных пленок поддерживать определенное и равномерное в плоскости магнитное поле.

На начальном этапе развития МРС считалось, что из-за шунтирования магнитного потока материалом мишени эффективное распыление магнитных материалов с помощью МРС невозможно. Однако исследования последних лет показали, что МРС могут успешно использоваться для осаждения пленок магнитных материалов в том случае, если материал мишени нагреть до температуры, которая на 10—15 °С превышает температуру точки Кюри. При этом материал мишени полностью теряет свои магнитные свойства и процесс распыления, по существу, не отличается от распыления мишени из обычного немагнитного материала, в то время как осажденный слой материала после осаждения вновь приобретает свойства магнитного материала до его нагрева. Нагревать мишень можно как от внешних источников тепла (лучистый, резистивный), так и в плазме газового разряда. Однако метод распыления мишеней,

нагретых до температуры выше точки Кюри, пригоден для нанесения пленок на подложки, не критичные к нагреву и обладающие хорошей теплопроводностью. Кроме того, тепловое излучение нагретой мишени вызывает интенсивное газовыделение с деталей внутрикамерной оснастки, что приводит к загрязнению пленок, в связи с чем этот метод распыления магнитных материалов широкого распространения не получил.

При распылении в МРС мишеней из магнитных материалов с температурой ниже точки Кюри для уменьшения шунтирующего действия магнитного материала на магнитное поле МРС можно уменьшить толщину слоя материала мишени, применяя держатель из немагнитного материала, покрытый тонким слоем ( $< 1$  мм) распыляемого магнитного материала. Однако подобного рода мишени сложны в изготовлении, имеют очень малый запас распыляемого материала и поэтому не нашли широкого промышленного применения.

Для того чтобы обеспечить эффективное распыление мишеней из магнитного материала толщиной до 10 мм, используют МРС с комбинированной магнитной системой. Для увеличения магнитного потока под мишенью по оси основного магнитного блока размещают центральный магнит и дополнительный магнитный блок, имеющий наклонный вектор намагниченности (рис. 3.18,а). Подобного рода мощные магнитные системы насыщают материал мишеней из магнитного материала магнитным потоком и создают магнитное поле необходимой индукции (до 0,06 Тл) для поддержания разряда над распыляемой поверхностью. Однако встраивание дополнительно магнитного поля существенно усложняет конструкцию МРС и систему охлаждения, не позволяя распылять мишени толщиной более 10 мм [65].

Для повышения эффективности распыления мишеней с большим запасом магнитного материала создают более мощное магнитное поле над их распыляемой поверхностью за счет уменьшения шунтирующего действия материала мишени на магнитный поток. Для этого в зоне эрозии мишени выполняют сквозные прорезы (щели), перпендикулярные к направлению шунтирующего магнитного потока (рис. 3.18,б). Однако конструкция многощелевой мишени сложна. Узкие щели требуют сложной механической обработки и надежного припаивания плоских четырехугольных рамок из материала мишени к охлаждаемому катоду. Поэтому в ряде случаев предпочитают однощелевые мишени, состоящие из двух частей, расположенных с определенным зазором (щелью), при этом подобного рода щель может выполнять функцию генератора плазмы. Поскольку в щели магнитная индукция больше, чем над распыляемой поверхностью мишени, в ней создаются наиболее благоприятные условия для возбуждения разряда, который стимули-

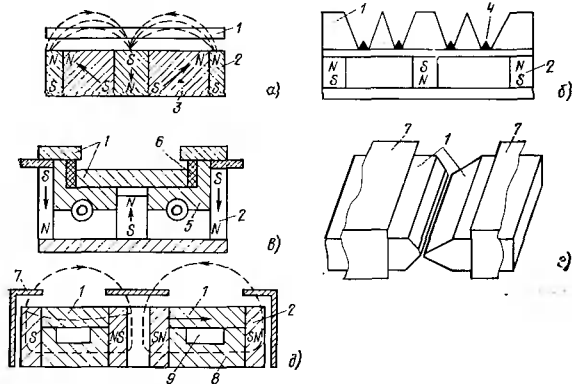


Рис. 3.18. Конструкционные варианты катодных узлов и магнитных систем для распыления магнитных материалов:

*a* — с тонкослойной мишенью; *б* — с увеличенным запасом материала мишени; *в* — с одной щелью между мишенями; *г* — с двусторонним распылением мишени; *д* — с мишенью, являющейся частью магнитопровода; 1 — мишень; 2 — основной магнитный блок; 3 — дополнительный магнитный блок; 4 — треугольные вкладыши; 5 — водоохлаждаемый корпус; 6 — диэлектрическое кольцо из керамики; 7 — экран; 8 — магнитопровод; 9 — полость для подачи воды

рует затем возникновение разряда над остальной поверхностью мишени, где присутствует более слабое магнитное поле, с индукцией около  $10^{-2}$  Тл. На дне щели расположена пластина, которая может быть выполнена из магнитного материала распыляемой мишени или из немагнитного, например керамики. Керамическая пластина не влияет на магнитное поле над поверхностью мишени и щелью, однако при распылении мишени она быстро покрывается пленкой магнитного материала и тогда начинает значительно шунтировать магнитное поле, и поэтому приходится увеличивать ширину щели.

Для того чтобы исключить загрязнение пленок за счет частичного распыления керамической пластины, зону прямой ее видимости перекрывают частью распыляемой мишени (рис. 3.18, *в*). При этом центральную часть в виде круглой или прямоугольной пластины располагают на внутреннем полюсном наконечнике магнитной системы, другую — на внешнем полюсном наконечнике, который по высоте больше внутреннего полюсного наконечника и центральной части мишени. Диэлектрическое кольцо из керамики, находящееся в водоохлаждае-

мом корпусе катода, фиксирует центральную часть мишени. Плазма разряда генерируется у открытой поверхности диэлектрического кольца, где магнитная индукция наибольшая. Такую конструкцию МРС можно применять для распыления магнитных и немагнитных мишеней большой толщины, причем часть мишени, расположенная на внешнем полюсном наконечнике, может состоять из нескольких секторов, которые перемещаются к центру по мере их распыления.

На рис. 3.18,г приведена схема МРС с мишенью, состоящей из двух плоских частей с симметричными скосами, между которыми имеется щель. Каждая часть мишени соединена с противоположным полюсом магнитной системы и закрыта экраном (кроме скошенных частей), находящимся под потенциалом анода. Линейное расположение частей мишени позволяет автоматически перемещать их по направлению к щели по мере распыления, сохраняя при этом прежние размеры щели. Благодаря этому ВАХ разряда в процессе распыления мишени не изменяется. МРС с такой мишенью особенно эффективны для нанесения пленок на ленточную подложку, перемещаемую параллельно двум сторонам мишени.

Однощелевая конструкция мишеней из магнитного материала находит широкое применение, поскольку ее легко реализовать в типовых МРС, предназначенных для распыления магнитных материалов. Например, если в типовой МРС с конической мишенью нижнюю часть мишени выполнить в виде плоского кольца, а верхнюю — в виде цилиндра, то можно эффективно распылять магнитные материалы. Между этими частями мишени располагают разделительное кольцо из немагнитного материала, поперечное сечение которого может быть в виде круга, эллипса, треугольника, прямоугольника и т. д. Поскольку нижняя и верхняя части мишени находятся около противоположных полюсов магнитной системы и являются как бы ее «расширенными» полюсными наконечниками, магнитное поле в зоне эрозии мишени определяется не столько местом расположения полюсов магнитной системы, сколько формой верхней и нижней частей мишени. Изменением формы этих частей мишени и ширины щели между ними можно регулировать распределение плазмы разряда и изменять профиль эрозии мишени. Поскольку части мишени не обязательно насыщать магнитным потоком, можно увеличить площадь их поперечного сечения, обеспечивая тем самым большой запас распыляемого материала.

В последние годы для распыления магнитных материалов начинают успешно использовать мишени, которые одновременно являются магнитопроводом магнитной системы. При этом чем больше материал мишени проявляет магнитные свойства, тем меньше сопротивление магнитному потоку, проходящему

через мишень-магнитопровод, и тем больше напряженность магнитного поля между полюсными концевиками. На рис. 3.18,д приведена схема МРС, в которой магнитный блок создан на основе радиальных постоянных магнитов. Противоположные полюсы центрального и внешнего магнитов соединены магнитной мишенью и магнитопроводом, в котором имеются полости для водяного охлаждения. Для того чтобы не распылять магниты, их поверхность, обращенная в зону локализации плазмы, закрыта заземленными экранами, которые расположены на расстоянии темного катодного пространства от поверхности мишени. При этом зона распыления мишени полностью открыта в сторону подложки, что значительно повышает эффективность использования материала мишени.

Интересен также метод осаждения пленок из магнитных материалов с помощью специальной конструкции МРС, использующей две симметрично и близко расположенные напротив друг друга мишени. Мишени изолированы от корпуса установки и на них одновременно подано ВЧ-напряжение или напряжение постоянного тока. Поверхность каждой мишени, являясь источником распыляемого материала, одновременно выполняет роль отражателя высокоэнергетических электронов, эмитируемых с поверхности противоположной мишени, в результате чего эти электроны не могут покинуть пространство между мишенями. В МРС на постоянном токе ионизация газов с помощью электронов является основным механизмом, обеспечивающим высокую плотность плазмы в пространстве между мишенями. При этом одновременно резко снижается бомбардировка осаждаемой пленки быстрыми электронами, отрицательными ионами и отраженными от мишени нейтральными атомами Ag. В результате обеспечиваются более совершенная кристаллографическая структура пленки и высокая равномерность пленки на большой площади подложки. В МРС с двумя мишенями диаметром 85 мм при расстоянии между ними 100 мм, магнитной индукции 0,014 Тл, давлении Ag  $\sim 1$  Па и напряжении 0,5 кВ скорость осаждения магнитных материалов достигала 40 нм/мин.

Анализ методов и устройств для распыления магнитных материалов показывает, что их развитие идет в направлении:

совершенствования методов распыления с температурой ниже точки Кюри, и при этом особое внимание уделяется эффективному охлаждению мишени в процессе распыления;

разработки специальных конструкций магнитных мишеней с учетом возможности их использования в типовых МРС, предназначенных для распыления немагнитных материалов;

создание МРС, специально предназначенных для высокоэффективного распыления только магнитных материалов.



Достигнутый технический уровень конструкционных решений МРС с магнитными мишенями позволяет эффективно использовать их в высокопроизводительном промышленном оборудовании.

### 3.8. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПЛЕНОК

Наиболее важными параметрами процесса осаждения, оказывающими сильное влияние на свойства получаемых пленок, являются: мощность разряда, давление рабочего газа, время осаждения, температура предварительного нагрева лицевой и обратной сторон пластины, а также напряжение смещения, подаваемое на пластины в процессе осаждения пленок. Кроме того, на равномерность конденсата по толщине оказывает существенное влияние вращение пластин в процессе осаждения.

Скорость осаждения пленки почти линейно зависит от приложенной мощности. В свою очередь, мощность разряда при постоянной мощности источника зависит от давления рабочего газа. Требуемая скорость осаждения пленки в МРС может поддерживаться за счет таких параметров, как ток разряда или подводимая мощность. Как показывает практика, для обеспечения воспроизводимости и стабильности процесса осаждения пленок ток разряда необходимо поддерживать с погрешностью не хуже  $\pm 2\%$ , а при стабилизации процесса по мощности разряда ее следует поддерживать с погрешностью  $\pm 20$  Вт. Отклонение рабочего давления не должно превышать  $\pm 5\%$ .

Подробное исследование влияния параметров процесса осаждения на свойства пленок Al и его сплавов с Si и Cu выполнено в [66]. Нагрев пластины может осуществляться путем комбинации предварительного нагрева и нагрева ее обратной стороны в процессе осаждения, в результате чего может быть обеспечен определенный температурный профиль на пластине (рис. 3.19,а), наиболее соответствующий мощности разряда и напряжению смещения на пластинах. Например, при предварительном нагреве пластины до  $400^\circ\text{C}$  и поддержании температуры ее обратной стороны на уровне  $300^\circ\text{C}$  постоянство температурного профиля по пластине может быть обеспечено в процессе распыления при мощности 8,5 кВт и напряжении смещения — 25 В. Важным фактором является устранение потока вторичных электронов с мишени (как это сделано, например, в МРС типа inset), поскольку электроны могут вызвать неконтролируемый нагрев пластин и изменение температурного профиля в течение всего периода осаждения.

Предварительный (до начала осаждения) нагрев пластин производится главным образом с целью устранения быстрого роста температуры пластины в момент начала осаждения, что

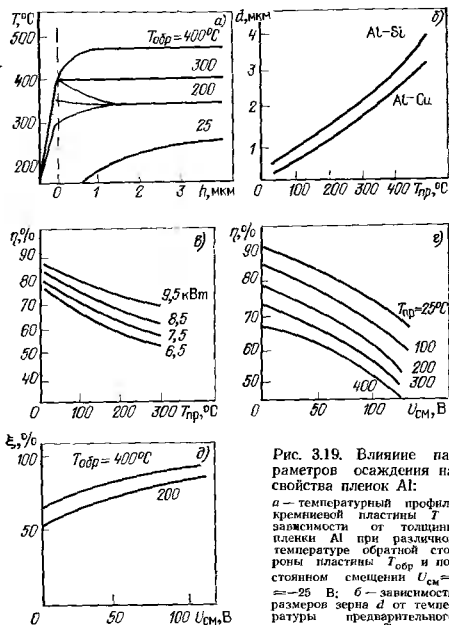


Рис. 3.19. Влияние параметров осаждения на свойства пленок Al:

а — температурный профиль кремниевой пластины  $T$  в зависимости от толщины пленки Al при различной температуре обратной стороны пластины  $T_{обр}$  и постоянном смещении  $U_{см} = -25$  В; б — зависимость размеров зерна  $d$  от температуры предварительного нагрева пластины  $T_{пр}$ ; в — зависимость адгезивной способности пленки  $\eta$  от температуры предварительного нагрева пластины  $T_{пр}$ ; г — зависимость  $\eta$  от  $U_{см}$ ; д — зависимость степени покрытия ступеньки  $\xi$  от  $U_{см}$ .

может вызвать напряжение в пленке и стимулировать рост бугорков. Обычно еще до начала осаждения пластина нагревается до температуры, равной или большей той, которая устанавливается на пластине в процессе осаждения в результате выделения энергии конденсации, кинетической энергии атомов осаждаемого материала и отраженных от мишени атомов рабочего газа. Кроме того, размер зерна увеличивается с увеличением температуры предварительного нагрева (рис. 3.19, б), поскольку при этом увеличивается подвижность атомов осаждаемого материала. Размер зерна может быть еще более уве-

личен с помощью дополнительного нагрева обратной стороны пластины. Размер зерна влияет на устойчивость к электромиграции и коэффициент отражения. Коэффициент отражения, измеренный на длине волны  $\lambda=430$  нм, изменяется в широком диапазоне (от 90 до 60 %) в зависимости от температуры предварительного нагрева и мощности РС (рис. 3.19,а). Его значение можно уменьшить путем увеличения напряжения смещения (рис. 3.19,з). Управление коэффициентом отражения необходимо для оптимизации требований, предъявляемых к оптическим свойствам пленок последующими операциями фотолитографии. Если для газовых мультипликаторов (повторителей) необходимы пленки с низким коэффициентом отражения, то для проекционных установок требуются пленки, имеющие высокий коэффициент отражения.

На степень покрытия ступенек существенное влияние оказывает отрицательное смещение. Бомбардировка растущей пленки Al ионами Ag стимулирует подвижность атомов Al, и, кроме того, вследствие вторичного распыления происходит перераспределение осажденной пленки. Поскольку скорость вторичного распыления значительно выше для ионов, поступающих на пластину под малыми углами падения, чем для ионов, падающих под прямым углом, происходит удаление материала с выступающих частей. Таким образом, материал со дна «ступеньки» перераспределяется на стенки по закону косинуса. Подача на пластину смещения в диапазоне от 0 до  $-100$  В в сочетании с предварительным нагревом пластины позволяет получить заполнение ступеньки на 60—75 % (рис. 3.19,д). Кроме того, нагрев обратной стороны пластины до высокой температуры (400 °С) улучшает заполнение ступеньки еще на 10 %. Для заэкранированных ступенек оптимальен небольшой потенциал смещения. Более того, вследствие увеличения неровностей на поверхности пластины при больших потенциалах смещения изменяется коэффициент отражения (рис. 3.19,е). В зависимости от потенциала смещения и температуры предварительного нагрева он может изменяться в очень широком диапазоне (от 90 до 45 % и даже ниже для малых значений мощности разряда). Напряжение смещения оказывает незначительное влияние на <111> текстуру пленок Al, однако уменьшает удельное сопротивление пленок Al за счет вторичного распыления поверхности загрязнений.

Подача отрицательного смещения на пластину вызывает бомбардировку растущей пленки Al ионами Ag, что стимулирует подвижность осаждающихся атомов Al и вызывает перераспределение осажденной пленки.

Нагрев обратной стороны пластины обеспечивает равновесную температуру пластины в процессе осаждения под действием излучения. Поскольку рассеяние тепла с рабочей поверхно-

сти пластины после осаждения на нее пленки Al становится незначительным по сравнению с теплоотдачей с ее обратной стороны, основное рассеяние тепла происходит с обратной стороны. Таким образом, благодаря предварительному нагреву пластины перед осаждением и поддержанием на обратной стороне контролируемого значения температуры, можно управлять скоростью рассеяния тепла с пластины. Этот метод обеспечивает очень эффективное управление температурой пластины в ходе всего процесса осаждения.

Увеличение температуры в процессе осаждения стимулирует подвижность атомов Al, что обеспечивает лучшее заполнение ступеньки. Для повышения устойчивости пленок к электромиграции требуется увеличение размеров зерен и получение предпочтительной ориентации  $\langle 111 \rangle$ . Однако большие зерна создают серьезные осложнения при жидкостном травлении в случае малых размеров элементов. Таким образом, если необходимо повысить заполнение «ступеньки» и при этом сохранить малые размеры зерен, то следует увеличивать поверхностную подвижность атомов за счет подачи смещения на подложку, а не с помощью высокотемпературного нагрева пластины.

Для формирования с помощью МРС пленок сплава Al + 2% Si, обладающих низкой отражательной способностью, распределение проводилось на постоянном токе при сравнительно высоком давлении Ar (около 4 Па). На длине волны  $\lambda = 436$  нм коэффициент зеркального отражения составлял примерно 0,15, диффузного отражения 0,10. Низкая отражательная способность объясняется столбчатой структурой пленок с размерами зерен до 100 нм. Образование такой структуры обусловлено нагревом пленки в процессе ее образования при слабой поверхности миграции атомов [66]. Большое поглощение света может быть обусловлено наличием разрывов между зернами. В пленках отсутствуют бугорки, они обладают высокой термостабильностью, а их низкая отражательная способность показывает возможность реализации операции фотолитографии с помощью шаговых мультипликаторов.

При исследовании влияния постоянного смещения на качество металлизации ИС алюминием было установлено, что:

высокая степень ориентации кристаллов алюминия  $\langle 111 \rangle$  наблюдалась во всех пленках Al, независимо от смещения, однако наиболее строгая ориентация имела место при нулевом смещении;

при увеличении смещения от 0 до 75 В коэффициент отражения пленки изменяется незначительно, однако при дальнейшем повышении напряжения от 75 до 150 В он резко (примерно в 2 раза) снижается, что указывает на рост шероховатости пленки.

Таким образом, установка для осаждения пленок с помощью МРС должна обеспечивать выбор температуры предварительного нагрева, температуры обратной поверхности пластины и подачу напряжения смещения на пластину, что позволяет оптимизировать электрофизические свойства пленок в широком диапазоне, включая: стимулирование коэффициента заполнения ступеньки для различных углов наклона стенок ступеньки, высокий и низкий коэффициент отражения, большие или малые размеры зерен и определенную устойчивость к электромиграции.

МРС — протяженный источник, у которого зона эрозии распыляемого материала имеет форму кольца или эллипса. При этом обеспечивается как бы «бестеневое освещение» всего сложного рельефа подложки, в том числе так называемых «ступенек». Кроме того, значительная энергия выбитых с мишени атомов позволяет им мигрировать на поверхности подложки, в результате чего выравнивается толщина пленки на поверхности ступеньки. Как отмечено рядом исследований, пленки Al, полученные магнетронным распылением, обладают еще одним достоинством: при химическом травлении пленки в месте пересечения со ступенькой не образуется «раковина» или «мышинная норка», что типично для пленок, получаемых термическим испарением в вакууме. При использовании МРС имеет место диффузное рассеяние атомов осаждаемого материала на атомах Ag, что обеспечивает хорошее покрытие ступенек. Так, при угле наклона ступеньки  $70^\circ$  отношение толщины пленки на боковой грани ступеньки к ее вершине составляет 0,5, а однородность толщины пленки на плоских участках подложки при оптимально выбранном пространственном расположении МРС достигает  $\pm 5$  и даже  $\pm 2$  %.

Для МРС характерны высокая плотность электронов у мишени и высокая эффективность захвата их в магнитную ловушку. В результате в отличие от обычных диодных систем, где добавка к Ag легкого газа (например,  $H_2$ ) вызывает резкое снижение скорости распыления материала мишени (вследствие уменьшения коэффициента распыления), добавка водорода к Ag в МРС (вплоть до 30 %) не вызывает заметного снижения скорости распыления. Из-за наличия в МРС магнитной ловушки  $H_2$  не может проникнуть в зону эрозии мишени и по существу не принимает участия в процессе ее распыления. Однако наличие  $H_2$  в зоне осаждения оказывает существенное влияние на изменение свойств осажденных пленок. Например, пленки Al, осажденные в смеси Ag+ $H_2$ , имеют более плотную структуру, малый размер зерна, низкое удельное сопротивление и обладают высоким коэффициентом отражения.

В присутствии  $H_2$  пленки не имеют микротрещин и обеспечивают более равномерное покрытие ступенек. В то же время

присутствие в Ag лишь 1 %  $O_2$  или  $N_2$  резко изменяет размер зерна Al и отражательную способность пленок.

Существенное влияние на свойства пленок Al, осажденных с помощью МРС, оказывает давление Ag: увеличение  $p_{Ag}$  с 0,1 до 1 Па улучшает свойства сплава Al+Si. Кроме того,  $p_{Ag}$  изменяет характер внутренних напряжений в пленках Ti, Mo и Ta. Эти напряжения являются собственной, присущей пленке характеристикой, а отнюдь не обусловлены различием в коэффициентах термического расширения пленки и подложки и создаются прежде всего из-за высокой кинетической энергии распрыснутых атомов материала мишени при их конденсации на подложке.

При использовании МРС следует учитывать некоторые специфические особенности распыления составных мишеней из материалов с резко различным атомным весом. Так, в пленках Ti—W, полученных с помощью МРС, содержание более легкого компонента (Ti) существенно меньше, чем в составной мишени. Это связано с тем, что более легкие атомы Ti по сравнению с атомами W сильнее рассеиваются на атомах Ag и частично возвращаются обратно на мишень, образуя на ней древовидные наросты — дендриты. Установлено, что добавка  $N_2$  к Ag в количестве нескольких процентов уменьшает внутреннее напряжение в пленках Ti—W и одновременно на 2—3 порядка улучшает их барьерные свойства, позволяющие устранить взаимную диффузию Al и Si при высокотемпературной обработке. Пленки Ti—W с содержанием W от 3 до 18 %, полученные с помощью МРС, имеют  $\rho_v \approx 6 \cdot 10^{-7}$  Ом·см, в то время как те же пленки, полученные в обычной дуговой системе, имеют  $\rho_v \approx 9 \cdot 10^{-7}$  Ом·см. Это объясняется тем, что вследствие высокого потенциала смещения на подложке в дуговой системе пленка становится более мелкозернистой, а выделение Ti на границах зерен увеличивает сопротивление пленки.

Пленки Mo, полученные с помощью МРС, могут быть использованы в качестве материала затвора и межсоединений СБИС, однако требуют принятия мер для устранения явлений зарядовой нестабильности, вызванных процессом магнетронного распыления.

Изучение ионно-дрейфовой и инжекционной нестабильности в МОП-структурах с металлическим электродом, сформированным с помощью МРС, показало, что процесс формирования молибденового электрода сопровождается образованием в слое  $SiO_2$  большого числа радиационных дефектов в виде разорванных и напряженных связей Si—O. Устранение этих дефектов требует стабилизирующего отжига при температурах не ниже 300 °C.

Поскольку совместное воздействие факторов магнетронного распыления и последующего отжига активируют связанные в

объеме  $\text{SiO}_2$  легко мигрирующие примеси (Na, K) и приводят к нестабильности ионного дрейфа под действием положительного напряжения на металлическом электроде, для устранения этого вида нестабильностей может быть использована пассивация  $\text{SiO}_2$  фосфорно-силикатным стеклом на этапах технологического процесса, предшествующих нанесению Mo с помощью МРС.

Применение МРС для изготовления приборов, использующих МОП-структуру, имеет свою специфику, поскольку высокоэнергетические вторичные электроны могут захватываться возникающими ловушками, оказывая отрицательное влияние на стабильность и срок службы МОП-приборов. Увеличение рабочего давления и расстояния мишень — подложка вызывает увеличение числа захватываемых электронов, в то время как увеличение толщины пленки и потенциала смещения оказывает незначительное влияние на захват электронов. Существует оптимальный рабочий режим, при котором количество ловушек сводится к минимуму, тем не менее они полностью не устраняются и необходим высокотемпературный отжиг (около  $500^\circ\text{C}$ ) для нейтрализации ловушек.

Перспективным материалом для создания межслойной изоляции СБИС являются многокомпонентные стекла. Изменяя состав стекол, можно в широких пределах управлять их механическими, тепловыми и электрофизическими свойствами. Для получения тонкопленочных диэлектрических слоев стекол может быть использован метод ВЧ-магнетронного распыления, поскольку он обеспечивает хорошую воспроизводимость состава и свойств пленок, высокую их адгезию к подложкам и к слоям их различных материалов, а также легкость автоматизации процесса осаждения пленки.

Основным недостатком межслойной изоляции является наличие пор в диэлектрике. Причина образования пор — структурные дефекты поверхности подложки, локальные химические загрязнения, а также неоптимальные режимы осаждения диэлектрических пленок. Снижение плотности пор может быть достигнуто путем оптимизации процесса нанесения пленок стекол БВ-22 (53 %  $\text{SiO}_2$ ; 20 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 10 %  $\text{CaO}$ ; 7,5 %  $\text{BaO}$ ; 5,5 %  $\text{V}_2\text{O}_5$ ; 4 %  $\text{MgO}$ ) с помощью ВЧ МРС.

На рис. 3.20 приведены зависимости плотности пор от толщины  $h$  (рис. 3.20,а), скорости осаждения  $v_{\text{ос}}$  (рис. 3.20,б), давления аргона  $p$  (рис. 3.20,в), а также диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  от скорости осаждения  $v_{\text{ос}}$  (рис. 3.20,г) [67].

Пленки стекла толщиной менее 0,6 мкм обладают большой сквозной пористостью (рис. 3.20,а), достигающей  $10^3 \text{ см}^{-2}$ . С ростом толщины пленок пористость снижается, а при толщине 3 мкм и более плотность сквозных пор не превышает  $20 \text{ см}^{-2}$ . Снижение пористости с увеличением толщины пленки, по-види-

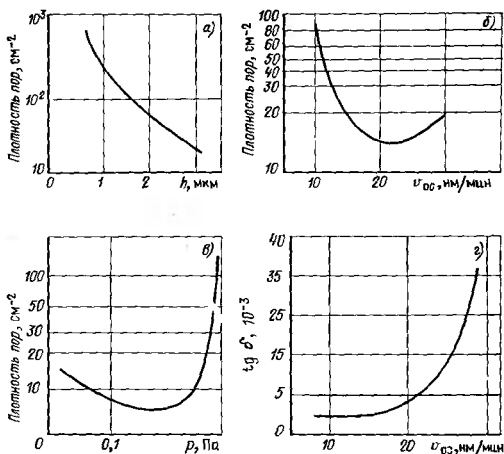


Рис. 3.20. Зависимость плотности пор и диэлектрических потерь в пленках стекла БВ-22 от параметров осаждения

тому, связано с изменением условий и механизма конденсации, что приводит к уменьшению в пленках концентрации избыточных вакансий и внутренних механических напряжений. Однако следует отметить, что снижение сквозной пористости с увеличением толщины конденсата отнюдь не означает снижение общей пористости. Вид кривых пористости, имеющих отчетливо выраженный минимум при  $v=20$  нм/мин (рис. 3.20,б) и давлении  $\text{Ag } p \approx 5$  Па (рис. 3.20,в), можно объяснить следующим образом. При низких скоростях осаждения (или высоких давлениях  $\text{Ag}$ ) возрастает вероятность химического и физического взаимодействия конденсирующихся атомов с атомами  $\text{Ag}$  и при месей, что снижает миграционную подвижность атомов и создает благоприятные условия для образования пор.

При высоких скоростях осаждения (или при низком давлении  $\text{Ag}$ ) увеличение пористости связано, по-видимому, с возникновением в пленке вакансий по кислороду. Дело в том, что в процессе распыления большая часть молекул оксидов диссоциирует, и распыляемый материал поступает на подложку в атомарном состоянии. При высоких скоростях осаждения (или низких давлениях газа) парциального давления  $\text{O}_2$  недостаточ-



но для полного окисления атомов металлов, в результате чего пористость пленки увеличивается.

Быстрый рост  $tg\delta$  с увеличением скорости осаждения, по-видимому, связан с увеличением вакансий в пленке. Поскольку энергия бомбардирующих ионов при распылении существенно превышает энергию химических связей, то возможен разрыв последних. Так, при распылении оксидов можно ожидать, что разрыв химических связей приведет к преимущественному распылению атомов О. Поэтому при распылении мишени из многокомпонентного стекла возможно появление в конденсирующейся пленке избытка атомов Mg, Ca и Si, обладающих меньшей энергией связи с кислородом, чем оксиды Al, Ba, В. Следовательно, увеличение  $tg\delta$  при высоких скоростях осаждения может быть вызвано присутствием в пленке избытка восстановленных атомов.

Как показали исследования, наименьшие пористость ( $7-10 \text{ см}^{-2}$ ) и  $tg\delta [(2-3) \cdot 10^{-3}]$  имеют пленки стекла БВ-22 в том случае, когда скорость осаждения  $20 \text{ нм/мин}$ , а давление Ar  $0,1-0,3 \text{ Па}$ .

### 3.9. ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК

Характерной особенностью МРС является наличие на мишени узкой зоны распыления, обычно имеющей форму кольца или вытянутого эллипса, что сильно затрудняет проблему получения пленки на подложке с требуемой равномерностью по толщине. Проблема усугубляется тем обстоятельством, что при изготовлении БИС и СБИС пластина кремния в результате проведения ряда технологических операций приобретает большое число ступенек высотой до нескольких микрометров с произвольно ориентированными элементами, составляющими с плоскостью подложки угол до  $90^\circ$ . Возникающий при этом эффект «затенения» приводит к тому, что осаждаемые пленки не воспроизводят профиль ступеньки, на боковых гранях ступеньки пленка становится более тонкой, что может привести к образованию трещин и разрывов.

Повысить равномерность осаждения пленок можно двумя путями. Первый путь, заимствованный из метода термовакуумного осаждения, предусматривает планетарное вращение подложек в процессе осаждения на них пленок, в результате чего угол падения атомов распыляемого материала на приемную поверхность подложки непрерывно изменяется. Подложки, обычно размещенные на трех сферических подложкодержателях, расположенных под углом к плоскости мишени небольшой МРС, одновременно совершают движение двух типов: относительно оси симметрии подложкодержателя (что обеспечивает выравнивание распределения средней толщины конденсата по

поверхности подложки при попеременном прохождении его зон с малой и большой плотностью потока частиц распыляемого материала) и орбитальное вращение (что обеспечивает усреднение эмиссионных характеристик МРС) [68].

Внутрикамерные устройства с планетарным вращением подложек, используемые для осаждения пленок на рельефные подложки, могут иметь широкое разнообразие конструктивных решений. С целью обоснованного выбора параметров этих устройств и оптимизации их конструкций для достижения высоких технико-экономических показателей в [69, 70] была разработана универсальная матричная методика расчета распределения конденсата на поверхности рельефных подложек, пригодная для любого сложного перемещения подложек относительно источника распыляемого материала в процессе осаждения пленок, и проведены расчеты с использованием этой методики. В [71] сформулированы критерии оценки технико-экономических показателей, характеризующие степень совершенства внутрикамерных устройств с точки зрения пригодности для осаждения пленок на рельефные подложки:

равномерность распределения конденсата по толщине на планарной и рельефной частях подложки;

суммарная площадь поверхности одновременно обрабатываемых подложек;

степень полезного использования рабочего объема установки;

степень полезного использования материала мишени.

Сопоставление наиболее типичных устройств с планетарным вращением подложек по этим критериям показало, что ни одно из них не удовлетворяет одновременно всем перечисленным критериям и выбор конструкции устройства зависит от того, какой из критериев в данном конкретном случае является определяющим [71]. Это подтверждает также экспериментальные исследования структуры и равномерности осаждения алюминевых пленок на рельефные подложки с использованием планетарных устройств [72—75].

Следует отметить, что планетарные устройства не получили широкого применения при осаждении пленок с помощью МРС, поскольку они эффективны только в том случае, когда пластины имеют сравнительно небольшой диаметр (50—75 мм), что позволяет осаждать пленки одновременно на большое число подложек. Однако при этом приходится удалять МРС на большое расстояние от подложкодержателей, что резко снижает скорость осаждения пленки.

В планетарных механизмах подложки периодически выходят из зоны видимости МРС, и при этом прекращается процесс осаждения, в то время как растущая пленка подвергается воздействию находящейся в рабочей камере газовой среды, в ре-

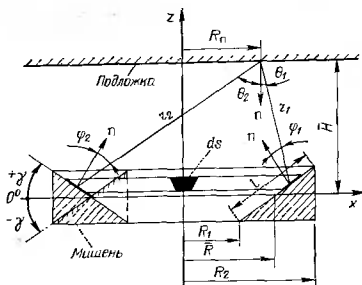


Рис. 3.21. Основные геометрические соотношения, характеризующие магнитную систему с мишенью в виде тела вращения

зультате чего степень загрязненности пленки газовыми включениями может сильно возрастать. Кроме того, планетарное устройство требует ручной загрузки пластин, что полностью исключает возможность автоматизации процесса осаждения пленок и построение установок непрерывного действия.

Второй путь повышения равномерности осаждения пленок предусматривает оптимизацию геометрии МРС и ее пространственного расположения, при которых высокая равномерность может быть обеспечена при неподвижной или линейно перемещающейся относительно МРС подложке [76—77].

В том случае, когда мишень МРС имеет форму тела вращения и на ее поверхности имеется узкая кольцевая зона распыления шириной  $l$  с внутренним и внешним радиусами соответственно  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 3.21), из геометрических построений следует:

$$\cos \varphi(R, \alpha) = [H_1 \cos \gamma + (R - R_n \cos \alpha) \sin \gamma] / r; \quad (3.5)$$

$$\cos \theta_{пл} (R, \alpha) = H_1 / r; \quad \cos \theta_{ст} (R, \alpha) = (R_n - R \cos \alpha) / r; \quad (3.6)$$

$$r(R, \alpha) = (H_1^2 - R_n^2 + R^2 - 2R_n R \cos \alpha)^{1/2}, \quad (3.7)$$

где  $H_1 = H + (\bar{R} - R) \operatorname{tg} \gamma$ ;  $\gamma$  — угол конусности распыляемой поверхности мишени;  $\alpha$  — полярный угол;  $R_n$  — расстояние от точки конденсации до центра подложки;  $H$  — среднее расстояние от подложки до мишени;  $\theta_{пл}$  — угол конденсации на горизонтальную плоскую поверхность;  $\theta_{ст}$  — угол конденсации на вертикальную грань ступеньки.

Общая формула для расчета толщины пленки в этом случае имеет вид

$$h(R, \alpha) = \frac{m}{\pi \rho} \int_{R_0}^{R_0 + 2\pi} \frac{\cos \varphi(R, \alpha) \cos \theta(R, \alpha) R \Pi(R)}{r^2(R, \alpha) \cos \gamma} dR' \alpha, \quad (3.8)$$

где  $m$ ,  $\rho$  — масса распыляемого материала и его плотность;  $\Pi(R)$  — полином, учитывающий реальное распределение плотности тока по радиусу мишени. Распределение плотности тока было выполнено двумя методами: использованием мишени, состоящей из семи изолированных друг от друга колец, с каждого из которых снимали долю полного тока на мишень, а также путем замера профиля зоны распыления мишени после длительного времени работы МРС при постоянных параметрах. Полученные данные были аппроксимированы полиномом Лагранжа

$$\Pi(R) = -0,24|R - \bar{R}|^3 + 0,44|R - \bar{R}|^2 - 0,64|R - \bar{R}| + 1, \quad (3.9)$$

где  $R$  — текущий радиус мишени;  $\bar{R}$  — радиус средней линии зоны распыления.

Для расчета толщины пленки по формуле (3.18) были введены ограничения, определяющие условия распыления и конденсации в заданном направлении:  $\cos \varphi > 0$ ;  $\cos \theta_n > 0$ ;  $\cos \theta_{et} > 0$ . Учитывалось самозатенение ступеньки и мишени, а толщина пленки на «диск» ступеньки определялась на расстоянии от ее основания, равном половине высоты ступеньки. С целью определения геометрических параметров системы осаждения пленок в МРС была исследована равномерность распределения пленки по толщине (РРПТ) на плоских и рельефных поверхностях в зависимости от угла конусности мишени  $\gamma$  и отношения  $H/\bar{R}$ . (Все величины приведены в относительных единицах, что позволяет, используя принцип подобия, определять требуемые абсолютные значения исследуемых геометрических соотношений.)

Расчеты показали, что для каждого  $\gamma$  существует вполне определенное значение  $H/\bar{R}$ , при котором может быть получена максимальная площадь пленки с заданной РРПТ. При отклонении от этого значения в меньшую сторону имеет место сильное утончение пленки в центре подложки, а в большую — на краях подложки.

Для заданного значения  $H/\bar{R}$  существует вполне определенный угол  $\gamma_0$ , при котором пленка с заданной РРПТ нанесется на максимальную площадь подложки. По результатам этих расчетов были определены максимальные площади пленки в виде круга радиусом  $R_{\text{п}}$  с заданной РРПТ ( $\delta = \pm 2\%$ ) для различных значений  $\gamma$  и  $H/\bar{R}$  и построены соответствующие зависимости

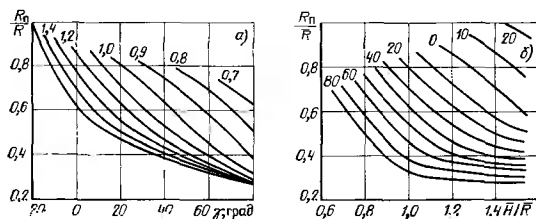


Рис. 3.22. Зависимость отношения  $R_n/\bar{R}$  от угла конусности мишени  $\gamma$  при различных  $H/\bar{R}$  (а) и от отношения  $H/\bar{R}$  от различных углов конусности  $\gamma$  (б) (для всех кривых  $\delta = \pm 2\%$ )

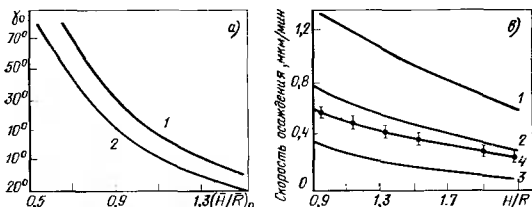


Рис. 3.23. Соотношение между углом конусности  $\gamma_0$  и  $(H/\bar{R})_0$  для  $\delta = \pm 2\%$  (1),  $\delta = \pm 5\%$  (2) (а), зависимость отношения  $\Delta R_n/\Delta v_0$  от угла  $\gamma_0$  при  $H/\bar{R} = (H/\bar{R})_0$  (б) и расчетные (1-3) и экспериментальная (4) зависимости скорости осаждения пленки  $\Delta$  от  $H/\bar{R}$  (а) в МРС с конической формой мишени при  $\gamma = 30^\circ$ ,  $R = 53$  мм и  $l = 35$  мм

(рис. 3.22), из которых видно, что для получения максимальных площадей с высокой РРПТ необходимо выбирать небольшие значения  $\gamma$  и большие  $H/\bar{R}$ . По результатам этих расчетов была построена зависимость  $\gamma_0$  от  $(H/\bar{R})_0$ , позволяющая по одному из параметров определять такое значение другого параметра, при котором достигается максимальная площадь с заданной РРПТ (рис. 3.23,а). Одновременно желательно иметь высокую скорость осаждения пленки  $v_{ос}$  и высокий коэффициент использования распыляемого материала, поскольку критерием эффективности процесса является производительность, выражаемая

через площадь пленки с заданной толщиной и РРПТ, получаемую в единицу времени. Однако стремление получить большую площадь с заданной РРПТ находится в противоречии с возможностью использования высоких скоростей осаждения. Расчеты показали, что с ростом  $\bar{H}/\bar{R}$  скорость осаждения  $v_{oc}$  уменьшается почти линейно, а зависимость  $v_{oc}$  от угла  $\gamma$  имеет экстремум;  $v_{oc \max}$  наблюдается при  $30^\circ < \gamma < 45^\circ$  для всего исследуемого диапазона  $\bar{H}/\bar{R}$ .

На основе анализа расчетных данных была построена зависимость отношения увеличения радиуса ( $\Delta R_n$ ) площади пленки с заданной РРПТ к уменьшению скорости осаждения пленки  $\Delta v_{oc}$  от значения угла  $\gamma_0$  при  $\bar{H}/\bar{R} = (\bar{H}/\bar{R})_0$ . Из зависимости  $\Delta R_n / \Delta v_{oc} f(\gamma_0)$  (рис. 3.23,б) и анализа ранее построенных кривых можно сделать вывод, что наибольшую производительность при осаждении пленок на горизонтальную плоскость имеют МРС с  $\gamma = 20 + 30^\circ$ . При этом пленка осаждается с достаточно большой скоростью на площади с  $R_n \approx 0,8\bar{R}$  при  $\delta \pm 2\%$  и с  $R_n \approx \bar{R}$  при  $\delta = \pm 5\%$ .

Для исследования РРПТ на рельефной поверхности подложки были выбраны две ориентации ступеньки; наиболее благоприятная, когда боковая грань ступеньки обращена к центру мишени, и наиболее неблагоприятная, когда боковая грань обращена от центра к краю мишени. Угол наклона боковой грани был выбран равным  $90^\circ$ . Равномерность осаждения конденсата оценивалась по его росту в трех характерных точках: на вершине  $h_1$ , боковой грани  $h_2$  и дне  $h_3$  ступеньки на расстоянии половины ее высоты. РРПТ определяли по отношениям  $h_2/h_1$  и  $h_3/h_1$ . Анализ полученных данных показал, что для обеспечения высокой РРПТ на боковой грани ступеньки следует выбирать небольшое значение  $\bar{H}/\bar{R}$  и большое значение угла  $\gamma$ , в то время как для получения высокой РРПТ на дне ступеньки требования к  $\bar{H}/\bar{R}$  и  $\gamma$  противоположны. Поскольку ухудшение РРПТ на дне ступеньки не столь важно, следует выбирать небольшое значение  $\bar{H}/\bar{R}$  и большой угол  $\gamma$ , поскольку при этом одновременно достигается высокая РРПТ на планарной части подложки.

Сопоставление расчетных данных с экспериментальными показало, что они различаются не более чем на 10%, причем эксперимент дает несколько более высокую РРПТ на плоской части подложек, что может быть объяснено двумя причинами. Во-первых, пространственное распределение распыленных атомов алюминия при  $U_p < 700$  В является подкосинусным и, во-вторых, оказывает влияние рассеяние распыленных атомов на атомах рабочего газа (Ar). Было проведено также сравнение расчетных и экспериментальных скоростей осаждения пленки Al в МРС с  $\gamma = 30^\circ$ . При построении зависимости  $v_{oc} = f(\bar{H}/\bar{R})$  не учитывалось рассеяние распыленных атомов на атомах рабочего газа (кривая 1 на рис. 3.23,в). Введение согласно [45] поправки,

учитывающей обратное рассеяние расплывших атомов Al, дает кривую 2, а учет обратной диффузии — кривую 3. Ход экспериментальной зависимости (кривая 4) показывает, что она наиболее близка к расчету, учитывающему явление обратного рассеяния (кривая 2). Если принять коэффициент конденсации атомов Al на подложке равным 0,8, то кривые 2 и 4 совпадут, что говорит о хорошем соответствии результатов расчета и эксперимента.

Следует отметить, что по существу только в начальный момент распыления мишени ионы Ag бомбардируют плоскую мишень, а в дальнейшем бомбардировке подвергается поверхность с V-образным профилем, глубина которого постоянно увеличивается. По мере увеличения степени эрозии мишени скорость осаждения распыляемого материала снижается, причем изменение скорости осаждения зависит от конструкции МРС и разрядного тока. Снижение скорости осаждения можно компенсировать увеличением длительности процесса осаждения. Точность коррекции режима осаждения может быть существенно повышена в том случае, если известна экспериментальная кривая зависимости скорости осаждения от времени эксплуатации мишени при фиксированном разрядном токе.

### 3.10. СНИЖЕНИЕ ПОТОКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

При отсутствии экрана в МРС основная температурная нагрузка на подложку (до 60%) создается потоком высокоэнергетических электронов с мишени. Этот поток возникает в основном в районе полюсных наконечников, где линии магнитного поля практически перпендикулярны поверхности мишени, в результате чего электроны не захватываются в магнитную ловушку, а, двигаясь параллельно электрическому полю, ускоряются в темном катодном пространстве до значительных энергий (до 500 эВ) и, не испытывая столкновений с атомами газа, бомбардируют подложку, вызывая ее разогрев.

В [78] с помощью семи калориметрических зондов, размещенных в различных местах, были определены: распределение теплового потока по пластине, зависимости теплового потока от напряжения смещения, а также токов смещения от напряжения смещения. Тепловые потоки, измеренные с помощью этих зондов, линейно зависели от приложенной мощности в диапазоне от 5 до 10 кВт. Как видно из кривых, приведенных на рис. 3.24, а, тепловой поток крайне неравномерен и его пиковые значения 150 Дж/(см<sup>2</sup>·мин) располагаются непосредственно под зоной эрозии мишени. Тепловой поток, поступающий на зонды, смещенные относительно поперечной оси мишени к ее концам, становится асимметричным относительно продольной оси (рис. 3.24, б). Характерно, что имеет место корреляция между тепло-

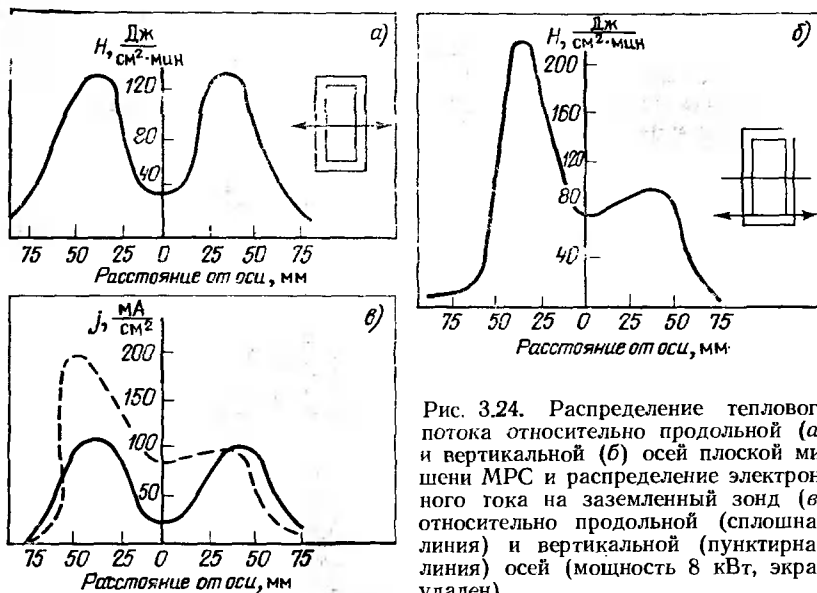


Рис. 3.24. Распределение теплового потока относительно продольной (а) и вертикальной (б) осей плоской мишени МРС и распределение электронного тока на заземленный зонд (в) относительно продольной (сплошная линия) и вертикальной (пунктирная линия) осей (мощность 8 кВт, экран удален)

выми потоками на подложку и распределением электронного тока на заземленный зонд (рис. 3.24, в).

Существенное снижение теплового потока (примерно в 4 раза) может быть достигнуто путем изоляции держателя подложки от корпуса установки (в результате чего на подложке возникает отрицательный плавающий потенциал до 30 В) [79], а также введением дополнительной диафрагмы — анода, позволяющего ограничить попадание на подложку высокоэнергетических электронов.

В табл. 3.4 показана последовательность процесса снижения нагрева подложек из полированного кремния КЭФ-4,5 диаметром 75 мм, покрытых с обеих сторон пленкой оксида толщиной около 0,5 мкм при осаждении на них сплава  $\text{Al} + 1,5\% \text{ Si}$  со скоростью 0,5 нм/с с помощью МРС планарного типа [79].

При общем разрядном токе МРС около 4 А ток вторичных электронов на барабан с подложками составляет 1,5—2 А, поскольку барабан, так же как и анод магнетрона, находится под потенциалом земли. После отделения (изоляции) карусели с подложками от земли температура подложки сразу же снижается на 80 К, что соответствует уменьшению теплового потока примерно в 2 раза (вторая строка табл. 3.4). Ограничение потока электронов, ионов, атомов металла и Ag из периферийных областей мишени в результате введения диафрагмы, находящейся под потенциалом анода, снижает температуру подложки



Таблица 3.4. Способы снижения нагрева кремниевых подложек

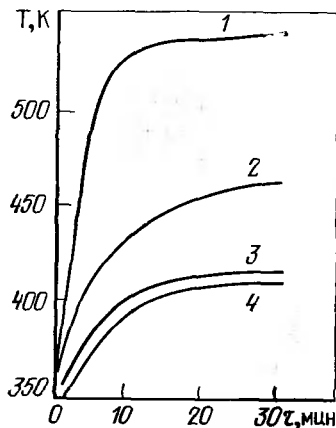
Номер опыта	Температура подложки, К	Еид поверхности алюминия	Особенности процесса
1	$\geq 500$	Сильно матовая	Карусель заземлена, диафрагма у мишени отсутствует, планетарное вращение подложек, потенциал мишени 560 В, $p_{Ag} \approx 0,3$ Па
2	420	Матовая	Карусель изолирована от земли, диафрагма отсутствует, планетарное вращение подложек
3	413	Зеркальная	Карусель изолирована, установлена диафрагма диаметров 90 мм, планетарное вращение подложек
4	380	"	То же, диафрагма диаметром 80 мм, планетарное вращение подложек
5	368	"	Карусель изолирована, диафрагма диаметром 80 мм, $p_{Ag}$ увеличено до 1,1 Па, потенциал мишени снижен до 440 В
6	368—373	"	Карусель изолирована, диафрагма диаметром 80 мм, потенциал мишени 560 В, планетарное вращение подложек, плотно прижатых к кассете
7	348	"	То же, но подложки открыты с обратной стороны. Вращение подложек планетарное

еще на 40 К (третья и четвертая строка табл. 3.4). Увеличение давления Ag с 0,27 до 1,1 Па и, как следствие, уменьшение энергии всех частиц, бомбардирующих подложку, снижают температуру примерно на 12 К. Дальнейшее снижение температуры подложки (на 20 К) достигается, когда обратная сторона подложки открыта и беспрепятственно излучает энергию на водоохлаждаемые стенки камеры. При этом температура подложки не превышает 348 К ( $\sim 75^\circ\text{C}$ ), что позволяет стабильно получать высококачественные пленки Al с зеркальной поверхностью.

Конфигурация МРС оказывает определяющее влияние на температуру подложки в процессе нанесения на нее пленки (рис. 3.25)

Рис. 3.25. Зависимость температуры подложки от времени осаждения пленки алюминия:

1 — без центрального анода; 2—4 — с центральным анодом диаметром 65, 75 и 90 мм соответственно



[80]. Для снижения теплового потока на подложки конструкция МРС должна быть оптимизирована. Так, МРС типа inset создает значительно меньший тепловой поток на подложку.

### 3.11. КОМПОНОВКА УСТАНОВОК ДЛЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

До сравнительно недавнего времени металлизацию ИС в основном осуществляли с помощью установок периодического действия, в которых пленки Al и его сплавов осаждаются одновременно на большое число подложек. При таком режиме работы рабочая камера установки и находящиеся в ней распылительные устройства, подложкодержатели, нагреватели, аппаратура контроля и другие устройства систематически сообщаются с атмосферной и для их откачки и обезгаживания требуется значительное время. Вместе с тем без длительного обезгаживания практически невозможно обеспечить получение пленок с воспроизводимыми параметрами.

Кроме того, в планетарных устройствах, которые необходимы в этом случае для получения требуемой равномерности тонкопленочных слоев, поток распыленных частиц Al на подложку периодически прерывается, в результате чего образуется своеобразный «слоеный пирог» из распыляемого материала и молекул остаточных газов. Наличие в пленке Al молекул  $O_2$  и  $N_2$  стимулирует рост кристаллов в вертикальном направлении, что снижает отражательную способность пленки и увеличивает ее удельное сопротивление.

С целью устранения этих недостатков в последние годы многие зарубежные фирмы переходят от групповой обработки пластин к индивидуальной. Сопоставление обоих методов обработки приведено в табл. 3.5 [81].

Как следует из табл. 3.5, скорость осаждения Al при индивидуальной обработке в 20 раз выше, а поэтому полученная таким путем пленка Al содержит соответственно в 20 раз меньше реактивных газов (в основном кислорода и азота), что способствует снижению шероховатости пленки и уменьшению в ней внутренних механических напряжений. Кроме того, при этом одновременно снижается контактное сопротивление.

Большая скорость осаждения пленок при индивидуальной обработке приводит к снижению подвижности атомов металла, а поэтому для хорошего покрытия ступенек необходим нагрев подложек до  $500^\circ C$ . Поскольку кремниевые пластины толщиной около 0,6 мм имеет высокий коэффициент пропускания в ИК-области спектра (до 0,8), кварцевые лампы в этом случае малоэффективны и нужны специальные устройства для индивидуального нагрева пластин в процессе нанесения на них пленок.

Т а б л и ц а 3.5. Сопоставление групповой и индивидуальной металлизации кремниевых пластин

Параметр и характеристика	Групповая обработка	Индивидуальная обработка
Загрузка пластин	Ручная	Автоматическая
Способ крепления пластин	На вращающихся планетарных подложкодержателях	Бескассетный, пластины при осаждении неподвижны
Время откачки до давления $2 \cdot 10^{-4}$ Па, мин	12—15	0,5
Время нагрева подложек	5 мин до $T=240^{\circ}\text{C}$ . Необходимо выдержка в течение 10 мин	0,7 мин до $T=350^{\circ}\text{C}$
Максимальная температура подложек, $^{\circ}\text{C}$	350	500
Мощность нагревателя подложек, кВт	10	0,1—0,2
Возможность нагрева в процессе осаждения	Отсутствует	Имеется
Расстояние мишень — подложка, см	30	8,3
Скорость осаждения пленки, нм/мин	60 (из двух источников общей мощностью 8 кВт)	1200 (из одного источника мощностью 11 кВт)
Время осаждения пленки Al толщиной 1 мкм, мин	17	1
Количество пластин диаметром 100 мм, металлизированных Al без смены мишени, шт.	1800	2000
Производительность установки, пластин в 1 ч при осаждении пленок на подложки диаметром, мм:		
75	75	60
100	45	60
125	24	60

Нагрев подложки для хорошего покрытия ступенек при холодных стенках рабочей камеры одновременно уменьшает внедрение солей натрия в пленку, и при этом сдвиг вольт-фарадной характеристики за счет УФ-излучения плазмы не превышает 3 В. Производительность при индивидуальной металлизации не зависит от диаметра пластин и достигает 60 пластин в 1 ч.

подавляющее большинство современных установок, использующих принцип линейного перемещения подложек в зоне обработки, обычно снабжается двумя или тремя последовательно размещенными МРС. Это обеспечивает возможность нанесения многослойных покрытий, существенно повышает производительность процесса и воспроизводимость свойств пленок, поскольку

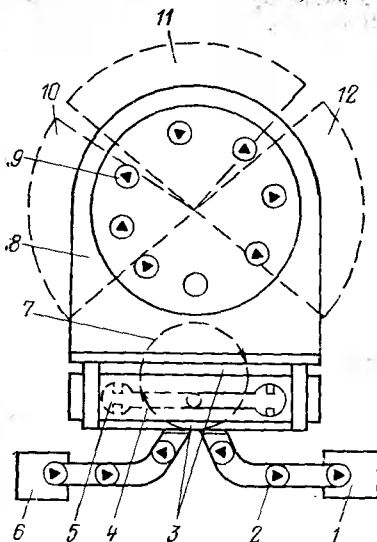


Рис. 3.26. Конвейерное устройство для перемещения пластин:

1 — приемная кассета; 2 — транспортер с пластинами; 3 — двери шлюза; 4 — шлюзовая камера; 5 — механизм подачи и съема пластины; 6 — подающая кассета; 7 — траектория движения кассеты; 8 — вакуумная камера; 9 — карусель с пластинами; 10 — зона нагрева; 11, 12 — первая и вторая зоны распыления

позволяет наносить все слои в едином вакуумном цикле без напуска в рабочий объем влажного атмосферного воздуха.

При использовании кассетно-шлюзовой загрузки может быть применено конвейерное устройство (рис. 3.26), обеспечивающее перемещение пластин по  $\Omega$ -образной траектории из кассеты в камеру последовательно через шлюзовую камеру, зону нагрева и две зоны распыления.

Помимо нанесения пленки на перемещающиеся вдоль зоны распыления пластины применяют металлизацию на неподвижную одиночную пластину. Этот способ находит все большее распространение по мере увеличения размеров пластин (до 150—200 мм) и уменьшения размеров элементов ИС, которые становятся меньше 1 мкм. Существуют два варианта реализации этого способа: с одной зоной обработки без перемещения пластины внутри вакуумной камеры (принцип *in-situ*) для нанесения однослойной металлизации и с несколькими зонами, когда используется перемещение пластины по кругу внутри вакуумной камеры (принцип *rotari-in-line*).

При использовании принципа *in-situ* пластины периодически по одной загружают из кассеты через шлюзовую камеру в зону обработки (рис. 3.27). Поднимают их специальным лезвием, проходящим через кассету, до входного шлюзового отверстия, где захватывают вакуумной присоской. После этого лезвие возвращают обратно в кассету, а держателем пластины, являющимся одновременно ее нагревателем и крышкой вакуумных уплотнений, герметично закрывают шлюзовую камеру. Откачивают шлюзовую камеру через специальный канал, при этом шлюзовая камера изолируется от рабочей камеры с помощью герметично прижатой внутренней крышки, снабженной кольцевым уплотнением. После этого внутреннюю крышку освобождают от пневмоприжима и поворачивают относительно шлюзового отверстия таким образом, что отверстие в крышке становится перед пластиной. При этом пластина располагается в не-

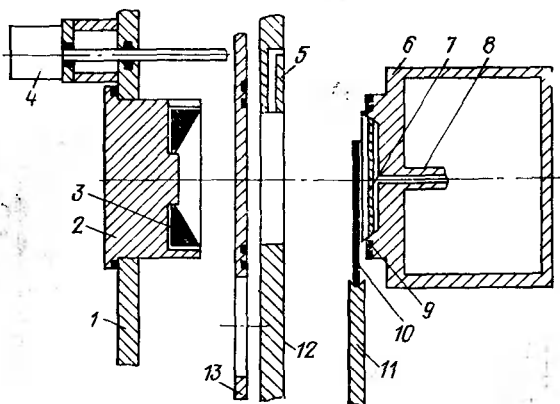


Рис. 3.27. Функциональная схема МРС для индивидуальной металлизации неподвижной одиночной подложки, построенная по принципу in-situ:

1, 12 — стенки камеры; 2 — магнетрон типа S-gun; 3 — мншень; 4 — электропривод; 5 — вакуумный канал; 6 — держатель подложки; 7 — нагреватель; 8 — газовый канал; 9 — уплотнения; 10 — подложка; 11 — элемент подачи подложек; 13 — герметизирующая плита

посредственной близости от МРС типа S-gun, установленной на тыльной стенке вакуумной камеры. Пленку осаждают на неподвижную пластину с неподвижной МРС. После этого пластину удаляют из вакуумной камеры в кассету. Характерно, что при этом весь комплекс перемещений пластины происходит за пределами вакуумной камеры.

При использовании принципа rotari-in-line имеется четыре зоны обработки (рис. 3.28), в каждой из которых пластина обрабатывается в неподвижном положении: зона нагрева (или ионной очистки), две зоны распыления и зона охлаждения (или третья зона распыления). Наличие двух (или трех) зон распыления позволяет использовать это оборудование для формирования многослойной металлизации ИС. Пластины по одной подают из подающей кассеты в шлюзовую камеру, но размещают в специальных держателях на периодически поворачивающейся карусели (рис. 3.29). При этом они проходят поочередно все перечисленные выше четыре зоны обработки. Так же как и в предыдущем случае, пленка осаждается на неподвижную пластину. По окончании всего технологического цикла формирования металлизации пластину подают в приемную кассету.

Осаждение пленок на неподвижную пластину большого диаметра (150—200 мм) с высокой однородностью по толщине возможно при использовании специальных конструкций МРС. Для этой цели фирма Varian (США) использует МРС с постоянным кольцевым магнитом и двумя конусными наконечниками, один из которых одновременно является центральным (плоским) ано-

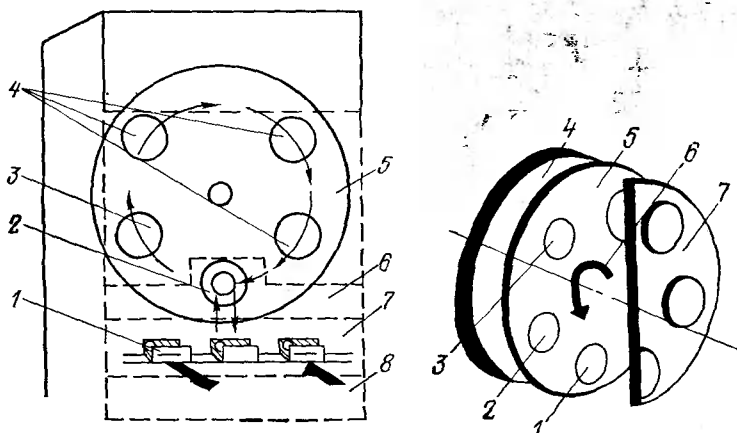


Рис. 3.28. Траектория движения подложки в МРС индивидуальной металлизации:

1 — кассеты с подложками; 2 — шлюз; 3 — зона нагрева; 4 — зона распыления; 5 — зона вакуума; 6 — зона сухого азота; 7 — зона азот-воздух; 8 — вневакуумная зона

Рис. 3.29. Схема движения плиты перемещения подложек через зоны обработки в МРС индивидуальной металлизации:

1 — держатель подложек; 2 — подложка в зоне нагрева; 3 — подложка в 1-й зоне распыления; 4 — задняя стенка камеры; 5 — плита перемещения; 6 — направление движения плиты перемещения; 7 — передняя стенка камеры

дом, а другой — корпусом МРС. Катодный узел содержит кольцевую мишень конической формы, посаженную на водоохлаждаемый держатель. Катодный узел в целом изолирован от анода и корпуса. На анод подается напряжение смещения относительно держателя неподвижной подложки. Поскольку центральный анод одновременно является полюсным наконечником, линии магнитного поля, нарастая над поверхностью мишени, создают пограничное магнитное зеркало для электронов плазмы. В результате, в отличие от обычных петлеобразных полей, проходящих через мишень и создающих зону эрозии в виде глубокой канавки, в данной конструкции МРС обеспечивается однородная зона эрозии и практически постоянная однородность скорости распыления и угловое распределение распыляемого материала в течение всего времени эксплуатации мишени (рис. 3.30).

Характерная особенность новых конструкций МРС — две и более мишеней, одновременно участвующих в процессе распыления. Такое конструктивное решение позволяет успешно решать проблемы получения пленок сплавов и сложных материалов с одновременным управлением их составом, а также улучшения равномерности пленки по толщине и повышения коэффициента использования материала мишени. Кроме того, использование в одной МРС нескольких мишеней позволяет уменьшить размеры этих мишеней, что весьма важно, поскольку ми-

Рис. 3.30. Профиль зоны эрозии конической мишени МРС фирмы Vagial в зависимости от длительности эксплуатации:

1 — 100 %; 2 — 90 %; 3 — 70 %; 4 — 30 %; 5 — до начала эксплуатации

шени большого диаметра очень сложно изготовлять, они очень хрупки и проявляют склонность к растрескиванию.

В некоторых новых конструкциях МРС имеются вращающиеся цилиндрические трубчатые мишени, расположенные друг против друга. Внутри каждой мишени размещаются водоохлаждаемые магнитные системы, которые могут перемещаться с помощью привода, находящегося за пределами вакуумной камеры. В процессе осаждения пленок мишени вращаются, делая от 1 до 12 оборотов в 1 мин, в то время как подложки перемещаются под мишенями. Подобного рода конструкция МРС обеспечивает возможность: получения пленок сплавов в результате одновременного распыления двух мишеней из различных материалов; управления составом осаждаемых пленок и равномерностью осаждения по толщине за счет изменения подаваемой на мишени мощности и положения магнитов внутри мишеней; существенного (почти в 3 раза) повышения коэффициента полезного использования материала мишени; получения многослойных и чередующихся покрытий; получения пленок магнитных материалов; снижения (примерно в 2 раза) температуры мишени в результате ее вращения и интенсивного охлаждения; сокращения времени на обслуживание установки.

При осаждении пленок Al на пластины большого диаметра (до 200 мм) существенный интерес представляет МРС со сдвоенной структурой мишени, которая состоит из двух частей: конической (диаметром 250 мм) и дисковой (диаметром 100 мм). Магнитное поле у конической мишени создается с помощью электромагнитов, а у дисковой мишени с помощью постоянного

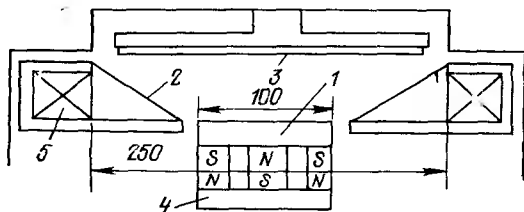
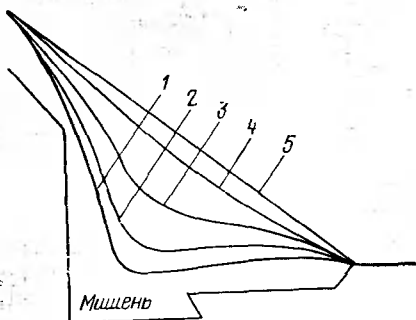


Рис. 3.31. МРС со сдвоенной структурой мишени:

1 — дисковая мишень; 2 — коническая мишень; 3 — подложка; 4 — постоянные магниты; 5 — электромагнит

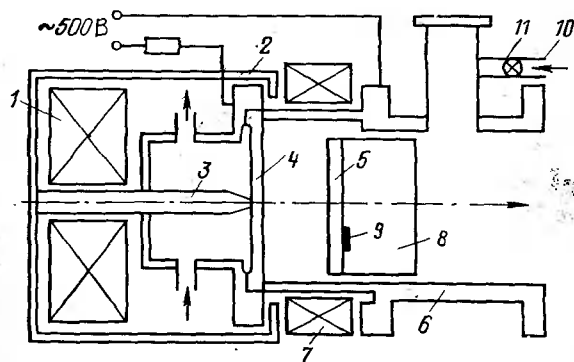


Рис. 3.32. МРС с компрессией магнитного поля:

1 — основной электромагнит; 2 — внешний магнитопровод; 3 — полюсный наконечник; 4 — мишень; 5 — подложка; 6 — рабочая камера; 7 — дополнительный электромагнит; 8 — анод; 9 — термомпара; 10 — напуск газа; 11 — регулируемый вентиль

магнита (рис. 3.31) [83]. При соотношении мощностей на конической и дисковой мишенях 0,7 : 0,3 на кремниевой пластине диаметром 200 мм неравномерность пленки Al по толщине не превышала 3,3%.

Снижение уровня радиационных воздействий на подложку в сочетании с высоким коэффициентом полезного использования материала мишени (до 80%) может быть достигнуто при использовании МРС с компрессией магнитного поля у поверхности мишени (рис. 3.32) [84]. В этой конструкции МРС помимо основного электромагнита 1, расположенного как в обычных МРС за мишенью и снабженного внешним магнитопроводом 2, имеется дополнительный электромагнит 7 в форме катушки, охватывающей снаружи цилиндрическую рабочую камеру 6. Вследствие этого у поверхности мишени 4 имеются два магнитных потока. Конструкция полюсного наконечника 3 внешнего магнитопровода, охватывающего мишень 4, обеспечивает сжатие (компрессию) плазмы у поверхности мишени в форме торроида. Малое расстояние между мишенью 4 и подложкой 5 обеспечивает значительную скорость осаждения (до 4 нм/с для Co и Cr).



## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ДИЭЛЕКТРИКОВ В МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ И РАЗМЕРНОЕ ТРАВЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР

### 4.1. МЕХАНИЗМ РАЗРЯДА В ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЕ, ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА

Использование МРС с химически активной газовой средой [84—88], сохраняя все основные преимущества магнетронного распыления (простоту аппаратуры, высокие скорости осаждения, низкую температуру подложки и др.), позволяет получать пленки самых различных химических соединений путем распыления металлических мишеней в среде химически активного газа (или смеси активного и инертного газов). В то же время наличие активной среды и высоких скоростей распыления мишени и осаждения пленки обуславливает взаимосвязь явлений, происходящих на подложке, в плазме разряда и на поверхности мишени. В результате этого при одинаковой мощности разряда и конструкции МРС скорость осаждения может различаться в 5—10 раз, а состав пленки в связи с этим может существенно изменяться.

Для управления стехиометрией осаждаемых пленок необходимо регулировать относительные скорости поступления к подложке атомов распыляемого металла и частиц активного газа. Первая скорость определяется интенсивностью распыления мишени, вторая — парциальным давлением химически активного газа  $p$  и его коэффициентом прилипания.

В том случае, когда потоки химически активного ( $N_2$ ) и инертного ( $Ar$ ) газов, а также быстрота действия насоса постоянны, а разряд поддерживается изменением напряжения на разрядном промежутке  $U_p$  (рис. 4.1), при увеличении  $U_p$  вначале имеет место резкий рост тока разряда (участок  $AC$  на кривой 1). Бомбардировка мишени ионами  $Ar$  и  $N_2$  постепенно освобождает ее поверхность от пленки из соединений  $Al$  с атомами  $N_2$ , а также от хемосорбированных частиц активного газа. Парциальное давление  $N_2$  при этом сперва увеличивается (участок  $BC$  на кривой 2), а затем в результате поглощения  $N_2$  растущей пленкой начинает медленно снижаться. Участок  $CD$  определяет соответственно начало и завершение освобождения поверхности мишени от пленки.

Резкое возрастание тока разряда с увеличением  $U_p$  на участке  $AC$  может быть объяснено тем, что разряд в этом случае горит при наличии на поверхности мишени пленки диэлектрика, у которого коэффициент вторичной электронной эмиссии больше, чем у чистого алюминия. На падающем участке  $BAХ$ , имеющем

отрицательное динамическое сопротивление (участок  $CD$  на кривой 1), в результате постепенной очистки поверхности мишени от пленки диэлектрика снижается ток вторичных электронов и, как следствие, общий ток разряда. В точке  $D$  ток разряда проходит через минимум, а затем вновь начинает возрастать (участок  $DE$  на кривой 1). При этом по мере увеличения  $U_p$  одновременно возрастает интенсивность эмиссионной линии  $Al$  (кривая 3) и эффективный коэффициент распыления мишени (кривая 4). Для плавного управления характеристиками процесса в переходной области  $CD$  путем изменения  $U_p$  необходимо, чтобы доминирующим процессом на поверхности мишени было осаждение ионов из разряда, а не хемосорбция нейтральных частиц активного газа.

Подробное исследование возможности получения пленок  $AlN$  с требуемым стехиометрическим составом выполнено в [84]. Были проведены эксперименты двух типов. В первом случае газовые потоки  $Ag$  и  $N_2$ , а также скорость откачки поддерживались постоянными, а  $U_p$  изменялось с небольшими приращениями от 200 до 500 В. Во втором случае постоянными поддерживались поток  $Ag$ , скорость откачки, а также мощность разряда, а переменным параметром был поток активного газа  $N_2$ , который плавно изменялся от нуля до максимального значения, а затем обратно до нуля. Пленки, осажденные при сравнительно низком значении  $U_p$  (слева от максимума разрядного тока на рис. 4.1), имели стехиометрический состав  $AlN_x$  с  $x=1$ . В то же время  $x$  монотонно уменьшался с увеличением  $U_p$  (справа от максимума разрядного тока на рис. 4.1). Наконец, при прочих равных условиях увеличение потока  $N_2$  вызывало повышение мощности в разряде (и тем самым скорости распыления мишени), что приводило к увеличению скорости осаждения пленки на

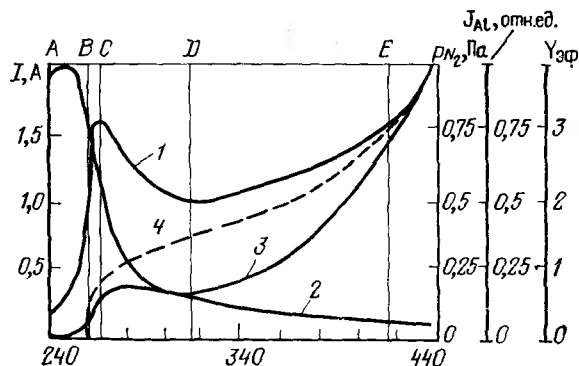


Рис. 4.1. Характеристики разряда МРС при распылении мишени из  $Al$  в смеси  $Ag$  с  $N_2$ :

1 — ток разряда; 2 — парциальное давление  $N_2$ ; 3 — интенсивность эмиссионной линии  $Al$ ; 4 — эффективный коэффициент распыления материала мишени

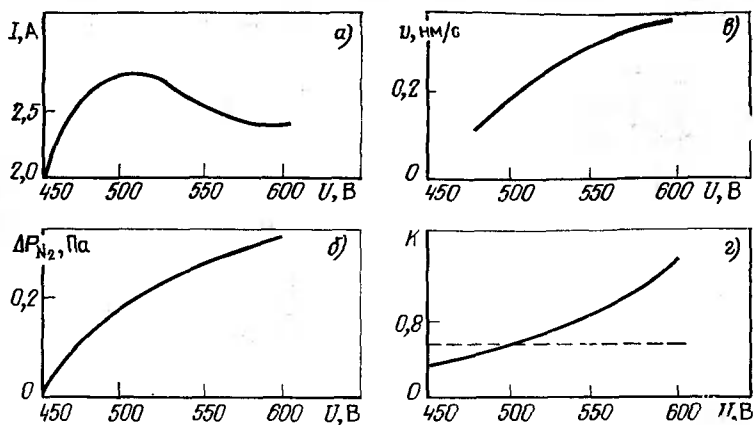


Рис. 4.2. Зависимость тока разряда (а), изменения давления в камере в результате разряда (б), скорости осаждения пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (в) и отношения числа атомов кремния к числу атомов азота в пленке  $K$  (г) от напряжения разряда  $U$

подложку. Было обнаружено, что как при быстрой хемосорбции, так и при осаждении ионов активного газа на поверхности мишени могут проявляться неустойчивости режима разряда, приводящие к неконтролируемому переходу системы к одному из крайних состояний поверхности мишени — полностью покрытой пленкой активного газа или полностью без пленки. В том случае, когда преобладающим механизмом является осаждение ионов активного газа, степенью покрытия поверхности мишени пленкой можно успешно управлять путем оптимального выбора и регулирования напряжения на мишени, что обеспечивает контролируемый состав пленки на подложке. Этот подход, использованный для получения пленок  $\text{AlN}$ , может быть применен и к другим системам мишень — активный газ в том случае, если хемосорбция не является главным фактором, определяющим покрытие мишени пленкой.

На рис. 4.2 приведены зависимости, характеризующие процесс получения пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с помощью МРС при распылении кремниевой мишени в смеси  $\text{Ar}$  с  $\text{N}_2$  [85]. Было показано, что наиболее целесообразно работать в таком режиме, когда мишень лишь частично покрыта пленкой нитрида, что обеспечивает достаточно большие скорости распыления и позволяет получать пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с требуемым стехиометрическим составом.

Для получения пленок с воспроизводимыми свойствами необходим источник питания МРС со стабилизацией по напряжению, поскольку при стабилизации тока (или мощности) имеют место скачки напряжения разряда и, как следствие, крайне нестабильные свойства пленок. Путем подбора соотношения пото-

ков Ag и N<sub>2</sub> ВАХ разряда (кривая *a* на рис. 4.2) приобретала форму, не имеющую резко выраженного максимума разрядного тока. В этом случае на участке с отрицательным динамическим сопротивлением ток разряда меняется очень незначительно, с ростом напряжения разряда при почти постоянном разрядном токе повышается скорость осаждения пленки (кривая *b* на рис. 4.2) и увеличивается количество поглощаемого азота. Однако скорость осаждения пленки растет быстрее, и поэтому отношение числа атомов кремния к числу атомов N<sub>2</sub> в пленке возрастает с повышением напряжения разряда (кривая *z* на рис. 4.2). Пленки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> со стехиометрическим составом (пунктирная линия на рис. 4.2, *z*) были получены при напряжении 500—520 В. Пленки были прозрачны в оптическом диапазоне и имели коэффициент преломления 2,0—2,1 при λ=450 нм. При увеличении U<sub>p</sub> до 600 В пленки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> имели избыток Si и коэффициент преломления 2,6—2,8.

Одним из главных параметров разряда является скорость распыления мишени в среде Ag (число атомов, выбиваемых из мишени в секунду) N<sub>0</sub>, связанная с током I<sub>Ag</sub> простым соотношением:

$$N_0 = Y_p I_{Ag} / e, \quad (4.1)$$

где Y<sub>p</sub> — коэффициент распыления материала мишени (для кремния при U<sub>p</sub>=600 В Y<sub>p</sub>=0,5).

На рис. 4.3 представлены зависимости основных параметров процесса от I<sub>Ag</sub>. Парциальное давление азота в разряде p<sub>N<sub>2</sub></sub> (рис. 4.3, *a*) равно разности общего давления в камере и парциального давления аргона. Быстрота поглощения азота пленкой χ (рис. 4.3, *b*) может быть вычислена по формуле

$$\chi = S [(p_0 / p_{N_2}) - 1], \quad (4.2)$$

где p<sub>0</sub> — парциальное давление азота в камере при включенном разряде; S — скорость откачки.

Из рис. 4.3, *b* видно, что значение χ прямо пропорционально току I<sub>Ag</sub>, т. е. χ = β I<sub>Ag</sub>, где β — коэффициент пропорциональности, равный 5,2 · 10<sup>-2</sup>.

Скорость распыления мишени определяется двумя главными параметрами разряда I<sub>Ag</sub> и p<sub>N<sub>2</sub></sub>, которые, в свою очередь, зависят от других параметров процесса: напряжения на разрядном промежутке, давления Ag, потока N<sub>2</sub>, быстроты откачки камеры. Ионный компонент тока разряда (принимающий непосредственное участие в процессе распыления мишени) меняется примерно от 14 до 50%, что свидетельствует о высокой степени покрытия поверхности мишени пленкой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (ориентировочно от 0,8 до 0,33).

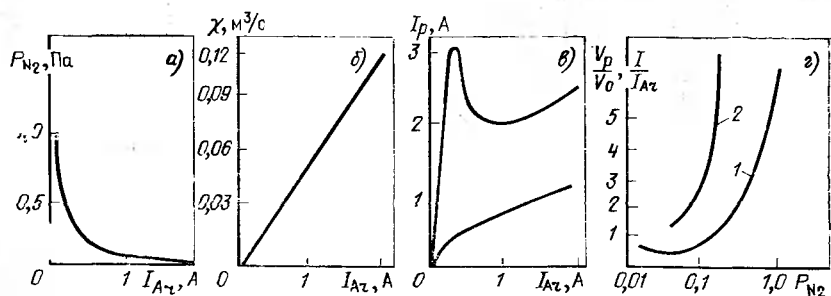


Рис. 4.3. Зависимость парциального давления  $N_2$  в разряде  $p_{N_2}$  (а), быстрота поглощения  $N_2$  растущей пленкой  $\chi$  (б), тока заряда  $I_p$  и его полезной составляющей  $I_n$  от  $I_{Ar}$  (в), относительной скорости распыления  $V_p/V_0(r)$  (г) (1) и относительного тока разряда  $I/I_{Ar}$  (2) при  $I_{Ar}=0,5$  А (г) от парциального давления  $N_2$ .

Добавление к Аг даже небольшого количества  $N_2$  вызывает сначала уменьшение скорости распыления (рис. 4.3,г), что связано с образованием на части мишени пленки нитрида кремния, имеющего более низкий коэффициент распыления. Затем скорость распыления растет с ростом парциального давления  $N_2$ , что объясняется резким увеличением тока разряда и его ионной составляющей. Пленка со стехиометрическим составом (когда отношение числа атомов кремния к числу атомов азота  $k=0,75$ ) образуется при  $p_{N_2}=0,1$  Па. При этом давлении скорость распыления мишени ниже, чем в чистом аргоне (около 80%), несмотря на то, что ток разряда примерно в 2,5 раза выше. При более высоких давлениях  $N_2$  ток разряда (кривая 2 на рис. 4.3,г) растет значительно быстрее, чем относительная скорость распыления. Этим объясняется более низкая по сравнению с распылением в Аг энергетическая эффективность метода реактивного магнетронного распыления.

#### 4.2. ПОДДЕРЖАНИЕ ТРЕБУЕМОГО СОСТАВА РАБОЧЕГО ГАЗА

Поскольку состав рабочего газа или газовой смеси оказывает решающее влияние на основные параметры процесса осаждения и свойства получаемых пленок, поддержание требуемого состава газовой смеси является важной практической задачей. Обычно применяют два вида систем напуска газа. В первой системе каждый газ проходит через отдельный датчик расхода (рис. 4.4,а), во второй системе используется газовая смесь постоянного состава, непосредственно подаваемая в реактор (рис. 4.4,б). При этом необходимо обеспечить полное соответствие состава газовой смеси, измеренной по схеме рис. 4.4,б, применительно к установкам, у которых газовая система собрана по схеме рис. 4.4,а.

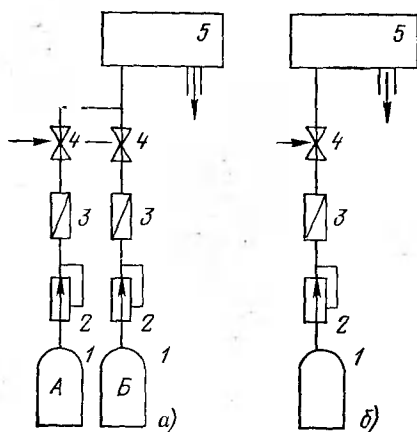


Рис. 4.4. Газовые системы установок для реактивного распыления материалов при использовании двух различных источников газов (а) и одного источника со смесью газов (б): 1 — газовые баллоны; 2 — стабилизаторы давления; 3 — датчики расхода газа; 4 — натекатели; 5 — рабочая камера

Как известно, показания датчиков давления и регуляторов расхода газа на основе термосопротивлений зависят от рода газа. Поэтому для определения точного расхода необходимо использовать поправочные коэффициенты  $\psi =$

$= Q_{p.r.} / Q p_{N_2}$ , обеспечивающие одинаковые показания датчиков расхода рабочего и нейтрального газов.

В табл. 4.1 приведены поправочные коэффициенты для некоторых газов [1,89].

Таблица 4.1. Поправочные коэффициенты для различных газов при использовании датчиков на основе термосопротивлений

Газ	Химическая формула	$\psi$	Газ	Химическая формула	$\psi$
Гексафторид вольфрама	WF <sub>6</sub>	0,22	Арсин	AsH <sub>3</sub>	0,66
Дихлорметилсилан	(CH <sub>3</sub> )SiCl <sub>2</sub>	0,23	Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	0,66
Метилтрихлорсилан	(CH <sub>3</sub> )SiCl <sub>3</sub>	0,25	Аммиак	NH <sub>3</sub>	0,68
Гексафторид серы	SF <sub>6</sub>	0,28	Фосфин	PH <sub>3</sub>	0,69
Тетрахлорид кремния	SiCl <sub>4</sub>	0,29	Метан	CH <sub>4</sub>	0,72
Хладон-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0,32	Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	0,74
Трихлорсилан	SiHCl <sub>3</sub>	0,35	Сероводород!	H <sub>2</sub> S	0,74
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,36	Закись азота	N <sub>2</sub> O	0,73
Трихлорид бора	BCl <sub>3</sub>	0,39	Селенидоводород	H <sub>2</sub> Se	0,81
Диоксид азота	NO <sub>2</sub>	0,41	Хлор	Cl <sub>2</sub>	0,84
Хладон-13	CF <sub>3</sub> Cl	0,41	Оксид азота	NO	0,99
Хладон-14	CF <sub>2</sub>	0,42	Азот	N <sub>2</sub>	1,0
Хладон-22	CHClF <sub>2</sub>	0,44	Воздух	—	1,0
Диборан	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,44	Оксид углерода	CO	1,0
Дихлорсилан	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	0,44	Водород	H <sub>2</sub>	1,02
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,49	Фтористый водород	HF	1,0
Метанол	CH <sub>3</sub> OH	0,58	Бромистый водород	HBr	1,04
Силан	SiH <sub>4</sub>	0,59	Хлористый водород	HCl	0,98
Герман	GeH <sub>4</sub>	0,60	Кислород	O <sub>2</sub>	1,00
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,60	Ксенон	Xe	1,36
Трифторид бора	BF <sub>3</sub>	0,61	Гелий	He	1,43
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,61	Аргон	Ar	1,44
			Криптон	Kr	1,49

Зная поправочные коэффициенты для каждого компонента смеси ( $\psi_A$ ,  $\psi_B$  и т. д.), можно определить поправочный коэффициент смеси  $\psi_{см}$  при измерении ее расхода прибором на основе термосопротивлений. Поскольку истинный расход смеси  $Q_{см} = Q_A + Q_B$ , а показания прибора  $Q_{см}^п = Q_{см} / \psi_{см}$ , то учитывая, что  $Q_{см}^п = Q_A^п + Q_B^п$ , легко получить выражение для поправочного коэффициента смеси

$$\frac{1}{\psi_{см}} = \frac{n_A}{\psi_A} + \frac{n_B}{\psi_B} + \dots, \quad (4.3)$$

где  $n_A \approx p_A / (p_A + p_B + \dots)$ ;  $n_B \approx p_B / (p_A + p_B + \dots)$  — относительные концентрации газов, входящих в состав смеси в баллоне. С помощью этого выражения, если известны газы, образующие смесь, и реальный расход смеси, можно определить ее состав в тех случаях, когда поправочные коэффициенты газов сильно различаются.

#### 4.3. ИЗМЕРЕНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА И ДАВЛЕНИЯ ПРИ РЕАКТИВНОМ РАСПЫЛЕНИИ

Состав газовой смеси оказывает определяющее влияние на основные параметры процесса распыления и свойства получаемых пленок, что наглядно иллюстрируется семейством кривых, приведенным на рис. 4.5, которое характеризует процесс получения пленок  $TiO_2$  путем реактивного распыления мишени из титана в присутствии  $O_2$ . По мере увеличения давления кисло-

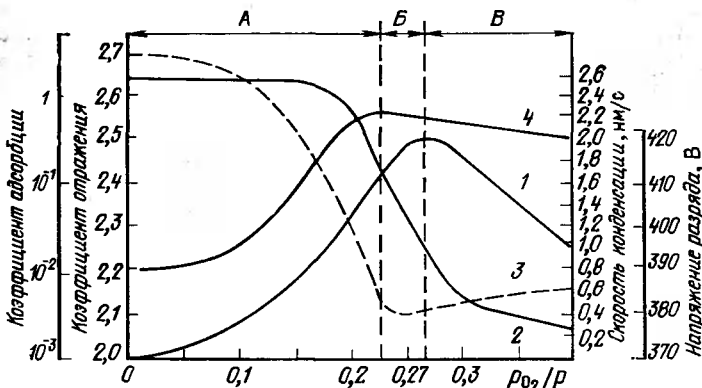


Рис. 4.5. Зависимость параметров процесса распыления и свойств пленок  $TiO_2$  от соотношения давления кислорода  $\rho_{O_2}$  и общего давления смеси аргона с кислородом  $\rho$ :

A — распыление титана; Б — окисление титана; В — распыление оксида титана

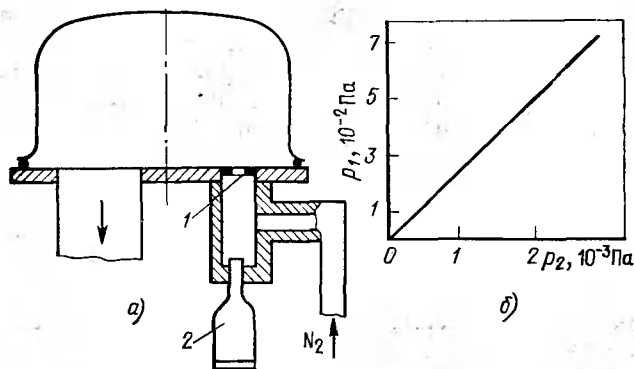


Рис. 4.6. Схема ротаметра для контроля газового потока (а) (1 — диафрагма; 2 — термопарный датчик МТ-4) и зависимость давления в ротаметре  $p_1$  от давления в камере реактора  $p_2$  (б)

рода в смеси  $\text{Ag} + \text{O}_2$  напряжение на разрядном промежутке сперва возрастает и после достижения максимума при  $p_{\text{O}_2}/p \approx \approx 0,27$  начинает резко снижаться (кривая 1). Скорость осаждения пленки (кривая 2) до  $p_{\text{O}_2}/p < 0,2$  практически остается постоянной, а затем резко падает, что связано с окислением поверхности мишени, которое сопровождается уменьшением примерно в 1000 раз коэффициента адсорбции атомов  $\text{O}_2$  на мишени (кривая 3) и небольшим увеличением коэффициента отражения (кривая 4) [88].

Поддержание постоянства газового потока и давления компонентов газовой смеси является важной практической задачей, без решения которой невозможно обеспечить воспроизводимость процесса реактивного распыления.

В некоторых процессах, например, при получении пленок нитрида титана парциальное давление азота, обеспечивающее получение стехиометрического нитрида титана, примерно равно  $2,5 \cdot 10^{-2}$  Па, а эффективная быстрота откачки реактора  $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ , в результате чего поток  $\text{N}_2$  становится меньше  $1 \cdot 10^{-2}$  Вт (или  $\text{Н} \cdot \text{м}/\text{с}$ ). Столь малые потоки не могут быть измерены поплавковыми ротаметрами или датчиками на основе термосопротивления [89, 90]. В этом случае может быть применен ротаметр, использующий термопарный датчик МТ-4 [91]. Схема ротаметра приведена на рис. 4.6. Газы в реактор поступают через диафрагму с небольшим отверстием. Перед диафрагмой давление напускаемого газа во много раз больше, чем в камере реактора, и оно контролируется термопарным датчиком МТ-4. Когда натекаТЕЛЬ закрыт, газ не поступает, и давление до диафрагмы равно давлению в камере реактора. Таким образом, показания



датчика могут быть использованы для контроля предварительной откачки камеры реактора.

При напуске газа в камеру через диафрагму, имеющую пропускную способность  $U$

$$Q_1 = U(p_1 - p_2), \quad (4.4)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — давление до диафрагмы и в камере реактора.

Поскольку помимо потока  $Q_1$  в камеру реактора одновременно поступает поток  $Q_2$ , обусловленный газовыделением и натеканием, и оба потока откачиваются диффузионным насосом с эффективной быстротой действия  $S$ , то уравнение газового баланса будет иметь вид

$$U(p_1 - p_2) + Q_2 = p_2 S. \quad (4.5)$$

Решая совместно (4.4) и (4.5), получаем

$$Q_1 = \frac{U S}{U + S} p_1 - \frac{U}{U + S} Q_2. \quad (4.6)$$

Величины  $U$  и  $S$  постоянны, причем  $U < S$ , а  $Q_1 = U p_1$ . Отсюда следует, что для измерения заданного потока  $Q_1$  достаточно измерить давление  $p_1$ . Поскольку  $U < S$ , то напуск в камеру других газов не снижает точности контроля.

Из (4.6) можно получить выражение

$$p_2 = (U/S) p_1 + p_{\text{пред}}, \quad (4.7)$$

где  $p_{\text{пред}} = Q_2/S$  — предельное давление азота в камере реактора.

В том случае если установка хорошо обезгажена ( $p_{\text{пред}} \ll p_2$ ), то

$$p_2 = (U/S) p_1. \quad (4.8)$$

Пользуясь (4.8) или рис. 4.5,б, можно контролировать быстроту откачки камеры реактора. Для этого после откачки камеры в ней устанавливают требуемое парциальное давление активного газа и снимают показания ротаметра ( $p_1$ ). Если соотношение  $p_1$  и  $p_2$  изменилось и не соответствует рис. 4.5,б, то это сигнализирует об изменении быстроты откачки камеры. Таким образом, подобного рода ротаметр позволяет контролировать предварительную откачку камеры, поток газа, напускаемого в камеру, и быстроту откачки рабочей камеры. Простота конструкции ротаметра позволяет легко встраивать его в существующие вакуумные установки [91].

#### 4.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Высокочастотное распыление значительно расширяет возможности тонкопленочной технологии, позволяя получать высококачественные пленки не только металлов, сплавов и полупро-

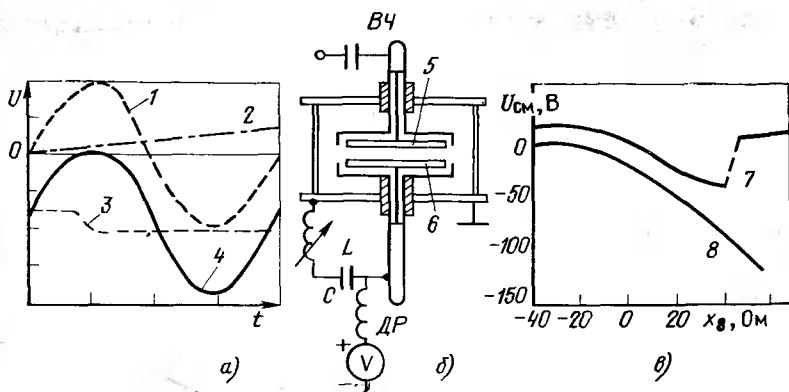


Рис. 4.7. Форма суммарного напряжения и его составляющих на поверхности мишени (а) (1 — высокочастотная составляющая; 2 — напряжение, возникающее за счет ионного тока на мишень; 3 — отрицательное смещение, возникающее за счет электронного тока на мишень; 4 — суммарное напряжение на поверхности мишени); схема подключения  $RC$ -цепочки (б) (5 — мишень, подключенная к источнику ВЧ-напряжения; 6 — изолированный подложкодержатель от реактивного сопротивления между землей и подложкодержателем при давлении 2 Па и плотности ВЧ-мощности 4 Вт/см<sup>2</sup> при отсутствии магнитного поля (7) и при магнитной индукции  $3,4 \cdot 10^{-3}$  Тл (8))

водников, но также пленки диэлектриков путем распыления мишеней из диэлектрических материалов. ВЧ-распыление диэлектрической мишени происходит благодаря возникновению на ней отрицательного (относительно плазмы) смещения. Наличие на мишени только ВЧ-составляющей не может привести к распылению, поскольку при этом возникает лишь колебательное движение ионов с очень малой амплитудой. Механизм возникновения отрицательного смещения связан с тем, что при подаче ВЧ-напряжения на помещенную в плазму мишень на ее поверхность начинают попеременно поступать электронный и ионный токи. В первый момент после подачи ВЧ-напряжения его постоянная составляющая на поверхности диэлектрической мишени равна нулю. В этом случае электронный ток в положительный полупериод ВЧ-напряжения значительно превосходит ионный ток в отрицательный период, что объясняется значительно большей подвижностью электронов по сравнению с ионами, вследствие чего на поверхности мишени накапливается отрицательный заряд и, следовательно, растет отрицательное напряжение смещения до тех пор, пока средние значения электронного и ионного токов не сравняются [16].

Результирующий сигнал на поверхности мишени состоит из трех составляющих: синусоидального напряжения, наведенного на поверхность мишени через емкость распыляемого диэлектри-

ка, положительного напряжения, возникающего за счет ионного тока, и отрицательного смещения, возникающего за счет электронного тока (рис. 4.7,а). В течение большей части периода ВЧ-напряжение отрицательно относительно плазмы, а его постоянная составляющая (смещение) равна приблизительно амплитуде ВЧ-напряжения [92, 93].

Для эффективного распыления материала мишени необходимо, чтобы положительный заряд на ее поверхности под воздействием ионного тока не был бы чрезвычайно большим, поскольку это вызывает уменьшение отрицательного смещения, определяющее энергию ионов и, следовательно, эффективность распыления. Электронный ток на мишень компенсирует действие положительного заряда, приобретенного за счет ионного тока, восстанавливая напряжение смещения (кривая 3 на рис. 4.7,а). Очевидно, что чем длительнее период ВЧ-колебаний, тем больший положительный заряд приобретает мишень и тем сильнее уменьшается отрицательное смещение. Для устранения этого явления период ВЧ-колебаний должен быть достаточно малым, поэтому на практике чаще всего используют частоту 13,56 МГц.

Критичным параметром, существенно ограничивающим частоту напряжения и рассеиваемую на ВЧ-электроде мощность, является зазор между ВЧ-электродом и заземленным экраном. С одной стороны, этот зазор должен быть по крайней мере в 2 раза меньше толщины ионной оболочки (темного пространства), чтобы в зазоре не возник разряд. С другой стороны, при чрезмерном уменьшении зазора растут емкостные потери и возникает опасность пробоя (особенно при наличии у мишени острых краев и загрязнений). При давлении рабочего газа 0,66—6,6 Па зазор между экраном и ВЧ-электродом составляет несколько миллиметров. Ширина зазора может быть увеличена, а емкостные потери уменьшены, если используется герметичная конструкция ВЧ-электрода с автономной откачкой его внутренней полости до давления  $10^{-3}$  Па.

Следует отметить, что отрицательное смещение возникает не только на мишени, но также на стенках распылительной камеры и держателе подложек, причем электрическое смещение обратно пропорционально четвертой степени площади помещенного в ВЧ-плазму электрода. В диодной системе распыления держатель подложек обычно заземлен, поэтому все заземленные элементы распылительной камеры являются одним из электродов РС. Поскольку площадь заземленного электрода много больше площади мишени, смещение на подложках значительно меньше смещения на мишени. Однако в реальных конструкциях РС не все заземленные элементы одинаково влияют на смещение, поскольку они могут контактировать с плазмой, имеющей разную плотность. Чем лучше сконцентрирована плазма в прост-

ранстве между мишенью и подложкодержателем (например, с помощью магнитного поля), тем меньше влияние заземленных стенок и тем больше смещение на подложках. Поэтому при наличии магнитного поля может быть обеспечена более интенсивная бомбардировка подложек ионами.

Отрицательное смещение на подложкодержателе зависит от емкости темного катодного пространства и протекания ВЧ-тока через эту емкость. Это означает, что включение между изолированным подложкодержателем и заземленным корпусом установкой последовательной LC-цепочки позволит путем изменения реактивности цепочки регулировать смещение на подложке без использования дополнительного источника ВЧ-напряжения (рис. 4.7,б). Под действием на ВЧ-разряд аксиального магнитного поля плотность плазмы у стенок уменьшается, а в области подложкодержателя возрастает, вследствие чего ионный ток на подложки и отрицательное смещение на них увеличиваются (рис. 4.7,в). Таким образом, меняя параметры LC-цепочки и индукцию аксиального магнитного поля в камере, можно в широких пределах регулировать отрицательное смещение на подложкодержателе и тем самым усиливать эффект обратного распыления за счет ионной бомбардировки до необходимого. С ростом ВЧ-напряжения толщина темного катодного пространства увеличивается, а с увеличением концентрации — уменьшается. Оба эти фактора практически уравнивают друг друга, в результате чего емкость темного катодного пространства остается почти постоянной и зависимость напряжения смещения от напряжения на мишени носит линейный характер. С этой же точки зрения можно объяснить уменьшение напряжения смещения с увеличением давления, поскольку в последнем случае уменьшается толщина темного катодного пространства и увеличивается его емкость [93].

Смещение на подложки можно также создавать, подавая часть ВЧ-напряжения с мишени через элемент связи. При расчете смещения в этом случае следует учитывать изменения параметров темного катодного пространства у подложкодержателя.

В диодной ВЧ РС минимальный потенциал зажигания и максимальная проводимость плазмы достигаются в том случае, когда частота приложенного электрического поля равна частоте столкновений электронов с атомами рабочего газа. Исходя из этого условия в [45] получена формула для вычисления оптимального давления рабочего газа

$$p_{\text{опт}} = 6 \cdot 10^5 \lambda_0(1) / \sqrt{T_e}, \quad (4.9)$$

где  $\lambda_0(1)$  — средняя длина свободного пробега атомов газа при единичном давлении (1 Па) и температуре 273 К;  $T_e$  — элек-

тронная температура. Расчеты, проведенные по формуле (4.9) для Ag с  $T_e = 1,5 \cdot 10^4$  К, показывают, что для частот 1,76; 5,28 и 13,56 МГц  $P_{\text{опт}}$  соответственно составляет 0,55; 1,4 и 5,0 Па, что хорошо согласуется с экспериментальными данными для ВЧ-диодных РС без использования магнитного поля.

Аналитические выражения, полученные на основе предложенной в [45] модели движения распыленных частиц с учетом их первоначальной энергии, позволяют значительно точнее описывать экспериментальные зависимости коэффициентов распыления и скоростей распыления материалов от давления газа и расстояния до поверхности конденсации. Полученные выражения могут быть использованы для выбора оптимальных значений давления газа и межэлектродного расстояния в диодных системах ионного распыления и травления материалов [45, 94].

Специфической особенностью ВЧ-систем является трудность стабилизации скорости распыления, поскольку под воздействием дестабилизирующих факторов (например, давления рабочего газа) изменяется полное электрическое сопротивление  $R$  разрядного промежутка. При неизменной мощности это вызывает одновременное изменение напряжения  $U_p$  и тока разряда  $I_p$  в соответствии с соотношением

$$\Delta U_p / U = -\Delta I_p / I = (1/2) \Delta R / R. \quad (4.10)$$

Поскольку приращения напряжения и тока имеют разные знаки, они оказывают противоположное воздействие на скорость распыления. С ростом напряжения обычно увеличивается коэффициент распыления материала мишени, а следовательно, должна возрастать скорость распыления. Однако возникающее при этом уменьшение ионного тока снижает количество ионов, бомбардирующих мишень, вследствие чего должна снижаться скорость распыления. Таким образом, изменения напряжения и тока, вызванные дестабилизирующими факторами при постоянном уровне ВЧ-мощности, оказывая противоположное воздействие на скорость распыления, могут частично взаимно компенсироваться. Однако полной компенсации обычно не происходит, поскольку относительные изменения скоростей распыления хотя и противоположны по знаку, но чаще всего не равны друг другу и, кроме того, изменение тока, как правило, оказывает большее влияние на скорость распыления, чем изменение напряжения.

В [94, 95] получено соотношение

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} \left( \frac{A}{B} - 1 \right), \quad (4.11)$$

связывающее относительное приращение скорости распыления  $\Delta v_p / v_p$  с относительным приращением сопротивления  $\Delta R / R$  разрядного промежутка и коэффициентами  $A$  и  $B$ , которые равны

соответственно тангенсам углов наклона касательной к кривой «коэффициент распыления — напряжение» в рабочей точке и прямой, проведенной из рабочей точки в начало координат. Из выражения (4.11) видно, что скорость распыления остается постоянной, когда  $A=B$ , т. е. когда касательная к кривой «коэффициент распыления — напряжение» в рабочей точке проходит через начало координат. Это показывает, что могут существовать рабочие точки, в которых скорость распыления может быть стабильной при изменении магнитной индукции, давления рабочего газа и других параметров, вызывающих изменение сопротивления. Полученный вывод был проверен экспериментально при травлении ионным распылением пленок  $\text{SiO}_2$  в диодной системе ВЧ-распыления с дисковой мишенью и было установлено, что при правильном выборе рабочей точки поддержание уровня ВЧ-мощности является эффективным средством стабилизации процесса ВЧ-распыления.

В ВЧ МРС обычно используется поперечное магнитное поле. При магнитной индукции 0,01—0,02 Тл все практически приложенное к разряду ВЧ-напряжение падает в области пространственного заряда вблизи ВЧ-электрода. Напряженность ВЧ-поля в плазме достаточно мала, так что можно пренебречь его влиянием на траекторию движения быстрых (способных производить ионизацию или диссоциацию) электронов плазмы, по-

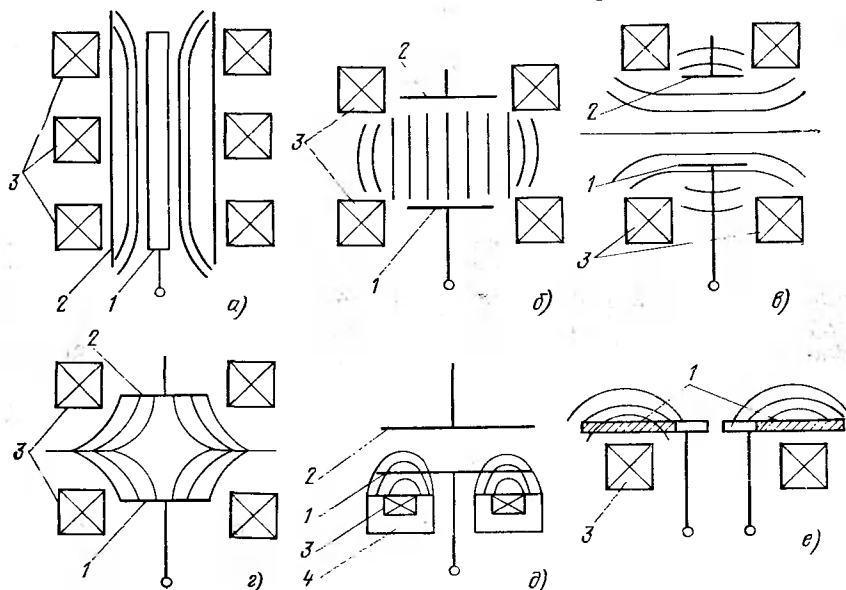


Рис. 4.8. Типичные конструкции ВЧ МРС:

1 — ВЧ-электрод (мишень); 2 — заземленный электрод (анод); 3 — электромагнит; 4 — постоянный магнит

этому их траекторию можно представить в виде спирали, ориентированной вдоль силовых линий магнитного поля. Основным источником ионизации являются электроны, образованные в плазме и ускоренные ВЧ-полем на границе плазма — область пространственного заряда; энергия этих электронов составляет несколько десятков электрон-вольт. Вторичные электроны в этом случае играют второстепенную роль, доказательством чего является слабая зависимость параметров ВЧ-разряда от материала катода, а следовательно, и от коэффициента вторичной электронной эмиссии, а также то, что ВЧ-разряд можно поддерживать при напряжении на разрядном промежутке всего несколько десятков вольт (при столь малом напряжении тлеющий разряд не может существовать только за счет вторичных электронов). Столь большая разница в энергиях ионизирующих электронов в разряде на постоянном токе и ВЧ-разряде позволяет эффективно удерживать электроны в ВЧ-разряде при более слабых магнитных полях, что существенно упрощает задачу формирования магнитных ловушек для ионизирующих электронов в ВЧ-разряде. Следует также отметить, что параметры, оптимальные для МРС на постоянном токе, не являются оптимальными для ВЧ МРС. Это относится к геометрии РС, магнитной индукции и конфигурации магнитного поля, а также к давлению рабочего газа [96, 97].

На рис. 4.8 представлены наиболее типичные конструкции ВЧ МРС. В том случае, если силовые линии магнитного поля направлены параллельно электрическому полю, то магнитное поле не оказывает существенного влияния на параметры разряда и скорость распыления возрастает незначительно. Гораздо более эффективно применение ВЧ МРС с неоднородным поперечным полем, образующим замкнутую ловушку для электронов. Характерно, что ВЧ-электродный разряд при давлении рабочего газа  $P < 10$  Па имеет две достаточно четко выраженные области: прилегающую к ВЧ-электроду область пространственного заряда (ОПЗ), визуально наблюдаемую как область слабого свечения (темное катодное пространство), и ярко светящуюся область плазмы в остальном межэлектродном пространстве. Эта область подобна области положительного столба в разряде на постоянном токе. Напряженность электрического поля в ней, как правило, мала (несколько вольт на 1 см), и практически все приложенное к разряду ВЧ-напряжение падает в области пространственного заряда.

Экспериментальные и расчетные исследования указывают на существенное увеличение напряженности ВЧ-поля в плазме при увеличении магнитного поля, что должно привести к увеличению ВЧ-мощности, поглощаемой разрядом, а следовательно, к увеличению энергии электронов и степени ионизации газа. На зависимости поглощаемой мощности от магнитной индукции

имеется максимум, что связано с переходом плазмы в турбулентное состояние, вызванное возбуждением колебаний, на которых происходит эффективное рассеяние электронов. Благодаря этому происходит перераспределение ВЧ-напряжения между приэлектронной областью и плазмой в пользу последней. Электронная температура и плотность плазмы при этом увеличиваются, а импеданс разряда уменьшается, в результате чего при неизменной ВЧ-мощности падение напряжения на разрядном промежутке тоже уменьшается. Увеличение плотности плазмы и уменьшение напряжения на разряде очень важны для повышения эффективности процесса распыления. Снижая с помощью магнитного поля напряжение на разрядном промежутке с нескольких киловольт до нескольких сот вольт, можно значительно увеличить скорость распыления при неизменной величине вводимой в разряд мощности.

Эффективность ионизации в той или иной РС для слабоионизованной плазмы характеризуется соотношением концентрации ионов и атомов газа в единице объема, которое для ВЧ-разряда без магнитного поля составляет  $10^{-7}$ — $10^{-5}$ , ВЧ-разряда в поперечном однородном магнитном поле  $10^{-5}$ — $10^{-4}$ , СВЧ-разряда — до  $2 \cdot 10^{-2}$ . Локализуя ВЧ-разряд с помощью неоднородного магнитного поля, можно достигнуть степени ионизации, близкой к СВЧ-разряду, однако при этом скорость распыления будет сильно неоднородной по поверхности мишени. Если устранить этот недостаток ВЧ МРС, то она может конкурировать с СВЧ-разрядом, выгодно отличаясь от него простотой и возможностью регулирования в широких пределах энергии бомбардирующих мишень ионов [98, 99].

Для обычного ВЧ-разряда в диодной системе в том случае, когда площадь ВЧ-электрода значительно меньше площади заземленного электрода, отрицательное смещение  $U_{см} = 1,41 U_{вч}$ . Однако, как показали эксперименты (рис. 4.9), указанные соотношения нарушаются с ростом магнитной индукции, из-за влияния постоянной составляющей потенциала плазмы (рис. 4.10). В результате энергия бомбардирующих мишень ионов уже не соответствует  $U_{см}$ , поскольку в ВЧ МРС вследствие более высокой плотности ионного тока и более низкого напряжения на ВЧ-электроде нельзя пренебречь эффектом дозарядки ВЧ-электрода ионным током в отрицательную часть периода ВЧ-напряжения. При всех значениях магнитной индукции с изменением вводимой в разряд ВЧ-мощности  $U_{см}$  пропорционально  $U_{вч}$ , однако по мере увеличения магнитного поля  $U_{см}$  уменьшается быстрее, чем  $U_{вч}$ . ВЧ МРС обладают преимуществами перед обычными диодными РС без магнитного поля:

более низким (примерно на порядок) рабочим давлением, что обеспечивает бесстолкновительное движение ионов в области пространственного заряда;



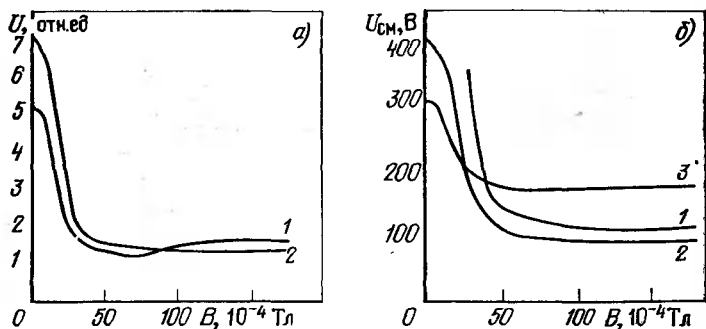


Рис. 4.9. Зависимости ВЧ-напряжения на электроде (а) (1 — напряжения автосмещения на электроде от индукции магнитного поля при  $p_{Ar}=0,13$  Па и  $P_{ВЧ}=0,7$  кВт) и ВЧ-напряжения на электроде от индукции магнитного поля при различном давлении аргона (б) (1 —  $p_{Ar}=6,5 \cdot 10^{-2}$  Па; 2 —  $p_{Ar}=0,13$  Па; 3 —  $p_{Ar}=0,65$  Па) и  $P_{ВЧ}=1,4$  кВт

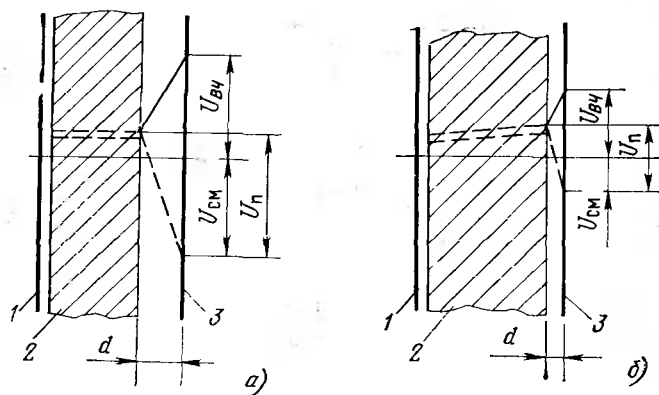


Рис. 4.10. Распределение потенциалов в межэлектродном пространстве без магнитного поля (а) и при наличии магнитного поля (б):

1 — заземленный электрод (анод); 2 — плазма; 3 — ВЧ-электрод (мишень);  $d$  — ширина темного катодного пространства

отсутствием явления диффузии распыленных частиц; снижением энергии ионов до сотен электрон-вольт и возможностью ее регулирования в широких пределах с помощью магнитного поля при неизменной вводимой в разряд мощности, что дает возможность устанавливать оптимальную для данного процесса энергию бомбардирующих ионов;

увеличением скорости распыления по сравнению с РС без магнитного поля при одинаковой мощности, вводимой в разряд, за счет более высокой степени ионизации в результате более полного использования энергии быстрых электронов плазмы;

повышением стабильности разряда и отсутствием паразитных колебаний вследствие контрагирующего действия магнитного поля.

Среди новых конструкций ВЧ МРС существенный интерес представляет МРС с двумя симметричными мишенями, расположенными друг против друга [98]. Поскольку система симметрична относительно центральной вертикальной плоскости между мишенями, фаза ВЧ-напряжения на поверхности мишени практически такая же, как фаза ВЧ-напряжения на поверхности противоположной мишени. В результате этого высокоэнергетические электроны, ответственные за ионизацию рабочего газа, не могут покинуть пространство, заключенное между мишенями, поскольку мишень с одной стороны будет отталкивать электроны, инжектируемые противоположной мишенью в процессе бомбардировки ее поверхности ионами, извлекаемыми из плазмы. Увеличение плотности высокоэнергетических электронов повышает степень ионизации плазмы и, как следствие, скорость распыления. Магнитное поле в пространстве между мишенями, находящимися на расстоянии 100 мм друг от друга, создается с помощью постоянных магнитов. Подложка расположена на расстоянии 76 мм от линии, проходящей через центр обеих мишеней.

Достоинствами подобной конструкции МРС являются:

универсальность, позволяющая получать пленки практически всех материалов (металлы, сплавы, оксиды, нитриды, диэлектрики, магнитные материалы и др.) с достаточной высокой скоростью;

низкое энергетическое воздействие электронов, отраженных атомов аргона и отрицательных ионов на подложку, поскольку последняя вынесена за пределы плазменной зоны;

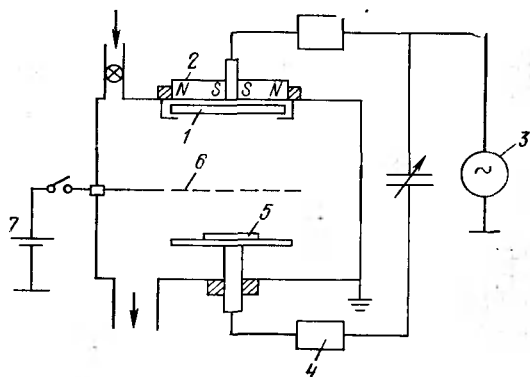


Рис. 4.11. Схема ВЧ МРС с дополнительным сетчатым электродом:

1 — мишень; 2 — магнитная система; 3 — ВЧ-генератор; 4 — блок согласования генератора с нагрузкой; 5 — подложка; 6 — сетчатый электрод; 7 — постоянное смещение

высокое качество получаемых пленок (структура, состав, морфология, равномерность по толщине);

большая площадь, на которой можно получить равномерную по толщине пленку без вращения подложки.

Специалисты фирмы Toshiba (Япония) предложили конструкцию ВЧ МРС с дополнительным сетчатым электродом (рис. 4.11) [99]. На этот электрод, изготовленный из нержавеющей стали, подается постоянное смещение (100 В), в результате чего обеспечивается улавливание высокоэнергетических электронов, способных вызвать рентгеновское излучение. Это позволяет существенно снизить радиационные дефекты в подзатворном диэлектрике ( $\text{SiO}_2$ ) и в межслойной изоляции многоуровневой металлизации МОП-структур. Кроме того, в этой системе благодаря подаче смещения на подложку и чередованию процессов осаждения и травления достигается хорошая планеризация диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ), осажденного на Al с высотой ступенек и расстоянием между ними в пределах 10 мкм.

#### 4.5. СОГЛАСОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ВЧ-МОЩНОСТИ

Характерной особенностью ВЧ-распыления является необходимость согласования ВЧ-генератора с распылительной системой, полное сопротивление (импеданс) которой может меняться в широких пределах в зависимости от давления рабочего газа и размеров электродов. Устройство согласования в этих условиях должно обеспечивать определенное сопротивление, вносимое в выходной контур со стороны нагрузки. Только в этом случае ВЧ-генератор будет иметь хороший КПД и отдавать в нагрузку номинальную мощность [92].

Отсутствие регулируемых устройств согласования приводит к снижению КПД генератора и мощности, передаваемой им в распылительную систему, и, как следствие, к изменению параметров, характеризующих процесс распыления, что делает его нестабильным и невоспроизводимым.

Для стабилизации процесса распыления ВЧ-генератор следует подсоединять к нагрузке с помощью согласующего кабеля, включая между кабелем и РС устройство согласования. Эта схема согласования наиболее удобна, поскольку она обладает следующими достоинствами:

в генераторе не требуются элементы настройки, поскольку он работает на фиксированную нагрузку, равную волновому сопротивлению кабеля;

ВЧ-генератор может работать практически с любой РС, и при этом изменяются лишь элементы устройства согласования, находящиеся вне генератора;

кабель работает в режиме, близком к режиму бегущей волны, т. е. при максимальном напряжении на нем.

Для обеспечения работы генератора на согласованный ка-

бель необходимо, чтобы со стороны РС кабель был нагружен на чисто активное сопротивление, равное характеристическому сопротивлению этого кабеля  $R_{\text{хар}}$ . С этой целью между кабелем и РС включают согласующий четырехполосник, который «пересчитывает» полное сопротивление РС  $Z_{\text{РС}} = R_{\text{РС}} + jX_{\text{РС}}$  в сопротивление  $R_{\text{хар}}$  (где  $R_{\text{РС}}$  и  $X_{\text{РС}}$  — соответственно активная и реактивная составляющие РС).

Наиболее простым и удобным четырехполосником является Г-образная цепочка, состоящая из двух реактивных элементов  $X_{\text{посл}}$  и  $X_{\text{пар}}$ , значения которых могут быть найдены из условия равенства полного сопротивления согласующего четырехполосника, нагруженного на систему распыления, значению  $R_{\text{хар}}$  [92].

Для осуществления процесса согласования необходим индикатор, роль которого может выполнять измеритель мощности, применяемый в коротковолновых передатчиках связи. Регулирование элементов согласования четырехполосника в этом случае производится до тех пор, пока отраженная мощность не станет равной нулю [53].

При увеличении магнитной индукции поля до 0,01 Тл импеданс разрядного промежутка уменьшается в несколько раз вследствие увеличения плотности плазмы. Уменьшение импеданса происходит в основном за счет снижения его реактивной составляющей, в то время как активная составляющая изменяется незначительно. Для согласования импеданса разрядного промежутка с выходным сопротивлением ВЧ-генератора целесообразно использовать Г-образный четырехполосник с емкостью, параллельной его входу, и индуктивностью, включенной последовательно с нагрузкой. Подобного рода схема обеспечивает согласование во всем диапазоне изменения индукции магнитного поля. Поскольку при изменении индукции магнитного поля активная составляющая импеданса изменяется незначительно, согласование ВЧ-генератора с нагрузкой достигается только путем регулирования индуктивности. Это позволяет использовать сравнительно простое устройство автоматического согласования с фазовым дискриминатором в качестве датчика рассогласования [53].

#### 4.6. ПРИМЕНЕНИЕ РЕАКТИВНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Реактивное распыление с помощью МРС получило широкое применение для получения нитридов Al [84], Si [85, 86], Ti [87], Nb [100] и других материалов.

Если нитриды Al и Si используются в качестве диэлектрических слоев, то тонкие слои нитрида (TiN) являются барьером для диффузии атомов металла и полупроводника, предотвращающим деградацию конкретных систем из-за взаимодействия ис-

пользуемых материалов при повышенной температуре и длительной эксплуатации. Большим достоинством TiN является его низкое удельное сопротивление, поэтому его применение не увеличивает сопротивление контактных систем. Однако высокие барьерные свойства и низкое сопротивление присущи только TiN со стехиометрическим составом, в то время как избыток атомов N в TiN ухудшает его свойства. Характерно, что пленки TiN, полученные реактивным распылением на постоянном токе, имеют примерно в 2 раза меньшее удельное сопротивление по сравнению с пленками, полученными с помощью ВЧ-реактивного распыления. В [87] показано, что стабильность процесса получения пленок TiN тем выше, чем меньше отношение скорости откачки N<sub>2</sub> растущей пленкой к скорости откачки вакуумного насоса. Для воспроизводимости свойств пленок необходимо с высокой точностью поддерживать параметры разряда и состав газовой смеси путем регулирования потоков Ar и N<sub>2</sub>. Найден режим устойчивого и воспроизводимого режима осаждения пленок TiN со стехиометрическим составом со скоростью около 5 нм/мин при парциальном давлении N<sub>2</sub>  $(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$  Па, и получены пленки с удельным сопротивлением 40—60 мкОм·см.

Пленки NbN являются наиболее перспективными для изготовления криоэлектронных устройств на основе эффекта Джозефсона. Они обладают сравнительно высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  (15—17 К) в сочетании с высокой твердостью [100]. Осаждение пленок NbN проводили распылением мишени из Nb вакуумной плавки в квазизамкнутой МРС с непосредственным напуском в рабочий объем газовой смеси Ar+N<sub>2</sub>. Наличие десятикратного перепада давления между рабочим объемом и соседними камерами обеспечивало высокую чистоту получаемых пленок и позволяло снизить исходную температуру до 300 К и при скорости осаждения 1 нм/с получать пленки NbN с высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  (15 К) и низким удельным сопротивлением (120—150 мкОм·см). Размер зерна не превышал 10 нм, а плотность критического тока составляла  $5 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>.

С помощью реактивного распыления цинковой мишени можно получать пленки окиси цинка (ZnO), которые широко используются для изготовления акустоэлектронных и акустооптических устройств, волокондов, тонкопленочных лазеров, фотоприемников, прозрачных электродов для солнечных батарей и целого ряда многофункциональных устройств. Для получения сильного пьезоэлектрического эффекта необходимо, чтобы пленки ZnO имели высокую степень ориентации кристаллитов и большое удельное сопротивление ( $\rho > 10^5$  Ом·см). Осаждение пленок ZnO проводили путем реактивного распыления цинковой

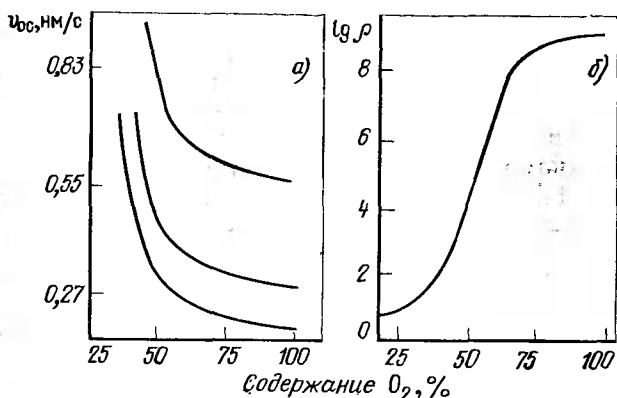


Рис. 4.12. Зависимость скорости осаждения  $v_{oc}$  пленки ZnO (а) и ее удельного сопротивления (б) от содержания  $O_2$  в газовой смеси

мишени при соотношении компонентов  $O_2 : Ag$ , равном 1 : 4. Скорость осаждения пленок ( $v_{oc}$ ) изменялась в зависимости от мощности в пределах 0,27—0,83 нм/с и существенно зависела от содержания  $O_2$  в газовой смеси (рис. 4.12). Из приведенного на рис. 4.12 семейства кривых видно, что увеличение содержания  $O_2$  в смеси сперва резко снижает  $v_{oc}$  (примерно в 10 раз), а затем после достижения некоторого критического содержания  $O_2$  (зависящего от используемой мощности) дальнейшее его увеличение не вызывает существенного изменения  $v_{oc}$ , что, по видимому, связано с окислением поверхности мишени и распылением молекул ZnO.

Как показали измерения, значение  $\rho$  в зависимости от состава газовой смеси изменяется в очень широких пределах: от  $10$  до  $10^9$  Ом·см (рис. 4.12,б). В том случае, когда содержание  $O_2$  в газовой смеси превышало 50%, пленки ZnO имели  $\rho = 10^6 \text{--} 10^9$  Ом·см и  $E_{пр} = 5 \cdot 10^3$  В/см. При  $v_{oc} \approx 0,5$  нм/с пленки ZnO, осажденные на пластины из металла, аморфного стекла, сапфира, а также на кварцевые и сапфировые стержни с подслоем Al и Ag были прозрачными, свободными от загрязнений. Пленки имели текстурированную структуру с размером кристаллитов 100—300 нм, причем ось  $c$  кристаллитов была перпендикулярна поверхности подложки [101]. Исследования, проведенные с помощью оже-спектрометра с цилиндрическим электростатическим анализатором, показали, что основным источником примесей в пленке ZnO является материал распыляемой мишени, содержание примесей в котором не должно превышать 0,01% [102].

#### 4.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ МРС

подавляющее большинство современных автоматизированных установок, использующих МРС, снабжены шлюзовыми устройствами для загрузки и выгрузки пластин. Виды и конструкции этих устройств, основы их расчета и эксплуатации детально рассмотрены в [103]. Для контроля и управления процессами осаждения пленок широко используются микропроцессоры (МП) и ЭВМ.

Автоматические системы управления на базе МП контроллеров могут выполнять различные функции: от контроля за ходом технологического процесса до управления его параметрами.

Задачи контроля обычно сводятся к выполнению следующих функций:

первичная обработка информации о функционировании различных устройств или систем, оснащенных датчиками. Обработка включает в себя фильтрацию помех, масштабирование, сравнение текущих значений параметров процесса с допустимыми пределами;

вычисление текущих значений переменных параметров технологического процесса, не поддающихся непосредственному измерению (определение степени эрозии мишени МРС по мере ее распыления, расходов газов и давления с коррекцией по температуре, парциального давления реактивных газов в ходе процесса, соотношения между газовыми компонентами при проведении реактивного распыления и др.);

слежение за скоростью изменения того или иного параметра с индикацией о превышении допустимого значения (скорость осаждения пленки, давление  $A_g$ , напряжение на разрядном промежутке, разрядный ток и др.);

фиксация последовательности срабатывания исполнительных механизмов, сопровождающаяся в ряде случаев фиксацией значений некоторых параметров до и после срабатывания механизмов;

протоколирование хода технологического процесса, выявление фактов отступления от технологического процесса и их фиксирование;

вычисление оперативных технико-экономических показателей (производительность, количество выпущенной продукции, учет и классификация брака и др.).

Задачи управления технологическим процессом сводятся в основном к следующему:

стабилизация параметров путем регулирования по «классическим» законам (пропорциональному, интегральному, дифференциальному);

двухпозиционное управление по логическим законам и осуществление включения и выключения вентилей, затворов, шабров, натекателей, регуляторов и др.;

автоматизированная реализация последовательности проведения определенной фазы процесса (например, пуска или остановки оборудования);

коррекция оперативных плановых заданий на основе фактической производственной ситуации.

Промышленные системы управления обычно состоят из трех подсистем: устройства ввода данных, устройства вывода данных и МП. Устройство ввода включает чувствительные элементы (датчики), а также преобразователь информации с датчиков (которая может быть в виде аналоговых сигналов) в форму, воспринимаемую МП или микроЭВМ. Устройства вывода системы обеспечивают связь между МП или микроЭВМ с исполнительными механизмами.

Практически все современные модели установок имеют системы управления, построенные на базе специализированных микропроцессорных контроллеров (МПК), которые характеризуются следующими особенностями:

- возможностью программного управления процессом осаждения пленок с помощью 6—9 программ, в которых количество программируемых параметров достигает 20—30;

- возможностью перепрограммирования в ходе цикла;

- наличием самотекстирования, позволяющего проверять запрограммированный процесс;

- возможностью поддержания требуемых параметров процесса;

- использованием в качестве датчика кварцевых микровесов с выдачей данных о скорости осаждения и толщине пленок;

- возможностью поддержания требуемых параметров процесса;

- воспроизведением результатов контроля на дисплее;

- наличием звуковой и световой сигнализации о неисправностях;

- возможностью сопряжения с управляющей ЭВМ;

- возможностью ввода данных через алфавитно-цифровую клавиатуру, дистанционно через телетайп или устройство считывания на бумажной ленте.

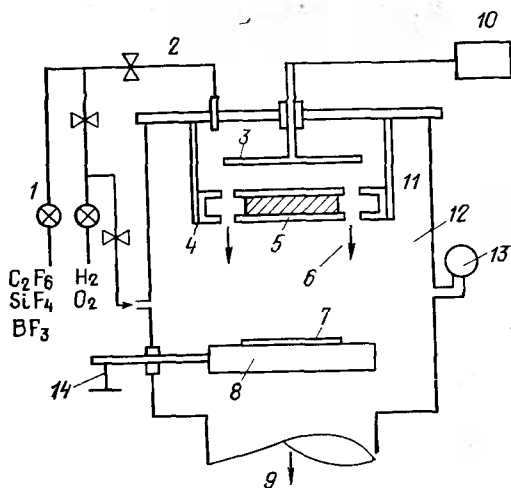
#### 4.8. МАГНЕТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗМЕРНОГО ТРАВЛЕНИЯ МИКРОСТРУКТУР

Освоение промышленного выпуска СБИС и УБИС ужесточают требования к параметрам процесса травления микроструктур, что наглядно видно на примере ДОЗУ ПВ с различным объемом памяти. Так, если в 1987 г., когда объем памяти про-



Рис. 4.13. Магнетронная пушка для реактивного ионно-лучевого травления:

1 — игольчатый натекатель; 2 — вентиль; 3 — анод; 4 — катод; 5 — магнит из редкоземельного сплава; 6 — ионный пучок в кольцевом зазоре; 7 — обрабатываемая пластина; 8 — охлаждаемый водой вращающийся подложкодержатель; 9 — диффузионный насос; 10 — источник ВЧ-мощности; 11 — зона разряда; 12 — зона травления; 13 — ионизационный вакуумметр; 14 — заземление



мышленных видов ДОЗУ ПВ не превышал 1 Мбит, а минимальные размеры были больше 1 мкм, то требуемая селективность

(избирательность) травления не превышала:  $s(\text{Si}/\text{SiO}_2)=20:1$ ;  $s(\text{SiO}_2/\text{Si})=15:1$ ;  $s(\text{Al}/\text{SiO}_2)=15:1$ . Переход в 1992—1993 гг. к промышленному выпуску ДОЗУ ПВ с объемом памяти 16 Мбит и минимальными размерами около 0,5—0,6 мкм требует, чтобы селективность травления  $s(\text{Si}/\text{SiO}_2)=40:1$ ;  $s(\text{SiO}_2/\text{Si})=30:1$  и  $s(\text{Al}/\text{SiO}_2)=30:1$  [1]. Кроме этого, процесс травления должен обеспечивать: высокий показатель анизотропии ( $A>5$ ), высокую скорость травления ( $v_{\text{тр}}>0,2$  мкм/мин), отсутствие радиационных повреждений и загрязнений обрабатываемой поверхности инородными материалами, устранение возможности переосаждения продуктов травления, возможность поддержания на требуемом уровне давления и потока напускаемых газов, а также измерения скорости травления и определения момента окончания процесса травления.

Определяющее влияние на скорость, селективность, анизотропию, однородность и воспроизводимость процесса травления оказывают: тип и конструкция автономного ионного источника или же реактора, состав рабочего газа или газовой смеси, а также количество и состав загрязняющих примесей. В качестве автономного источника для реактивного ионно-лучевого травления широкого класса материалов в последние годы все шире начинают использовать так называемую магнетронную пушку (рис. 4.13). Разряд в магнетронной пушке горит между анодом 3, на который подано ВЧ-напряжение, и заземленным катодом 4. Для поддержания разряда давление в разрядной камере достаточно велико ( $p>7 \cdot 10^{-2}$  Па), а расстояние анод—катод около 10 мм. Чтобы создать приемлемую разность давлений между разрядной и рабочей камерами, кольцевой зазор между ними не превышал 2 мм, а плотность магнитного потока

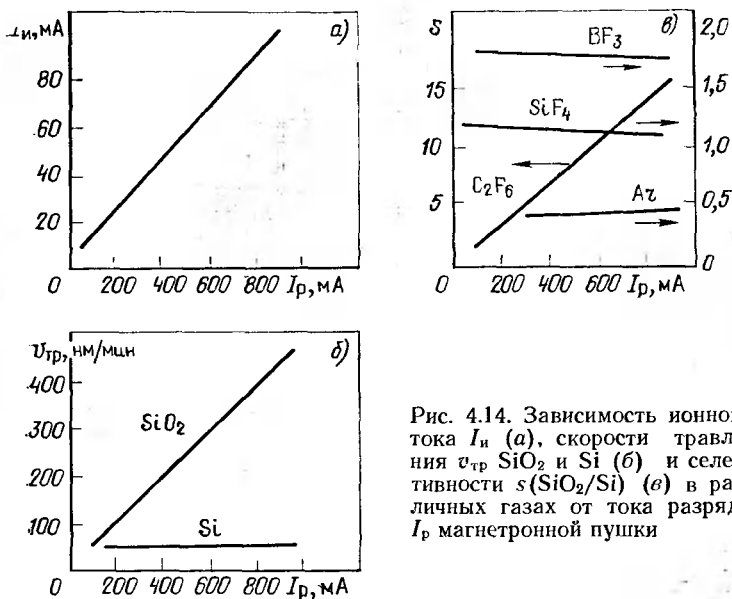


Рис. 4.14. Зависимость ионного тока  $I_n$  (а), скорости травления  $v_{тр}$   $SiO_2$  и  $Si$  (б) и селективности  $s(SiO_2/Si)$  (в) в различных газах от тока разряда  $I_p$  магнетронной пушки

в зазоре составляла  $0,4 \text{ Вб/см}^2$  ( $Sm-Co$ -магнит имел диаметр 46 и толщину 10 мм) [104—105].

Магнетронная пушка проста по конструкции и пригодна для продолжительной работы с химически активными газами. Она обеспечивает большие разрядные токи (до 1 А) при сравнительно небольшом напряжении (меньше 0,5 кВ) и имеет уникальные характеристики (рис. 4.14). Ток разряда  $I_p$  составляет 1000 мА, причем ионный ток  $I_n \approx 0,1 I_p$  (рис. 4.14,а). Скорость травления  $SiO_2$  при использовании плазмы  $C_2F_6$  линейно увеличивается с ростом  $I_p$  и достигает 500 нм/мин,  $v_{тр}$  поликремния составляет всего 50 нм/мин (рис. 4.14,б). Селективность травления  $SiO_2$  по отношению к поликремнию в плазме  $C_2F_6$  линейно возрастает с ростом  $I_p$ , при замене же  $C_2F_6$  другими газами ( $BF_3$ ,  $SiF_4$ ,  $Ar$ ) она значительно меньше и практически мало изменяется с ростом  $I_p$  (рис. 4.14,в). Высокая селективность травления  $SiO_2$  по отношению к поликремнию (до 20) в плазме фторуглеродов объясняется тем, что в процессе обработки в результате диссоциации рабочего газа и хемосорбции образующихся радикалов на поверхности поликремния появляется пассивирующая полимерная пленка, препятствующая травлению поликремния, а выделяющийся в процессе травления  $SiO_2$  кислород удаляет фторуглероды. Относительно малая селективность травления  $SiO_2/Si$  в плазме  $BF_3$  ( $s > 2$ ) обусловлена слабой летучестью образующегося при этом процессе окисла бора.

Отсутствие селективности травления  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в плазме  $\text{SiF}_4$  можно объяснить противоположно направленными процессами травления и осаждения  $\text{Si}$  в результате диссоциации  $\text{SiF}_4$  при бомбардировке поверхности  $\text{Si}$  молекулами  $\text{SiF}_4$ . В случае использования  $\text{Ag}$  скорость травления поликремния несколько выше при малом ускоряющем напряжении из-за различия скоростей физического распыления  $\text{SiO}_2$  и поликремния.

Добавка  $\text{O}_2$  в плазму  $\text{C}_2\text{F}_6$  как в область разряда, так и в зону травления вызывает резкое снижение скорости травления  $\text{SiO}_2$  (60—90 вместо 200 нм/мин), и одновременно происходит увеличение скорости травления поликремния (45—60 вместо 20 нм/мин), причем при соотношении парциальных давлений  $\text{O}_2$  и  $\text{C}_2\text{F}_6$  0,5 и более скорости травления устанавливались на постоянных уровнях (1:1 в первом варианте и 3:1 во втором). Снижение скорости травления можно объяснить уменьшением концентрации радикалов фторуглеродов в результате реакции  $\text{C}_2\text{F}_6$  и  $\text{O}_2$ , причем при введении  $\text{O}_2$  непосредственно в область разряда эффект был более сильным. Что касается ускорения травления поликремния, то оно может быть объяснено удалением с его поверхности фторуглеродной пленки под воздействием кислорода.

При добавке  $\text{H}_2$  в плазму  $\text{C}_2\text{F}_6$  в область разряда скорости травления  $\text{SiO}_2$  и поликремния почти не изменялись при соотношении парциальных давлений  $\text{H}_2$  и  $\text{C}_2\text{F}_6$  до 1. При добавке  $\text{H}_2$  в зону травления скорость травления  $\text{SiO}_2$  также почти не изменялась при соотношении  $\text{H}_2$ :  $\text{C}_2\text{F}_6$  до 1, а затем по мере увеличения  $\text{H}_2$  монотонно уменьшалась от 220 до 150 нм/мин с ростом этого соотношения до 2,5. Одновременно скорость травления поликремния линейно убывала таким образом, что  $s(\text{SiO}_2/\text{Si})$  увеличивалась от 8 до 25.

Для реализации РИПТ может быть использована МРС (рис. 4.15). В рабочей камере, изготовленной из  $\text{Al}$ , расположены два плоскопараллельных электрода диаметром 130 мм на расстоянии 20 мм друг от друга. Подвергаемая травлению пластина установлена на нижнем водоохлаждаемом электроде, на который через согласующее устройство подается ВЧ-напряжение частотой 13,56 МГц. Плотность мощности на подвергаемой травлению пластине может изменяться от 0,5 до 5 Вт/см<sup>2</sup>. Для травления двуоксида кремния и легированного бором монокристаллического  $\text{Si}$  использовали газовую смесь 99%  $\text{CHF}_3$  и 1%  $\text{SF}_6$ , которую вводили в камеру через отверстие около верхнего электрода. Давление в камере составляло 13 Па. Откачку проводили с помощью последовательно включенных двухроторного и механического насосов с масляным уплотнением.

При отсутствии магнитного поля при давлении 13 Па и плотности мощности 1,5 Вт/см<sup>2</sup> постоянное смещение напряжения на ВЧ-электроде составляло 860 В. При использовании магнитного

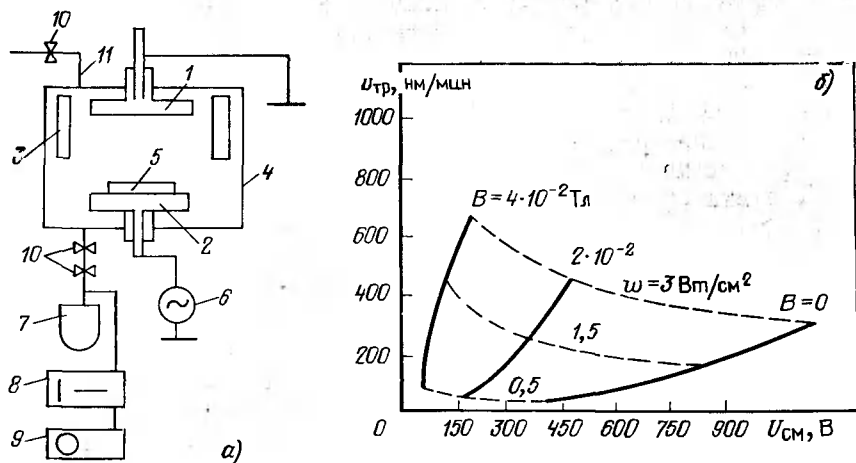


Рис. 4.15. МРС для РИПТ (а) (1 — верхний заземленный водоохлаждаемый плоский электрод; 2 — нижний водоохлаждаемый плоский ВЧ-электрод; 3 — кольцевой магнит; 4 — корпус рабочей камеры; 5 — обрабатываемая подложка; 6 — источник ВЧ-напряжения частотой 13,56 МГц; 7 — азотная ловушка; 8 — двухроторный насос; 9 — механический насос с масляным уплотнением; 10 — краны; 11 — подача рабочего газа) и зависимость скорости травления двуокиси кремния от постоянного смещения на ВЧ-электроде при различных магнитной индукции  $B$  и плотности ВЧ-мощности  $W$  (б) (расстояние между электродами 20 мм, давление смеси  $\text{CHF}_3 + \text{SF}_6$  13 Па)

поля  $B = 2 \cdot 10^{-4}$  и  $4 \cdot 10^{-4}$  Тл постоянное смещение на ВЧ-электроде соответственно снижалось до 340 и 120 В. Скорость травления в присутствии магнитного поля резко возрастала (рис. 4.14, б). Таким образом, использование магнетронных систем позволяет получить высокую скорость травления при низком постоянном смещении, что обеспечивает снижение радиационных дефектов, возникающих в процессе травления [106].

Высокая селективность РИПТ поликремния, полученного осаждением из газовой фазы, по отношению к двуоксиду кремния (30:1) может быть достигнута путем оптимально выбранного двухэтапного процесса в смеси  $\text{Cl}_2$  ( $Q = 100 \text{ см}^3/\text{мин}$ ),  $\text{He}$  ( $Q = 70 \text{ см}^3/\text{мин}$ ) и  $\text{CClF}_3$  ( $Q = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ ). При ВЧ-мощности 300 Вт и давлении 20—100 Па скорость травления поликремния составляет 450 нм/мин, профиль анизотропии  $90^\circ$ , подтрав менее 0,1 мкм, а неоднородность  $\pm 4\%$ .

Высокая селективность травления  $\text{SiO}_2$  по отношению к кремнию может быть достигнута при использовании локализованной плазмы с высокой плотностью мощности при оптимально выбранном составе газовой смеси. Так, добавка 20%  $\text{H}_2$  к плазме  $\text{C}_6\text{F}_{14}$  позволяет получить  $s(\text{SiO}_2/\text{Si}) \approx 15$ , а добавка 20%  $\text{N}_2$  к плазме  $\text{CHF}_3$  —  $s \approx 100$ .

Селективность травления Al по отношению к SiO<sub>2</sub> в хлорсодержащей плазме при оптимально выбранном составе газовой смеси  $s \approx 30$ , скорость травления 0,8—1,5 мкм/мин, профиль травления в зависимости от параметров процесса вертикальный или наклонный, подтрав менее 50 нм, неравномерность от  $\pm 3$  до  $\pm 10\%$ .

РИПТ компонентов сплава Al—Si—Cu со скоростью около 50 нм/мин может проводиться в смеси  $CCl_4:Cl_2=1:1$  при сравнительно низком давлении (5 Па). Селективность травления этого сплава по отношению к SiO<sub>2</sub> колеблется от 12:1 при плотности ВЧ-мощности 0,25 Вт/см<sup>2</sup> до 25:1 при 0,12 Вт/см<sup>2</sup> (что соответствует изменению автоматического смещения на подложкодержателе в магнетронной системе РИПТ от 150 до 5 В). При травлении сплава Al—Si—Cu должны быть полностью сбалансированы физический и химический компоненты травления и устранено неконтролируемое воздействие остаточной атмосферы (в первую очередь паров воды), что может быть достигнуто при использовании установки непрерывного действия, снабженной шлюзовыми устройствами для загрузки и выгрузки пластин [107, 108].

При травлении SiO<sub>2</sub> в плазме CHF<sub>3</sub>, полученной в магнетронной ВЧ-системе при плотности мощности около 1 Вт/см<sup>2</sup>, давлении рабочего газа 3 Па, газовом потоке 35 см<sup>3</sup>/мин и плотности ионного тока 1 мА/см<sup>2</sup>, скорость травления SiO<sub>2</sub> составляла 0,3 мкм/мин. При этом плазма имела высокую степень ионизации, энергия ионов лежала в диапазоне от 30 до 250 эВ, а селективность травления SiO<sub>2</sub> по отношению к Si была в 7 раз выше, чем в обычных системах травления без использования магнитного поля.

При использовании хлорсодержащей плазмы, полученной в магнетронной ВЧ-системе при плотности мощности менее 1 Вт/см<sup>2</sup> и рабочем давлении 10 Па, скорость травления поликремния достигала 5 мкм/мин, а селективность травления по отношению к SiO<sub>2</sub> была выше 10.

Для формирования канавок и разделения кристаллов материалов группы A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>, таких, как GaAs и InP, требуется высокая скорость травления. При травлении GaAs в плазме CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, полученной в магнетронной ВЧ-системе, была достигнута скорость 7 мкм/мин. В том случае, когда при травлении используется маскирование с помощью фоторезиста, скорость травления не должна превышать 1,2 мкм/мин, поскольку при большей скорости наблюдается разрушение фоторезиста [109].

#### 4.9. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Большинство зарубежных фирм при конструировании установок с МРС до сих пор используют ручную загрузку и групповую обработку пластин с горизонтальным расположением мишеней и пластин, причем последние размещаются как над мишенью, так и под ней. Количество одновременно обрабатываемых пластин колеблется от 4 до 200 шт. при диаметре пластин 100 мм. В качестве основной системы откачки во многих установках используются посты на базе криогенного или турбомолекулярного насоса. В конструировании оборудования просматривается тенденция применения предварительного нагрева подложек и их очистки путем ионного травления, подачи смещения на подложку и обеспечение возможности нанесения одно- и многослойных тонкопленочных структур одновременным распылением нескольких материалов.

Лучшие модели установок ведущих фирм США, ФРГ и Японии имеют загрузочные шлюзы и систему транспортировки пластин из «кассеты в кассету», отличаются использованием роботов и высокой степенью автоматизации. К числу лучших моделей может быть отнесена модель 3280 фирмы Varian (США), имеющая модульную систему транспортировки пластин auto tras, обеспечивающая передачу кассет с пластинами диаметром 150 мм с одной позиции обработки на другую. Эта система встроена непосредственно в установку и имеет ряд модулей, обеспечивающих прямолинейное и криволинейное движения, поворотный столик, подъемник для вертикального перемещения, кассетные модули, буферные модули для упорядочения движения пластин, модули загрузки — выгрузки, а также оптический считыватель кода, предназначенный для идентификации и управления потоком пластин на поворотном столике. Установка снабжена системой диагностики для быстрого выявления неисправностей, и конструкция ее позволяет быстро проводить все необходимые ремонтные работы. Установка 3280 имеет все основные достоинства современных базовых моделей: транспортировку пластин «из кассеты в кассету», индивидуальную обработку пластин, вертикальное расположение магнетрона усовершенствованной конструкции, обеспечивающее минимальный уровень загрязнений, высокую степень автоматизации, модульный принцип конструирования и др. Кроме того, фирмой разработана модель 3290, также обеспечивающая транспортировку пластин «из кассеты в кассету», которая, обладая всеми достоинствами базовых моделей, кроме того, имеет:

устройства для нагрева и ионного травления пластин, что обеспечивает очистку пластин непосредственно перед осаждением на них пленок;

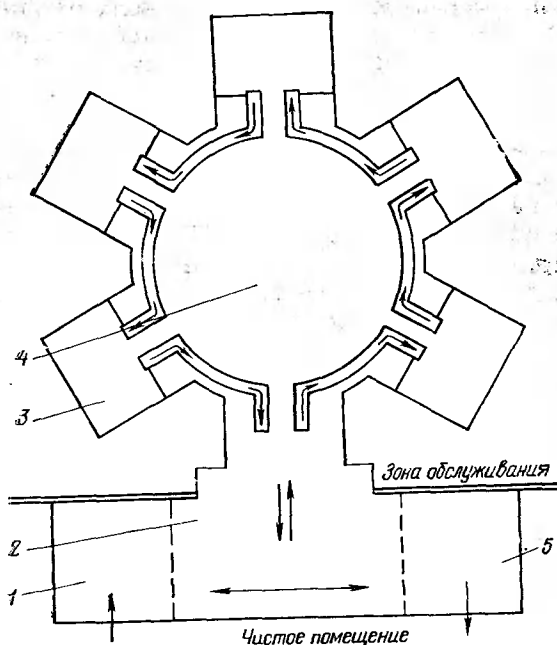


Рис. 4.16. Схема установки для осаждения пленок с общей кольцевой транспортной зоной:

1 — входной шлюз; 2 — камера загрузки и выгрузки пластины; 3 — рабочие камеры; 4 — транспортная зона (камера); 5 — выходной шлюз

предпроцессорный модуль, изолированный от основной рабочей камеры, в котором происходит удаление газов, выделяемых в процессе предварительного прогрева пластин и после их ионного травления, благодаря чему обеспечивается более чистая среда в рабочей камере;

третий (дополнительный) модуль для осаждения пленок, позволяющий последовательно осаждать до трех различных материалов, что увеличивает производительность установки и срок ее службы.

Установка модели 3290 полностью автоматизирована, обеспечивает индивидуальную обработку пластин диаметром 150 мм по мере поступления их из шлюзовой камеры в каждую рабочую камеру. Она предназначена для осаждения алюминиевых сплавов, металлокерамических пленок, формирования одно- и многослойных межсоединений для БИС и СБИС. Кроме того, она позволяет осаждать пленки самых различных металлов и сплавов (Au, Pt, TiW, NiW и др.).

К числу лучших установок относится также модель plasmafab MS6200 фирмы Electrotech (США). Она обеспечивает непре-

рывный режим работы более 80 ч с производительностью до 120 пластин в 1 ч. На установке могут обрабатываться пластины диаметром 100, 125 и 150 мм практически без перенастройки, при этом неравномерность осаждения сплава Al—Si при толщине покрытия 1,2 мкм не превышает соответственно  $\pm 3$ ,  $\pm 4$  и  $\pm 5\%$ . Скорость ионного травления составляет 30 нм/мин для SiO<sub>2</sub> и 15 для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а неравномерность травления не превышает  $\pm 5\%$  для всех диаметров пластин. Ресурс материала мишени при толщине 19 мм обеспечивает обработку 5200 пластин всех диаметров. Скорость осаждения Al—Si ~100 нм/мин, температура пластин 320°C, давление Ag в рабочей камере 2,5 Па. Достоинством установки является простота конструкции и, как следствие, простота обслуживания и эксплуатации. Она обеспечивает чистые вакуумные условия, высокую степень чистоты и точный температурный контроль.

На рис. 4.16 представлена схема установки модели dial system фирмы Genus Corp. (США), в которой нашли практическую реализацию основные мероприятия по повышению чистоты процесса осаждения пленок с помощью МРС. Рабочие камеры этой установки расположены вокруг общей транспортной зоны (катода), имеющей шлюзы для загрузки и выгрузки пластин. Пластины в кассетах загружаются в шлюз, а затем по одной переходят в транспортную зону, в которой постоянно поддерживается высокий вакуум. Передача пластин из одной камеры в другую осуществляется с помощью транспортного механизма. Рабочие камеры отделены от транспортной зоны с помощью затворов или диффузионно-щелевых уплотнений и имеют собственные индивидуальные откачные системы.

Основными достоинствами подобного рода установки являются:

- отсутствие в рабочей камере движущихся частей;
- отсутствие загрязнений, которые могли бы перемещаться из одной камеры в другую;
- возможность реализации в каждой рабочей камере определенного процесса (травление, очистка, осаждение различных материалов и др.) с использованием соответствующей данному процессу системы откачки на основе криогенного, турбомолекулярного или диффузионного насоса.

Повышение производительности установок достигается главным образом упрощением конструкции, увеличением выхода годных изделий, повышением надежности установки, снижением времени простоев и повышением времени полезного использования, которое должно быть около 85% (причем из 15 простоев 10% — планируемые простои на профилактику и только ~5% — непланируемые простои).



Развитие магнетронного метода осаждения в производстве СБИС идет в направлении:

расширения области применения (использование МРС для получения пленок тугоплавких металлов, их силицидов, а также диэлектриков и многослойных структур);

расширения технологических возможностей МРС (распыление на постоянном токе, ВЧ-распыление, одновременное распыление нескольких мишеней, распыление в среде реактивного газа и др.);

использования приемов, стимулирующих и улучшающих качество пленок (использование материалов мишеней особой степени чистоты, применение ионного травления в едином вакуумном цикле для очистки пластин непосредственно перед осаждением пленок, подача напряжения смещения на пластину, нагрев пластин перед и в процессе осаждения пленок);

улучшения конструкций катодных узлов с целью увеличения полезного использования материала мишени (до 80—90%), повышения скорости осаждения (до 0,5 мкм/мин для Al), повышения коэффициента заполнения ступенек (до 0,5), уменьшения допустимой неравномерности пленок по толщине (до  $\pm 2\%$ ), увеличения количества осаждаемых слоев (3 и более) и числа компонентов в составе каждого слоя (3 и более), увеличения энергетической эффективности процесса и повышения производительности оборудования (до 100 пластин/ч);

использования управляемых источников питания МРС большой мощности (до 20 кВт), имеющих малую массу и габаритные размеры и обладающих высокой стабильностью и надежностью;

совершенствования вакуумных систем в направлении повышения чистоты вакуума за счет использования крионасосов в качестве основного откачного средства и «безмасляных» форвакуумных насосов в качестве вспомогательных откачных средств;

осуществления операций загрузки и выгрузки пластин из кассеты в кассету через шлюз с целью устранения контакта оператора с пластинами и последующего удаления его из производственного помещения для построения в будущем полностью автоматизированного производства;

применения мелкогрупповой или индивидуальной загрузки и выгрузки пластин с использованием шлюзовых устройств с вертикальным расположением пластин в процессе нанесения на них тонкопленочных слоев с целью устранения возможности загрязнения пластин микрочастицами с мишени и со стенок рабочей камеры;

возможности встраивания в чистые комнаты с минимально занимаемой площадью и частичным применением роботов, при использовании которых количество загрязняющих частиц, вно-

симых установкой на единицу площади пластины, не должно превышать заданного (менее 0,1 частиц размером 0,5 мкм на 1 см<sup>2</sup>);

внедрения АСУ на базе микроЭВМ для обеспечения управления процессом загрузки и выгрузки пластин, их перемещения, последовательности проведения операций и поддержания требуемых параметров процесса (мощность, состав и давление рабочего газа, ширина зоны эрозии, скорость осаждения и др.).

К промышленным установкам для осаждения пленок с помощью МРС предъявляются следующие требования:

### I. Общие требования

Непрерывность действия с производительностью до 100 пластин в 1 ч. Простота, надежность и безотказность в работе. Диаметр обрабатываемых пластин до 200 мм. Мелкогрупповая или поштучная загрузка — выгрузка пластин с помощью шлюзовых устройств при использовании роботов. Кассетная транспортировка пластин. Вертикальное расположение пластин в процессе обработки. Обеспечение встраивания в чистую комнату и удобства технического обслуживания установки.

### II. Требования к предварительной обработке

Травление и очистка в едином вакуумном цикле с неравномерностью менее  $\pm 5\%$ . Низкоэнергетическое воздействие на пластину в процессе очистки (ниже 0,5 кэВ). Контролируемый предварительный нагрев пластин. Высокая степень очистки рабочих газов.

### III. Требования к источнику нанесения пленок

Возможность работы на постоянном токе и токе высокой частоты. Возможность одновременного распыления материалов из нескольких независимых источников для получения пленок многокомпонентного состава. Возможность использования нескольких мишеней для получения многослойных структур в едином вакуумном цикле. Возможность подачи напряжения смещения на подложку. Малая неравномерность пленки по толщине ( $\leq 2\%$ ). Высокая степень покрытия «ступенек» ( $> 50\%$ ). Обеспечение минимального уровня привнесенных дефектов ( $< 0,5 \text{ см}^{-2}$ ).

### IV. Требования к вакуумной системе

Откачка без использования масел в насосах (в том числе в формвакуумных). Вакуумная блокировка рабочих камер. Плавный напуск предварительно очищенных рабочих газов.

## V. Требования к системе управления

Автоматическое управление на базе микропроцессоров и микроЭВМ с обеспечением управления последовательностью операции, параметрами процесса, самодиагностики. Активный контроль и адаптивное управление параметрами процесса с отображением информации на дисплее. Связь с ЭВМ высшего уровня с помощью стандартных протоколов.

Внедрение пластин большого диаметра (150—200 мм) требует перехода к процессам индивидуальной обработки, поскольку эти процессы:

легче поддаются автоматизации и механизации, контролю состояния поверхности пластин и времени окончания процесса;

легко обеспечивают изменение пространственного расположения пластин, а при вертикальном расположении пластин существенно снижается дефектность;

снижают ограничения по выбору конструкционных материалов, позволяют легче осуществлять управление переходными процессами, благодаря меньшим габаритам легче встраиваются в чистые комнаты и в состав автоматических поточных линий, легче позволяют реализовать активацию и интеграцию процессов;

более подходят для мобильной перестройки при многономенклатурном производстве ИС, обеспечивают резервирование в АПЛ;

обеспечивают более высокий коэффициент использования оборудования, ритмичность производства и равномерное энергопотребление.

Однако не следует забывать, что переход к индивидуальной обработке пластин требует более высоких начальных капиталовложений и расходов на эксплуатацию оборудования, которое работает в более интенсивном режиме и требует более высокой надежности на единицу продукции. Кроме того, при этом увеличивается интенсивность работы внутрикамерных механизмов, а также теплового и радиационного воздействия на обрабатываемые пластины.

Особо остро стоят вопросы о создании транспортных каналов между отдельными установками, в которых производится обработка пластин. Жесткие транспортные системы между установками с использованием вакуума, несмотря на принципиальную возможность обеспечения высокой чистоты, очень сложны и малонадежны в эксплуатации и могут стать аккумуляторами пыли. По-видимому, наиболее вероятными транспортными средствами являются конвейер, робот и закрытая система с ламинарным потоком газа, сопрягаемая с вакуумными шлюзами.

Суущественные трудности возникают в унификации устройств загрузки — выгрузки и объединения в линию установок, значи-

тельно отличающихся по производительности. Вопрос надежности и гибкости связи между отдельными установками приобретает в этом случае первоочередное значение.

Травление и очистка пластин перед осаждением пленок в едином вакуумном цикле позволяют снизить уровень загрязнений, получить хорошую текстуру, адгезию, микроструктуру и снизить электромиграцию в пленках. Подача смещения на пластины позволяет снизить уровень загрязнений в растущей пленке, повысить равномерность осаждения конденсата и его плотность, увеличить коэффициент покрытия ступенек, снизить внутренние напряжения в пленке, повысить скорость и равномерность процесса травления пленок. Кроме того, с помощью смещения может быть реализован процесс планаризации рельефа как при осаждении металлов, сплавов и силицидов, так и при осаждении диэлектриков.

## Глава 5

### ОСАЖДЕНИЕ И ТРАВЛЕНИЕ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

#### 5.1. МЕХАНИЗМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ, ВИДЫ И КОНСТРУКЦИИ АВТОНОМНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Удаление поверхностных слоев материала мишени при ионно-лучевом распылении (ИЛР), так же как и при ионно-плазменном распылении (ИПР), реализуется в результате физического распыления энергетическими ионами инертных газов или ионами, которые химически не реагируют с материалом мишени. Однако в отличие от ИПР при ИЛР поверхность мишени не имеет непосредственного контакта с плазмой и последняя используется только в качестве источника ионов, осуществляющих процесс распыления мишени. Эффективность реализации ИЛР зависит от оптимального выбора составляющих стадий этого процесса (генерации ионов, распространения пучка ионов в вакууме и взаимодействие пучка ионов инертного газа с поверхностью материала мишени).

Поскольку процессы ИЛР обычно реализуются с помощью автономных ионных источников (АИИ), эффективность процесса ИЛР в первую очередь зависит от конструкции и параметров АИИ, который должен обеспечить получение, экстракцию, фокусировку и нейтрализацию ионов, а также возможность сканирования сфокусированного ионного луча по поверхности мишени.

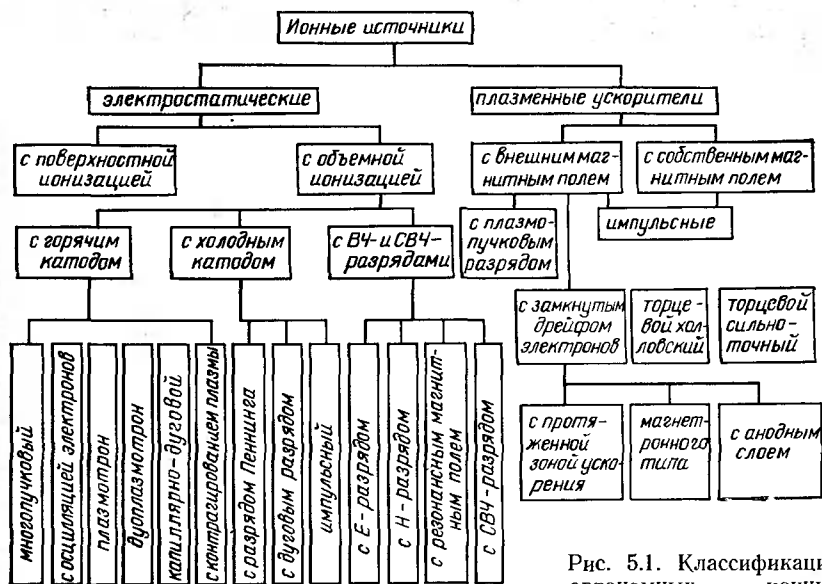


Рис. 5.1. Классификация автономных ионных источников

При распространении ионного луча в вакууме существенное влияние на процесс ИЛР оказывает длина свободного пробега ионов, объемный заряд, расходимость и состав пучка. Длина свободного пробега ионов определяется сечением процессов взаимодействия частиц в пучке и должна превышать расстояние между АИИ и мишенью. В случае взаимодействия одноименных ионов и атомов определяющим является поперечное сечение процесса резонансной перезарядки, которое для ионов Ag с энергией 500 эВ равно  $0,23 \text{ нм}^2$ , что соответствует при давлении  $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  средней длине свободного пробега ионов 130 см.

Поскольку объемный заряд ионов вызывает расходимость пучка, а их заряд на поверхности существенно снижает скорость распыления диэлектрических материалов, то он должен быть нейтрализован пучком электронов.

К числу достоинств ИЛР относятся:

простота процесса и возможность легкого управления им с помощью четырех легко измеряемых и контролируемых параметров (энергии, угла падения ионов, плотности ионного тока и давления газа), которые в используемом при ИЛР диапазоне давлений не зависят друг от друга;

универсальность процессов, позволяющая при нейтрализации ионного потока проводить ИЛР практически любого материала; высокая равномерность распыления;

Таблица 5.1. Параметры и характеристики ионных источников

Параметр и характеристика	Электростатический источник Кауфмана	Источник с седлообразной формой электростатического поля	Источник магнетронного типа	Ускоритель с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной (УЗДП)	Ускоритель с анодным слоем (УАС)
Условия поддержания разряда	Несамостоятельный разряд, необходим эмиттер	Самостоятельный разряд	Самостоятельный разряд	Несамостоятельный разряд, необходим эмиттер	Несамостоятельный разряд, необходим эмиттер (может быть использована вторичная электронная эмиссия)
Давление в камере, Па	$(1-5) \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$(4-9) \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}-10^{-4}$	$(2-8) \cdot 10^{-2}$
Диапазон энергий, кэВ	0,5—3	0,5—5	0,3—1	0,05—0,5	0,8—3
Максимальный разрядный ток, А	3	2	2	5	3
Максимальная плотность тока пучка, мА/см <sup>2</sup>	1,5	0,5	1,5	До 100*	До 10
Способ нейтрализации пучка	Источник электронов	Не требуется	Без нейтрализации	Не требуется	Обычно не требуется (при недокомпенсации — дополнительный источник электронов)
Площадь зоны обработки, см <sup>2</sup>	До 1000	До 100	До 100	До 100	До 500
Форма пучка	Круглая	Круглая или прямоугольная	Кольцевая (О-образная)	Кольцевая (О-образная)	Кольцевая (О-образная)

\* В последних конструкциях УЗДП плотность тока пучка достигает  $1 \text{ А/см}^2$  [11, 12], однако УЗДП со столь большой плотностью тока не могут быть использованы в производстве ИС.

отсутствие влияния адсорбированных газов на характер протекания процессов распыления материала мишени и осаждения пленки, поскольку оба эти процесса происходят в высоком вакууме ( $p \approx 10^{-4}$  Па).

Автономные ионные источники, используемые для реализации процессов ИЛР, можно разделить на две большие группы (рис. 5.1):

1) электростатические, в которых ионный пучок формируется с помощью электростатической ионно-оптической системы (ИОС); компенсация объемного заряда ионного пучка осуществляется на выходе из ИОС путем инжекции в пучок электронов из термокатода, что необходимо для распыления диэлектриков;

2) плазменные ускорители, которые создают поток ионов с компенсированным объемным зарядом [110].

Для реализации процессов распыления, а также предварительной очистки (травления) поверхностей перед нанесением на них пленочных покрытий могут быть использованы многопучковые ионные источники (МИИ), которые часто называют источниками Кауфмана [113, 114], АИИ с седловидной формой электрического поля [115], АИИ на базе ускорителей с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП) [116, 117], АИИ на базе ускорителей с анодным слоем (УАС) [118, 119], АИИ магнетронного типа с полым катодом [120, 121], АИИ с плазмопусковым разрядом [122] и др. Типичные параметры и характеристики АИИ приведены в табл. 5.1.

## 5.2. МНОГОПУЧКОВЫЕ ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

В МИИ разряд образуется в однородном продольном магнитном поле  $\vec{B}$  внутри цилиндрического анода, создающего электрическое поле  $\vec{E}$ , перпендикулярное, в общем случае, линиям магнитного поля. Эта конфигурация взаимодействующих магнитного и электрического полей позволяет локализовать разряд между стенками анодного цилиндра накаленным катодом, эмиттирующим высокоэнергетические электроны, и ионно-оптической экстрагирующей системой таким образом, что торцы анодного цилиндра, которые имеют одинаковый с катодом потенциал, служат электронными зеркалами. Существенная особенность МИИ — явление осцилляции электронов в  $\vec{E} \times \vec{B}$ -полях, при котором они движутся в разрядном пространстве по спиралеобразным траекториям, что приводит к значительному повышению эффективности ионизации рабочего газа, а также наличие двух- или трехэлектродной многоапертурной ионно-оптической системы (ИОС), расположенной на выходном торце анодного цилиндра и предназначенной для экстракции и ускорения ионов до

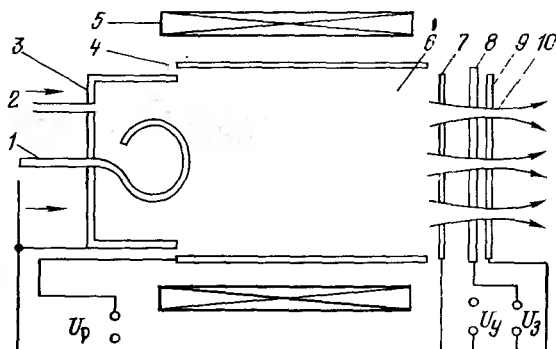


Рис. 5.2. Схема расположения электродов и принцип действия МИИ:  
 1 — термокатод; 2 — ввод рабочего газа; 3 — экран катода; 4 — цилиндрический анод; 5 — соленоид; 6 — плазма; 7 — отражательно-эмиссионный электрод; 8, 9 — ускоряющий и замедляющий электроды; 10 — ионный пучок;  $U_p$  — напряжение разряда;  $U_y$  — ускоряющее напряжение;  $U_z$  — замедляющее напряжение

необходимых энергий и для формирования многопучкового сфокусированного ионного потока требуемой формы.

Система электродов МИИ (рис. 5.2) [113] состоит из термокатода, анодного цилиндра и отражательного электрода, который одновременно выполняет функцию эмиссионного электрода системы извлечения, т. е. содержит эмиссионные отверстия. Эмиттированные катодом первичные электроны, ускоряющиеся в двойном слое катодного падения потенциала, движутся по спиральным траекториям вдоль линий магнитного поля и, осциллируя в потенциальной яме между катодом и отражательным электродом, ионизуют рабочий газ. Благодаря осцилляциям время жизни электронов и вероятность ионизации существенно увеличиваются, так что в стационарном разряде достигается плотность плазмы около  $10^{12}$  см $^{-3}$  уже при давлении порядка  $10^{-2}$  Па и напряжении разряда до 25 В. Радиус плазменного столба, возникающего между катодом и отражательным электродом, из-за условий квазинейтральности плазмы равен в первом приближении радиусу области, занятой первичными электронами. Возникающие при ионизации более медленные электроны плазмы преимущественно компенсируют пространственный заряд ионов, но могут и ионизовать газ при поглощении соответствующей энергии вследствие взаимодействия с электрическим полем и частицами плазмы. При взаимодействии с частицами рабочего газа электроны получают импульсные компоненты в радиальном направлении. Возникающий при этом радиальный диффузионный ток электронов в направлении анода главным образом представляет собой ток разряда. Ток положительных ионов протекает к катоду и к отражательному электроду вследствие существующих падений потенциалов. Потен-



циал плазмы может быть ниже и выше потенциала анода. Его отклонение от анодного потенциала может достигать нескольких десятков вольт и зависит от размеров разрядной камеры, потенциала анода, напряженности магнитного поля, а также давления рабочего газа. В аксиальном направлении, начиная от центра разряда, обычно имеет место небольшое падение потенциала.

В рассматриваемом типе АИИ ионный пучок извлекается через отверстия отражательного электрода. Плотность плазмы при неизменном токе первичных электронов с уменьшением длины разрядной камеры (анодного цилиндра) вначале возрастает, а потом снижается из-за возрастающих потерь ионов вследствие увеличения доли площади с потенциалом катода и уменьшения доли площади с потенциалом анода. Следовательно, при заданных рабочих параметрах АИИ и ИОС может быть выбрано оптимальное отношение радиуса анода к длине разрядной камеры, при котором может быть обеспечен максимальный ионный ток [113, 114].

Увеличение плотности плазмы и ее более гомогенное распределение в радиальном направлении достигаются при использовании чашеобразного катодного экрана, действующего как короткий полый катод. Кольцеобразный термокатод вызывает более однородное радиальное распределение плотности плазмы по сравнению с круглым термокатодом с такими же площадью и плотностью эмиттированного электронного тока. Этот же результат достигается и при использовании неоднородных магнитных полей с напряженностью, падающей в направлении отражательного эмиссионного электрода.

Применение МИИ для прецизионного распыления и травления микроструктур требует особого подхода к расчету и конструированию отдельных узлов. Определяющее влияние на эффективную работу МИИ оказывают:

выбор способа получения ионизирующих энергетических электронов (горячий эмиттер, холодный катод и т. д.), обеспечивающего высокую надежность, высокую электронную эмиссию и, по возможности, длительную работу катода в атмосфере как инертных (по ионно-химическому механизму), так и активных (по ионно-физическому механизму) газов;

оптимизация конструкции анодного узла и магнитной системы, образующих зону разряда в скрещенных  $\vec{E} \times \vec{B}$ -полях и предназначенных для обеспечения максимальной эффективности ионизации рабочего газа в разрядной камере, а также формирования однородной и плотной плазмы на границе разрядной камеры и ИОС;

расчет и оптимизация конструкции многоапертурной ИОС, предназначенной для формирования необходимого числа сфокусированных ионных пучков, которые образуют ионный поток

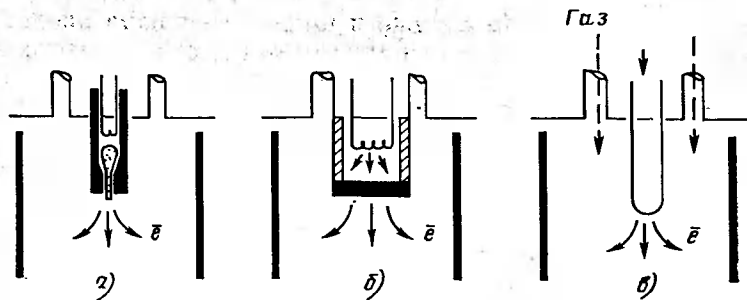


Рис. 5.3. Катодные узлы МИИ:

а — с полым катодом; б — с катодом косвенного нагрева; в — с прямональным катодом

требуемой для заданного технологического процесса формы с максимально однородными параметрами;

выбор способа нейтрализации объемного заряда ионного потока на выходе из ИОС.

МИИ содержат термокатод, являющийся эмиттером ионизирующих энергетических электронов (от  $-30$  до  $-50$  эВ), которые под действием разрядного потенциала (60 В), приложенного между катодом и анодом (или разрядной камерой), ускоряются в направлении стенок анодного цилиндра, взаимодействуют с атомами рабочего газа и ионизуют его. Поэтому катодный узел должен обеспечить достаточно высокую концентрацию и температуру электронов, а также стабильность этих параметров во времени. Помимо этого, катод должен быть долговечным (с ресурсом не менее 100 ч), а конструкция катодного узла должна позволять быструю замену катода. От материала катода и конструкции всего узла в целом во многом зависит эффективность работы МИИ, особенно с потоками большого диаметра (например, для формирования ионного потока диаметром 25 см нужно иметь в 10 раз больший катодный ток, чем для потока диаметром 7,5 см).

Обычно в МИИ применяют три основных вида катодных узлов:

с полым катодом (рис. 5.3,а), в котором при достаточно малых размерах апертуры может быть получен значительный электронный ток;

с катодом косвенного нагрева (закрытого катода) (рис. 5.3,б), в котором нить накала, эмиттирующая первичные электроны, закрыта тонкостенным металлическим цилиндром. Первичные электроны интенсивно бомбардируют внутреннюю поверхность цилиндра и нагревают ее, в результате чего энергетические электроны эмиттируются в объем разрядной камеры;

с катодом прямого нагрева (рис. 5.3,в), который применяется

в большинстве ионных источников рассматриваемого типа, включая и многопучковые.

Термокатод, как правило, изготавливают из тугоплавких материалов (в виде ленты или проволоки), обладающих сравнительно хорошими эмиссионными характеристиками ( $W$ ,  $T_a$ ). В ряде случаев для улучшения эмиссионной способности его покрывают пленками оксидов щелочноземельных элементов, что, однако, может вызывать загрязнение ионного потока вследствие распыления покрытия. Существенным недостатком термокатода является относительно низкая его долговечность при работе в атмосфере инертных и особенно реактивных газов (например,  $O_2$ ). Поэтому все большее внимание уделяют созданию катодных узлов с полим катодом (рис. 5.3,а), применение которых позволяет работать с инертными и с реактивными газами.

Эффективность ионизации газа эмиттированными с катода электронами зависит от ряда факторов, в частности от конфигурации накала и размещения катодного узла в разрядной камере. При обычном (продольном) варианте размещения катода (рис. 5.4,а) в разрядной камере вероятность столкновения электронов с атомами газа в прикатодной области, где образуется зона сравнительно плотной плазмы, высокая, а степень ионизации у стенок анодного цилиндра, где располагается обедненная ионами зона разряда, — низкая. Это приводит к образованию неоднородной плазмы на границе ее с экстрагирующей системой и вызывает ухудшение параметров ионного потока. Этот недостаток устраняется, если в качестве катода используются четыре идентичные нити накала, расположенные около стенок анодного цилиндра (рис. 5.4,б). Токовводы обычно располагают в стенках анодного цилиндра или на его торце, противоположном ИОС. Электрическое соединение токовводов выполнено так, что четыре катода работают в параллель. Благодаря этому увеличиваются плотность плазмы у стенок разрядной камеры и однородность плазмы вдоль поверхности ИОС и ионного потока.

Эмиттированные катодом электроны до ионизирующего столкновения с атомом рабочего газа должны пройти значительное расстояние (в среднем около 1 м). Поскольку это расстояние значительно больше диаметра разрядной камеры любого ионного источника, необходимо принимать специальные меры для удержания в ней электронов. Наилучшим способом удержания электронов в объеме разрядной камеры является снижение радиальной (относительно оси разрядной камеры) составляющей его скорости за счет использования магнитного поля  $\vec{B}$ , прикладываемого перпендикулярно к имеющемуся в камере электрическому полю  $\vec{E}$ . В результате этого электрон испытывает многочисленные столкновения с атомами газа и успевает осуществить ионизацию газа до попадания на поверхность анода, поскольку в скрещенных  $\vec{B} \times \vec{E}$ -полях он находится в своеобраз-

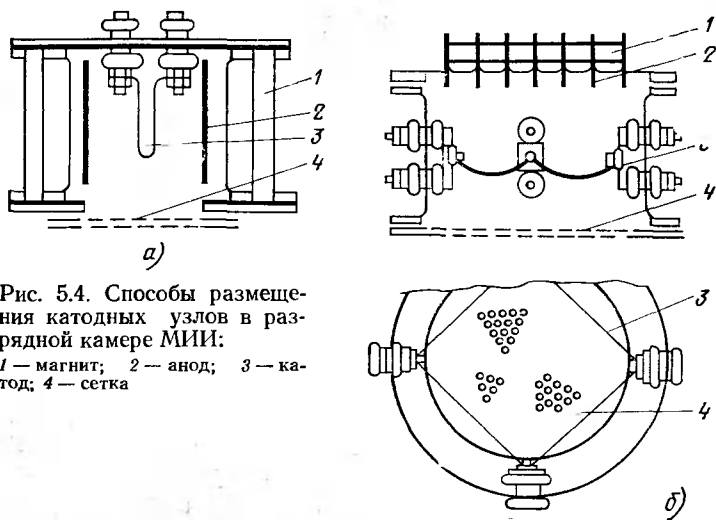


Рис. 5.4. Способы размещения катодных узлов в разрядной камере МИИ:

1 — магнит; 2 — анод; 3 — катод; 4 — сетка

ной «ловушке», удерживающей его достаточно длительное время в зоне разряда.

В реальном ионном источнике обычно трудно получить однородное магнитное поле, линии которого были бы перпендикулярны линиям электрического поля по всей длине разрядной камеры, поэтому электрон совершает сложное движение, что в общем случае приводит к увеличению эффективности ионизации газа. Кроме того, изменяя магнитную индукцию и направление силовых линий магнитного поля, можно получить относительно равномерную ионизацию газа по всему объему камеры и тем самым создать на границе экстрагирующей сетки область плазмы одинаковой плотности, что, в свою очередь, обеспечит достижение хорошей коллимации ионного потока. Последнее обстоятельство имеет исключительно важное значение при ионном травлении поверхности пластины перед осаждением на нее пленки.

В первых конструкциях МИИ сравнительно однородное магнитное поле было ориентировано вдоль оси разрядной камеры (рис. 5.5,а), что обуславливало сильную неоднородность плазмы на границе с экстрагирующей сеткой и сравнительно небольшой диаметр ионного пучка.

Использование источника с расхождением силовых линий магнитного поля вызывает уменьшение магнитной индукции в направлении экстрагирующей сетки и уменьшает потери в разряде. В различных вариантах использования расходящегося поля (рис. 5.5,б, в) удастся сформировать область плазмы по всей площади экстрагирующей сетки и создать ионный пучок значи-

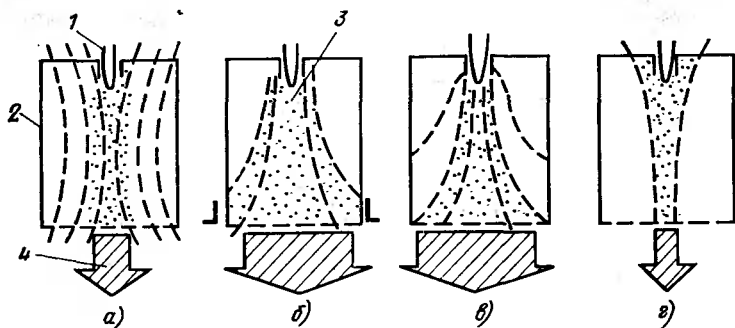


Рис. 5.5. Характер распределения магнитного поля в разрядной камере МИИ: а — однородное; б — расходящееся закрытое; в — расходящееся открытое; г — сходящееся; 1 — катод; 2 — анод; 3 — первичные электроны — зона плазмы; 4 — ионный пучок

тельно большего диаметра, чем в случае однородного поля. Однако и в системах с расхождением силовых линий магнитного поля плотность плазмы в зоне оси разрядной камеры несколько выше, чем в остальном объеме: отношение плотности тока в центре ионного потока и на его периферии равно 0,4—0,6 и существенно возрастает с увеличением диаметра потока. Для повышения однородности ионного потока принимаются специальные меры: увеличение диаметра разрядной камеры относительно диаметра экстрагирующей сетки, что позволяет отбирать ионы со средней (наиболее однородной) части границы плазмы (правда, это требует увеличения мощности источников питания МИИ); оптимизация с помощью ЭВМ расчетной магнитной индукции, поскольку уменьшение напряженности поля способствует улучшению однородности ионного потока, хотя и приводит к увеличению потерь в области разряда и снижению общего ионного тока МИИ. Конструкция обычной магнитной системы с электромагнитом (рис. 5.6,а) образует аксиальное, расходящееся к экстрагирующей сетке, поле. Несмотря на то что в этом случае ионный поток характеризуется значительной неоднородностью, подобные конструкции используются в технологических МИИ [113].

Повышение однородности ионного потока может быть достигнуто путем использования магнитных систем с сильно расходящимся полем. Многополюсные магнитные системы (рис. 5.6,б, в) позволяют получать пучки большого диаметра с высокой однородностью потока (отношением плотностей ионного тока в центре и по периферии 0,9), создавать очень сильное поле в зоне анода (или анодов) и снижать напряженность поля в объеме камеры, в результате чего высокоэнергетические электроны могут попадать в любую часть разрядной камеры.

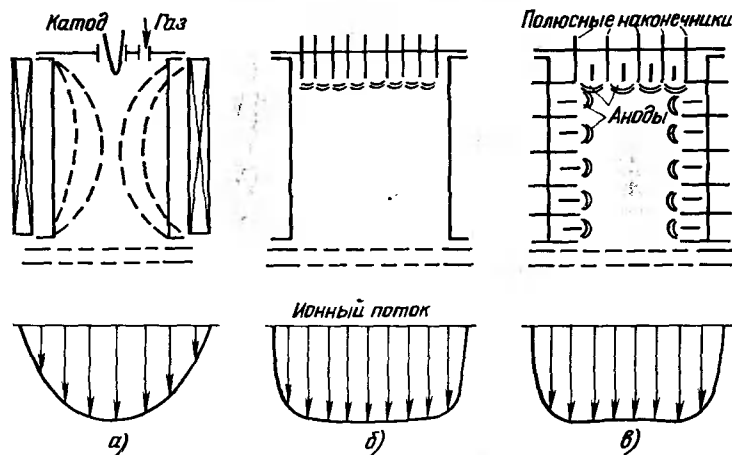


Рис. 5.6. Схемы магнитных многополюсных систем

Для получения расходящегося магнитного поля помимо электромагнитов (рис. 5.7,а) используют постоянные магниты с полюсными наконечниками, в зоне которых (где напряженность поля минимальна), как правило, располагают один или несколько дискретных анодов. В конструкции, которая является базовой для МИИ фирмы Ion Technology, постоянный магнит расположен с тыльной (катодной) стороны разрядной камеры, а магнитное поле формируется с помощью тонких (около 0,6 мм) полюсных наконечников из коррозионностойкого магнитного материала (рис. 5.7,б). Конструкция, изображенная на рис. 5.7,в, отличается от предыдущей наличием более сложной магнитной системы (постоянные магниты с полюсными наконечниками), которая находится в разрядной камере, и большего числа дискретных анодов в промежутке между полюсными наконечниками, т. е. в местах, где напряженность магнитного поля максимальна. С целью повышения однородности плазмы в объеме разрядной камеры в данной конструкции используется система из четырех идентичных катодов. Поле создается цилиндрическими постоянными магнитами, которые размещаются между полюсными наконечниками из полос низкоуглеродистой стали. Магнитная индукция резко снижается при удалении от полюсных наконечников, и в объеме камеры она незначительна. Распределение плотности ионного тока по сечению ионного потока диаметром 30 см (рис. 5.7,г) достаточно однородно (около 0,9). В источнике подобного типа изменение расстояния от экстрагирующей сетки до мишени лишь незначительно ухудшает однородность ионного потока.

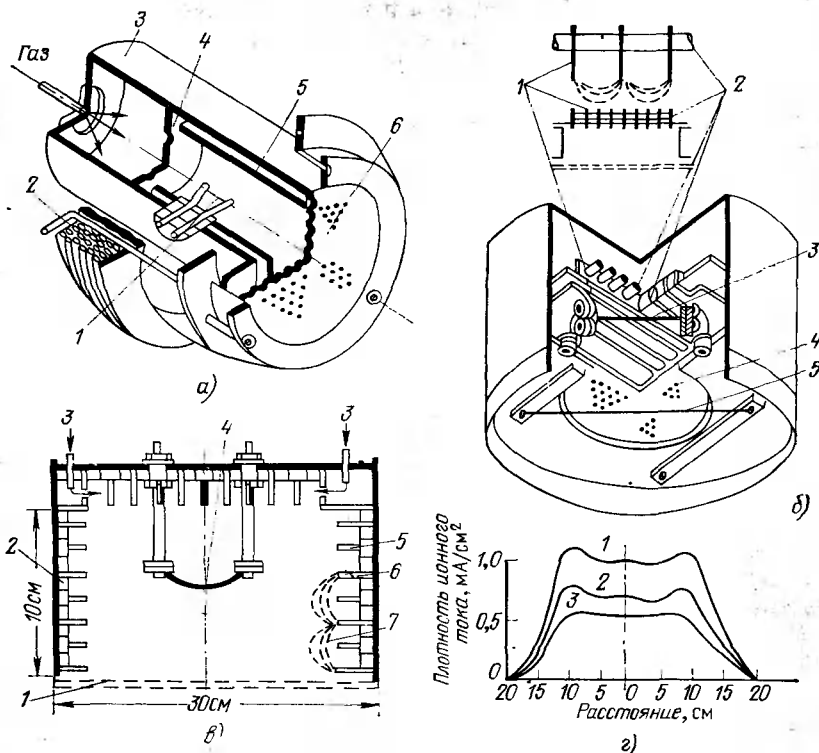


Рис. 5.7. Конструкция МИИ с электромагнитом, образующим расходящееся магнитное поле (а) (1 — катод; 2 — катушка электромагнита; 3 — корпус; 4 — распределитель газового потока; 5 — анодный цилиндр; 6 — сетка) с многополюсной магнитной системой (б) (1 — полюсные наконечники; 2 — постоянные магниты; 3 — катод; 4 — сетка; 5 — нейтрализатор), с многоанодной системой (в) (1 — сетка; 2 — постоянные магниты; 3 — подача газа; 4 — катод; 5 — аноды; 6 — полюсные наконечники; 7 — линии магнитного поля) и распределение плотности ионного тока при диаметре пучка 30 см (г)

В МИИ обычно применяют многоапертурную ИОС, которая предназначена для одновременной экстракции ионов с границы плазмы, первичной фокусировки ионного потока большого диаметра, состоящего из множества (до 1000) ионных пучков, формирования каждого пучка в отдельности, фокусировки ионного потока в целом, а также для ускорения ионов до энергий 100—2000 эВ. При этом должны быть обеспечены минимальные потери мощности источников питания и минимальная эрозия сеток ИОС при длительной эксплуатации МИИ. Чаще всего ИОС представляет собой блок из двух (реже трех) сеток с отверстиями одинакового диаметра, число которых определяет коли-

чество отдельных ионных пучков в потоке. В качестве сеток могут использоваться плоские или изогнутые в сторону разрядной камеры тонкие металлические или графитовые диски, причем от их формы в значительной мере зависит фокусировка ионного потока. Наиболее широкое распространение в МИИ находят ИОС с плоскими сетками.

Трехсеточная ИОС состоит из трех абсолютно идентичных многоапертурных электронов с одинаковыми отверстиями определенного диаметра, причем отверстия во всех сетках расположены соосно. Каждая из сеток (экстрагирующая, ускоряющая и замедляющая) соединена со своим источником питания, и во время работы АИИ имеет определенный потенциал по отношению к потенциалу плазмы. Многоапертурная ИОС такого типа имеет экстрагирующие отверстия, число которых на единице площади сетки зависит от параметров плазмы в разрядной камере (особенно на ее границе с экстрагирующей сеткой) и от ускоряющего напряжения. Степень прозрачности такой системы характеризуется отношением общей площади экстрагирующих отверстий к площади сетки. Степень прозрачности ИОС стремятся увеличить до максимальной возможной, учитывая энергию ионов, ускоряющего напряжения и эффективность нейтрализации объемного заряда ионного потока.

Экстрагирующая сетка предназначена для формирования границы плазмы заданной формы. Эта сетка расположена в непосредственной близости от разрядного пространства и находится, как правило, под потенциалом плазмы (катода). Экстрагирующая сетка выполняет также первичное формирование многопучкового ионного потока за счет экранирования части границы плазмы от воздействия вытягивающего потенциала ускоряющей сетки. Ускоряющая сетка, находящаяся под значительным отрицательным потенциалом относительно первой сетки, предназначена для экстракции ионов с границы плазмы и их ускорения до заданной энергии. Наличие на ней достаточно высокого регулируемого отрицательного потенциала позволяет формировать границу плазмы различной конфигурации, в результате чего ионный пучок внутри ИОС имеет сначала сходящуюся, а затем расходящуюся форму. Замедляющая сетка находится под нулевым потенциалом (заземлена) и предназначена для окончательной фокусировки ионных пучков с целью получения максимальной плотности ионного тока, что особенно важно при экстракции плотных низкоэнергетических ионных пучков. При экстракции ионов с границы плазмы, вогнутой внутрь разрядной камеры, и большом отрицательном потенциале ( $-8$  кВ) на ускоряющем электроде эквипотенциальные линии располагаются таким образом, что образует электростатическую линзу. Трехсеточная конструкция фокусирует пучок вдоль оси отверстий сеток.



В двухсеточной ИОС для увеличения плотности тока (при использовании однозарядного иона определенной массы, например  $\text{Ag}^+$ ) необходимо в нужных пределах увеличивать ускоряющее напряжение и снижать расстояние между сетками (оно ограничено термическим эффектом, резким повышением вероятности электрических пробоев и т. д.). В связи с этим при необходимости дальнейшего уменьшения расстояния между сетками в МИИ используют трехсеточную ИОС с замедляющим электродом, расположенным сразу после ускоряющего, что позволяет при достаточно больших расстояниях увеличить отрицательный потенциал на ускоряющей сетке, а уменьшение энергии ионного потока до заданного значения (особенно при работе с низкоэнергетическими пучками) выполнять за счет третьей, замедляющей сетки.

При использовании двухсеточной ИОС (рис. 5.8) [113] и отсутствии внешнего напряжения на экранирующей и ускоряющей сетках обе они находятся в зоне разряда под потенциалом плазмы (рис. 5.8,а). В этом случае четкая граница плазмы отсутствует и экстракции ионов не происходит. При подаче отрицательного потенциала на ускоряющую сетку у границы отверстия первой сетки образуется граница плазмы определенной формы (рис. 5.8,б—д). Увеличение отрицательного потенциала приводит к перемещению границы плазмы к отверстию экранной сетки (рис. 5.8,б), и в конечном счете формируется граница плазмы внутри разрядной камеры (рис. 5.8,г). В расфокусированных режимах формирования ионного пучка (рис. 5.8,б, в) экстрагируемые с границы плазмы ионы интенсивно бомбардируют обратную сторону ускоряющей сетки, что вызывает ее эрозию и попадание распыленного материала сетки как в рабочую камеру, так и на обрабатываемые структуры. Такой режим работы ИОС характеризуется большими потерями и малой плотностью ионного тока в расфокусированном пучке. Подобного рода режим работы ИОС может быть также следствием повышения плотности ионов на границе плазмы. При очень высоком отрицательном потенциале на ускоряющей сетке (рис. 5.8,г) ИОС работает как фокусирующая линза, траектории ионов начинают пересекаться, что также снижает эффективность работы АИИ. Существует оптимальное для каждой конкретной ИОС значение ускоряющего потенциала  $U_{ус}$ , при котором прямая бомбардировка ионным пучком обратной стороны ускоряющей сетки сводится к минимуму (рис. 5.8,д), а большая часть экстрагированных ионов движется в сторону ускоряющей сетки по траекториям, близким к нормали к ее поверхности, а ионные пучки и ионный поток в целом большого сечения хорошо коллимированы, что весьма существенно при ионном распылении и в особенности травления микроструктур. Таким образом, эффективность работы ИОС и ионного источника в целом зависит

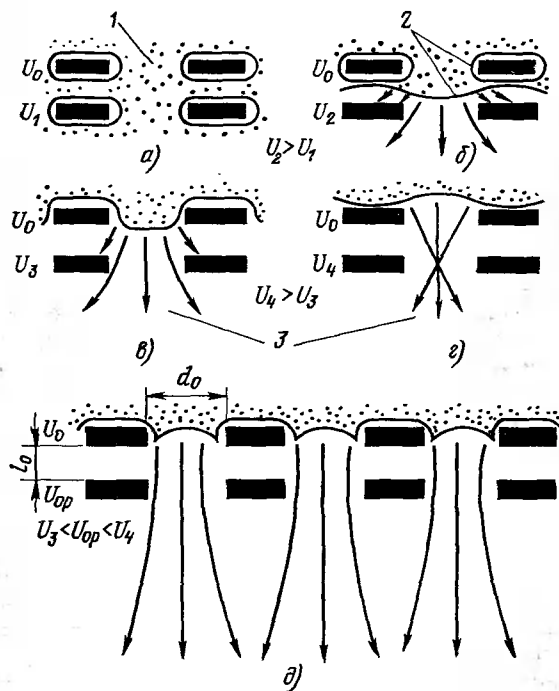


Рис. 5.8. Экстракция и фокусировка ионного пучка в двухсеточной ИОС:

1 — плазма; 2 — граница плазмы; 3 — ионный поток

от геометрии (прозрачности) и взаимного расположения сеток, а также от правильного выбора соотношения потенциалов в ИОС.

Для создания качественной ИОС для многопучковых ионных источников необходимо обеспечить:

максимальную площадь отверстий, формирующих отдельные ионные пучки (максимальную прозрачность ИОС), при оптимально выбранном соотношении между диаметром отверстий и расстоянием между ними;

минимальное расстояние между экранной и ускоряющей сетками, исключающее в то же время возможность электрического пробоя в междусеточном промежутке;

минимальную толщину сеток, обеспечивающую их механическую прочность при повышенных (570—670 К) температурах и стабильность междусеточного промежутка;

изготовление сеток из тугоплавких материалов (молибдена, графита) с относительно низким температурным коэффициентом расширения и минимальным коэффициентом распыления;

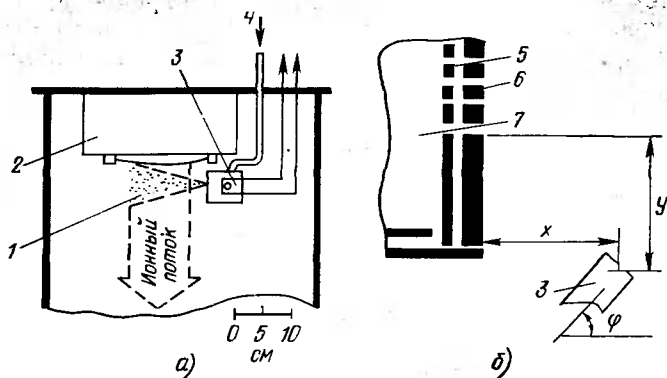


Рис. 5.9. Способы нейтрализации объемного заряда ионного потока с помощью источника с полым катодом:

1 — плазменный поток; 2 — МИИ; 3 — полый катод; 4 — напуск газа; 5 — экранная сетка; 6 — ускоряющая сетка; 7 — разрядная камера

возможность оптической юстировки для получения полной соосности отверстий в сетках.

Поскольку объемный заряд вызывает расфокусировку и плохую коллимацию ионного пучка, на выходе ионного потока из ИОС необходима его нейтрализация. Кроме того, появление на поверхности диэлектрика положительного заряда практически не позволяет использовать МИИ с ионным потоком большого диаметра для распыления и травления диэлектриков и даже металлов в том случае, если энергия ионов менее 1 кэВ. Нейтрализация обычно производится путем инжекции в пучок электронов. При этом рекомбинация электронов и ионов, как правило, сопровождающаяся образованием нейтральных атомов, не происходит, а обеспечивается лишь компенсация заряда в объеме ионного потока. Наиболее простым методом получения нейтрализующих электронов является использование внешних термоионных эмиттеров, расположенных вблизи ионного потока или погруженных непосредственно в ионный поток. Эффективное использование внешнего эмиттера ограничено ионными пучками только малого диаметра. Для МИИ большого диаметра эмиттер погружается в ионный поток. Обычно такой эмиттер изготавливается из вольфрамовой или танталовой проволоки, протянутой через ионный поток в непосредственной близости (например, на расстоянии 1,5 см) от ускоряющей сетки. Однако подобного рода нейтрализаторы имеют ряд существенных недостатков: эрозия металлической нити, расположенной внутри ионного потока, сокращает срок службы эмиттера (в зависимости от энергии ионов и плотности ионного тока он не превышает сотни часов), а распыление эмиттера за счет ионной бомбардировки и

(в некоторой степени) его термическое испарение приводят к загрязнению обрабатываемых структур. Поэтому изучается возможность применения других, более эффективных внешних нейтрализаторов, к числу которых относится так называемый «плазменный мост».

Подобного рода нейтрализатор (рис. 5.9) [113] располагается вне ионного потока, и в качестве источника электронов используется полый катод. Источник такого типа состоит из цилиндрической разрядной камеры, в которой размещены сопло небольшого диаметра и термоэлектронный эмиттер. При пропускании через камеру газа (как правило, Ag) в ней образуется плазма. Экстрагируясь через сопло, плазма электрически соединяется с ионным током и образует плазменный мост, который позволяет эффективно компенсировать объемный заряд ионного потока. Один из вариантов конструкции нейтрализатора с полым катодом (рис. 5.9,а) представляет собой цилиндрическую камеру диаметром 5 и длиной 5 см, соединенную с источником Ag. Внутри камеры располагается вольфрамовая нить диаметром 0,25 мм. Плазменную струю вводят через сопло диаметром 1 мм. В данном случае нейтрализатор располагают перпендикулярно оси ионного потока на расстоянии 8 см, и при относительно небольшом потенциале (20 В) достигается высокое качество нейтрализации пучка. Такое положение нейтрализатора может вызвать эрозию ускоряющей сетки (при взаимодействии с ней части плазменной струи), поэтому нужно размещать его под углом к оси ионного потока (рис. 5.9,б). При этом необходимо определить оптимальные значения потенциала на камере нейтрализатора, угла его наклона  $\varphi$  по отношению к оси потока и расстояния до ускоряющей сетки ( $x, y$ ).

Одной из существенных особенностей применения МИИ с многоапертурной ИОС является необходимость поддерживать значительный перепад давления между разрядной камерой ( $p \approx 10^{-1}$  Па) и рабочей камерой ( $p \approx 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-3}$  Па), в которой производится осаждение или травление микроструктур. Низкое давление в рабочей камере необходимо для того, чтобы снизить потери в ионном потоке и устранить возможность его расфокусировки. Кроме того, при этом снижается вероятность загрязнения обрабатываемых микроструктур остаточными газами.

Давление в разрядной и рабочей камерах прежде всего зависит от газового потока, подаваемого в разрядную камеру. Снижение потока вызывает уменьшение ионного тока и, как следствие, скорости распыления. Кроме того, на эффективность работы МИИ (и прежде всего на параметры плазмы в разрядной камере) оказывает значительное влияние способ ввода газа в разрядную камеру (рис. 5.10). При подаче газа обратным потоком со стороны ИОС (рис. 5.10,в) плотность плазмы максимальна на выходе разрядной камеры и убывает в направле-

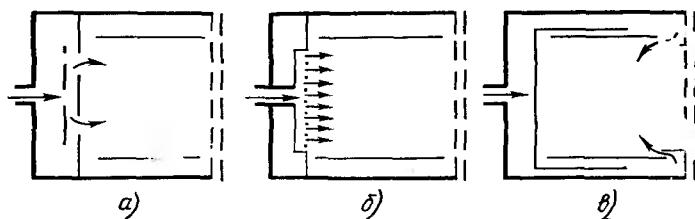


Рис. 5.10. Способы введения рабочего газа в разрядную камеру МИИ:

а, б — прямой поток; в — обратный поток

нии катода. При прямом потоке газа (со стороны катода) через одно центральное или два симметрично расположенных отверстия (рис. 5.10,а), наоборот, плотность плазмы максимальна в прикатодной области. Первый вариант ввода рабочего газа позволяет достигать значительных плотностей ионного тока, но при этом мала однородность по сечению потока. Во втором варианте ионный поток более однородный, но с низкой плотностью тока. Чаще всего в МИИ большого диаметра газ вводят прямым потоком с катодной стороны разрядной камеры через специальную сетку — газовый распределитель (рис. 5.10,б). При этом можно получить оптимальный ионный ток при достаточно хорошей коллимации потока.

Важной характеристикой плазмы является стабильность ее параметров во времени. Для этого необходимо поддерживать давление  $A_g$  в разрядной камере на постоянном оптимальном уровне, используя автоматическое регулирование скорости подачи газа с помощью регулируемых микронатекателей, для чего наиболее подходят электромагнитные вентили.

МИИ имеют ряд достоинств, обеспечивших им широкое применение в технологии СБИС, поскольку они характеризуются: низким напряжением горения разряда (начиная с 20 В), что ограничивает возможность возникновения многозарядных ионов, уменьшает возможность распыления стенок разрядной камеры, находящихся под потенциалом катода, и тем самым обеспечивает возможность получения ионного пучка с малым разбросом энергии и относительно небольшой (около  $10^{-6}$ ) концентрацией примесей;

специфическим механизмом разряда, позволяющим создавать разрядную камеру большого диаметра, что при довольно однородном распределении плотности плазмы обеспечивает извлечение однородного многолучевого ионного пучка;

сравнительно низким давлением в разрядной камере ( $10^{-1}$  Па), в результате чего в пространстве действия ионного пучка, например в камере распыления, можно поддерживать высокий вакуум при небольшом быстродействии насоса;

высоким коэффициентом полезного использования рабочего газа (до 80%) и малыми затратами энергии на получение одного иона.

Одним из новых положительных качеств ионных источников с осцилляцией электронов является возможность фокусировки ионного луча с его последующим электростатическим отклонением, что позволяет сканировать сфокусированный ионный луч по поверхности мишени из многокомпонентного материала при осуществлении процесса ИЛР и тем самым получать пленки строго контролируемого состава. Фокусировка ионного луча осуществляется с помощью специальной сферической сетки, а отклонение — с помощью ускоряющей сетки, построенной в виде согнутых отклоняющих пластины. При общем ускоряющем напряжении 2 кВ в сфокусированном луче  $\text{Ag}^+$  получен ток 10 мА. Этот луч может отклоняться на угол до  $11^\circ$  при использовании отклоняющего напряжения, не превышающего 120 В [113].

К недостаткам МИИ следует отнести:

ограничение его применения из-за наличия термокатода для формирования ионных пучков в химически активных средах (это ограничение можно частично устранить при замене термокатода плазменным катодом);

возбуждение магнитным полем плазменных неустойчивостей, которые оказывают влияние на оптические свойства и на компенсацию пространственного заряда ионного пучка.

Кроме того, всем электростатическим ионным источникам присуще свойство обеспечивать достаточные для технических целей плотности тока (более  $0,5 \text{ мА/см}^2$ ) только при высоких энергиях ионов (свыше 500 эВ). Хотя этот недостаток устраняется в источнике в односеточной ИОС, перегрев сетки снижает ресурс работы МИИ до нескольких часов. В связи с этим значительный интерес представляют разработки новых видов АИИ, в которых ионизация рабочего газа осуществляется без магнитного поля. К этим АИИ относится источник с седловидной конфигурацией электрического поля с полым водоохлаждаемым катодом в виде цилиндра, в котором размещены два графитовых стержня, выполняющие роль анодов. Электроны под действием электрического поля анодов колеблются относительно центральной точки «седла», имея сложную траекторию движения и производя при этом ионизацию рабочего газа. При потенциале анода 3 кВ ток разряда достигает 300 мА, а эквивалентный ток ионного пучка 20 мА (табл. 5.2). Апертура катода выполнена в виде угольной сетки с отверстиями. Поток частиц из источника полностью нейтрализован в результате захвата ионами вторичных электронов вблизи катода.

В табл. 5.2 [115] приведены значения эквивалентного ионного луча, поскольку в источнике В-21 поток ионов нейтрализован на 80%, а в источниках В-93 и В-95 — полностью. Ней-

Таблица 5.2. Параметры источников с седловидной формой поля

Параметр	В-21	В-93	В-95
Потенциал анода, кВ	5	3	3
Ток разряда, мА	2	150	300
Эквивалентный ток ионного луча, мА	0,1	10	20
Апертура катода	Прямоугольная щель 10×1,5 мм	Угольный сетчатый диск диаметром 25 мм с отверстиями диаметром 2,4 мм	Угольная сетка размером 75×150 мм с отверстиями диаметром 2,4 мм
Площадь сечения луча, см <sup>2</sup>	6,4	62	1000
Расстояние от источника до мишени, см	7,5	15	40
Давление в камере источника, Па	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Скорость откачки, л/с	150	400	3500
Охлаждение	Нет	Водяное, только катода	Водяное, катода и анода

трализация ионов производится вблизи апертуры катода. При использовании в качестве рабочего газа Ag скорость распыления составляет: для Si 1,3, для Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 1,7, для SiO<sub>2</sub> 3 нм/мин.

### 5.3. ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Большим преимуществом АИИ на основе плазменных ускорителей является прежде всего отсутствие ионно-оптической системы, что существенно упрощает их конструкцию и увеличивает ресурс работы. Объемный заряд ионного пучка в источниках этого типа скомпенсирован, и высокая плотность тока пучка может быть достигнута и при сравнительно невысокой энергии ионов (исключение составляют ускорители с анодным слоем, работающие в диапазоне энергий 1—3 кэВ). Снижение энергии экстрагируемых ионов необходимо по двум причинам. Во-первых, при этом повышается энергетическая эффективность процесса распыления, максимальная при энергии ионов 0,3—0,5 кэВ. Во-вторых, при ионном травлении материалов для очистки их поверхности перед осаждением пленок желательно по возможности иметь поток низкоэнергетических ионов, чтобы в процессе травления не вызывать радиационные повреждения ранее созданных структур.

Однако АИИ на основе плазменных ускорителей обладают рядом недостатков, важнейшими из которых являются трубчатая (О-образная) форма ионного пучка и его низкая однородность.

Ионные источники на базе ускорителей с анодным слоем (УАС) содержат кольцевой анод и электромагнитную систему, состоящую из катушки соленоида, катода и магнитопровода. С помощью катушки соленоида создается радиальное магнитное поле в ускоряющей промежутке — зазоре между катодом и анодом. Электроны, совершая замкнутый холловский дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях, ионизуют атомы рабочего газа, в результате чего ионный пучок приобретает трубчатую (О-образную) форму. Сечение ионного пучка имеет вид кольца с весьма неоднородным радиальным распределением интенсивности, что затрудняет возможность равномерного распыления материала мишени или же равномерного травления пластин кремния с целью удаления с них поверхностных загрязнений. Для источника типа ИИ4-015 диаметр области максимума интенсивности составляет всего 70—80 мм, а ширина кольца, в пределах которого интенсивность потока снижается в 2—3 раза, не превышает 30 мм. Равномерность травления в этом случае может быть достигнута только при планетарном вращении подвешиваемых обработок подложек. При групповой обработке подложек, используемой в установке УРМ.3.279.029, каждый из шести держателей подложек перемещается по окружности под источником ионов и одновременно вращается вокруг собственной оси.

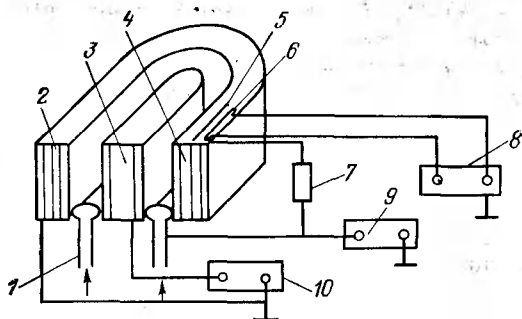
Несмотря на широкое распространение оборудования с подобного рода планетарной системой в целом ряде случаев ее применение нецелесообразно из-за некоторых характерных для нее принципиальных недостатков. Важнейший из них — малое отношение времени, в течение которого держатель подложек пересекает ионный поток, к периоду обращения держателя вокруг вертикальной оси (1/15). В этих условиях требуется относительно высокая мощность разряда в источнике (до 1,5 кВт), что возможно при анодном напряжении 3 кВ. Высокая энергия ионов снижает энергетическую эффективность процесса распыления и вызывает радиационные повреждения обрабатываемых микроструктур, что в подавляющем большинстве случаев совершенно недопустимо.

Эти недостатки можно в значительной степени устранить, если обеспечить непрерывное позиционирование обрабатываемых подложек перед ионным источником в результате их индивидуальной или индивидуально-групповой обработки (не более четырех подложек в партии). При этом мощность разряда в источнике можно снизить почти в 8 раз, а анодное напряжение в 3—4 раза при сохранении прежней скорости обработки подложек. Как показали расчеты и эксперименты [123], равномерность скорости травления подложек диаметром 100 мм при этом лежит в пределах  $\pm 2,5\%$ .



Рис. 5.11. Принципиальная схема источника УЛ-1Ф:

1 — анод; 2 — электромагнит; 3 — магнитопровод; 4 — керамический канал; 5 — электрод поджига; 6 — катод; 7 — нагрузочное сопротивление; 8 — блок питания накала катода; 9 — блок питания разряда; 10 — блок питания электромагнитов



В [119] была предпринята попытка очистки поверхности монокристаллического кремния после ионно-химического травления обработкой пучком ионов Ag от источника ИИ4-015 при ускоряющем напряжении 1 кВ, средней плотности ионного тока  $3 \cdot 10^{-1}$  мкА/см<sup>2</sup> при давлении в рабочей камере  $(6,6-9,3) \times 10^{-3}$  Па. При этом скорость распыления поверхности монокристаллического кремния составляла  $1,6 \cdot 10^{-2}$  нм/с. Даже после длительного (в течение 50 мин) травления ионами Ag с энергией 1 кэВ на поверхности кремния имелись атомы углерода и фтора, что можно объяснить появлением при соударении ионов Ag с поверхностью пластины значительного количества атомов отдачи. Кроме того, при энергии ионов Ag 1 кэВ наблюдали нарушение кристаллической структуры приповерхностного слоя кремния, для восстановления которой необходима последующая высокотемпературная термообработка, что в ряде случаев недопустимо.

Ионные источники на базе ускорителей с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП), по существу, относятся к тому же классу плазменных ускорителей, как и УАС, однако отличаются от них более низкой энергией ионов (50—250 эВ) и большей плотностью тока (2—70 мА/см<sup>2</sup>). Разработанный на базе УЗДП источник УЛ-1Ф (ускоритель ленточный, фланцевый) (рис. 5.11) имеет керамический канал овальной формы, где расположен анод с отверстием, через которое в источник подается рабочий газ. В плоскости, перпендикулярной стенкам канала, установлен вольфрамовый термокатод с электродом поджига. С помощью электромагнитов и магнитопровода в канале создается магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны силовым линиям электрического поля между катодом и анодом. При работе ускорителя в канале реализуется протяженный квазинейтральный слой, в котором происходит основное падение потенциала, образуются и ускоряются ионы. Распределение плотности ионного тока в продольном направлении характеризуется довольно высокой однородностью

(до 95%). В поперечном направлении плотность тока определяется суперпозицией тока от двух плоских ионных пучков из продольных щелей источника. Ионный ток пучка составляет 60% тока разряда. Переработка рабочего газа в ионы 95%. Основная масса ионов (60—70%) имеет энергию  $(0,5—0,7)eU_p$ , где  $U_p$  — напряжение разряда [116, 117].

При расходе рабочего газа через источник  $0,2—0,6$  см<sup>3</sup>/с, рабочем давлении  $(4—6) \cdot 10^{-2}$  Па, расстоянии от источника до подложки 120 мм, плотности ионного тока 5 мА/см<sup>2</sup> и энергии ионов  $X_e$  200 эВ скорость распыления в ксеноне составляла для Al — 1, для Si — 2, для Au — 4 нм/с. При замене  $X_e$  на Ag скорость распыления хотя и снижалась в 1,5 раза, тем не менее была в 100 раз выше той, которая имела место при распылении Si с помощью источника ИИ4-15 [118, 119]. При этом энергия ионов была снижена в 5 раз, что позволило существенно повысить энергетическую эффективность процесса и снизить радиационные дефекты. Следует отметить также, что конструкция источника УЛ-1Ф для обеспечения равномерности 95% на пластинах большого диаметра не требует их сложного планетарного вращения. Для этой цели достаточно перемещать пластины только в одном направлении — перпендикулярно протяженным участкам канала анода, что существенно упрощает конструкцию внутрикамерных устройств.

Ионные источники магнетронного типа (ИМТ) занимают промежуточное положение между УАС и УЗДП. Типичным представителем ИМТ является магнетронная пушка [104, 105], в которой при плотности магнитного потока  $0,4$  Вб/см<sup>2</sup>, расстоянии между катодом и анодом 10 мм и давлении более  $7 \cdot 10^{-2}$  Па ток разряда очень резко возрастает с ростом ВЧ-мощности почти без изменения напряжения между катодом и анодом и достигает 1000 мА в интервале напряжения 380—480 В. Подобного рода режим можно идентифицировать как магнетронный разряд, что существенно упрощает режим распыления, поскольку позволяет независимым образом изменять ток и напряжение разряда. Скорость распыления в Ag при разрядном токе 0,8 А составляет соответственно для поликремния и диоксида кремния 70 и 30 нм/мин.

К ИМТ может быть отнесен описанный в [120, 121] АИИ низкоэнергетических ионов с полым катодом овальной формы. На катод может быть подано ВЧ-напряжение частотой 13,56 МГц и напряжение постоянного тока. Два заземленных контрэлектродов, выполняющих роль анодов, отделены от катода изолирующими прокладками. Полый катод и скрещенные электрическое и магнитное поля позволяют получить высокую плотность плазмы при низком давлении Ag и низкой энергии ВЧ-поля. При ВЧ-мощности 300 Вт, магнитной индукции  $8 \cdot 10^{-3}$  Тл, давлении 0,7 Па плотность ионов составляет  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>, ионный ток

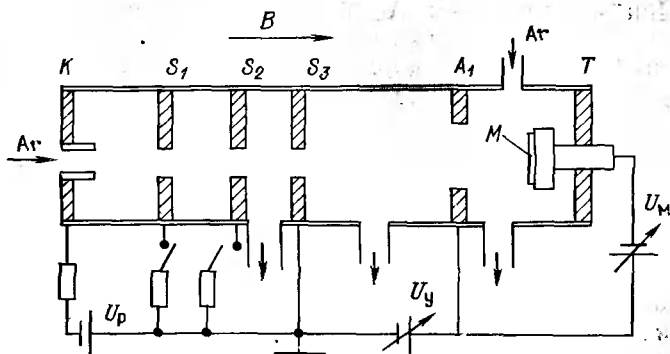


Рис. 5.12. Схема АИИ с плазموпучковым разрядом:

$K$  — катод;  $S_1, S_2, S_3$  — электроды разрядной камеры с отверстиями;  $A_1$  — ускоряющий электрод с отверстием;  $T$  — стенка рабочей камеры;  $M$  — мишень;  $B$  — магнитное поле;  $U_p, U_y, U_m$  — напряжение на разрядной камере, ускоряющем электроде и мишени

0,5 мА/см<sup>2</sup>, средняя энергия ионов  $\bar{E}_и \approx 30$  эВ, а энергетическое распределение ионов  $\Delta E_и/\bar{E}_и \approx 1$ . При постоянном напряжении 400 В средняя энергия ионов  $E_и$  составляет 400 В, а энергетическое распределение ионов  $\Delta E_и/\bar{E}_и \approx 0,1$ . Таким образом, получаемые при питании ВЧ-напряжением низкоэнергетические ионы наиболее пригодны для травления (очистки) подложек, а ионы с энергией 400 эВ — для распыления материала мишени и осаждения пленок.

АИИ с плазменно-пучковым разрядом (рис. 5.12) состоит из трех секций. В первой секции ( $K-S_3$ ) реализуется режим тлеющего разряда; во второй ( $S_3-A_1$ ) обеспечивается ускорение пучка электронов, вытягиваемых из плазмы тлеющего разряда, и, наконец, в третьей секции ( $A_1-T$ ) под воздействием пучка электронов образуются положительные ионы, бомбардирующие мишень  $M$ . Часть положительных ионов из секции ( $A_1-T$ ) проходит в секцию ( $S_3-A_1$ ) и нейтрализует пространственный заряд электронов, что устраняет ограничения, свойственные пространственному заряду. Диаметры отверстий в электродах составляют: 5 мм ( $K$ ), 7 мм ( $S_1-S_3$ ) и 15 мм ( $A_1$ ). Диаметр мишени  $d_m=20$  мм, расстояние между ускоряющим электродом  $A_1$  и мишенью 100 мм. Для устранения диффузии плазмы и электронного пучка к стенкам камеры последняя помещена в однородное магнитное поле 0,06 Тл. Ток электронного пучка  $I_s=0,7I_p$ . Энергия и ток электронного пучка могут изменяться независимо друг от друга, что позволяет оптимизировать не только параметры электронного пучка, но также давление газа в ионном источнике. Стабильный плазменно-пучковый разряд устанавливается в результате инжекции электронного пучка с энергией 50—150 эВ и током до 3,5 А в Ag при давлении 0,05—

1 Па. При энергии ионов Ag 60 эВ и плотности ионного тока  $0,62 \text{ А/см}^2$  была достигнута скорость травления аморфного кремния около  $0,5 \text{ мкм/мин}$ . Скорость осаждения пленок аморфного кремния при той же плотности ионов Si достигает  $50 \text{ мкм/мин}$  [122].

#### 5.4. ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Скорость ИЛР зависит от плотности ионного тока, энергии ионов и угла их падения на мишень. В табл. 5.3 приведены типичные значения скоростей ИЛР материалов при плотности ионного тока  $1 \text{ мА/см}^2$  и энергии ионов Ag, бомбардирующих поверхность материала под прямым углом, 500 эВ.

Использование МИИ с осцилляцией электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях позволяет в 2—3 раза повысить скорости ИЛР некоторых материалов, однако даже в этом случае скорости распыления примерно в 20—30 раз ниже скоростей распыления (а следовательно, и скоростей осаждения пленок), которые могут быть получены с помощью магнетронных распылительных систем.

Вместе с тем большим достоинством АИИ является то, что они позволяют независимо управлять плотностью ионного тока, энергией ионов и углом их падения на мишень или обрабатываемую структуру, которые в этом случае находятся в высоком вакууме и отделены от АИИ.

Возможность получения пучков большого диаметра (до 300 мм) с высокой моноэнергетичностью ионного пучка и высокой степенью однородности ионного тока (до 95%) обеспечили МИИ лидирующее положение среди всех других видов АИИ, применяемых в производстве ИС.

На рис. 5.13 показаны возможные варианты использования АИИ при осаждении тонких пленок [24]. Представленное на рис. 5.13,а прямое осаждение пленок непосредственно из АИИ является идеальным процессом, поскольку позволяет непосред-

Таблица 5.3. Типичные скорости ИЛР различных материалов

Материал	$v_p$ , нм/мин	Материал	$v_p$ , нм/мин
Золото	100	GaGd (гранат)	28
Арсенид галлия	65	Нержавеющая сталь	25
Медь	45	Молибден	23
Пермаллой	33	Кремний (100)	21
Диоксид кремния кристаллический	33	Стекло	20
Алюминий	30	Вольфрам	18
Диоксид кремния пленочный	28	Тантал	15
		Пьезокерамика $\text{Al}_2\text{O}_3$	8

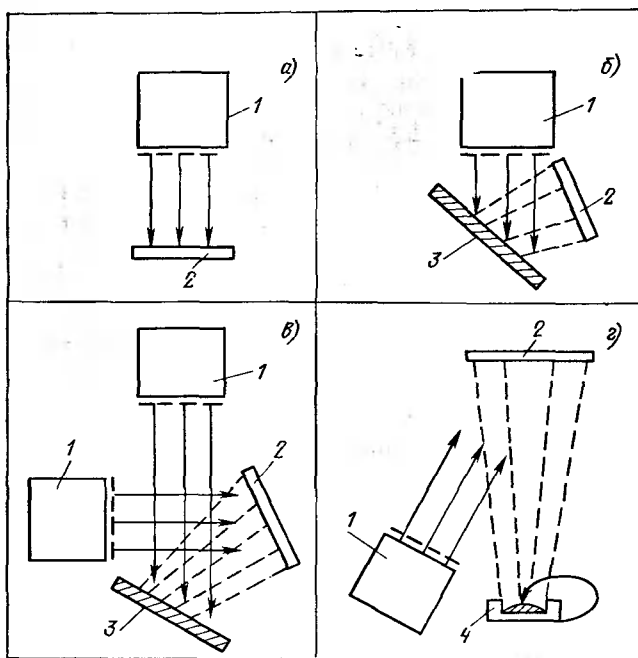


Рис. 5.13. Различные варианты использования АИИ при осаждении тонких пленок:

*а* — прямое осаждение из ионного пучка; *б* — осаждение распылением материала мишени с одновременным воздействием ионного пучка на осаждаемую пленку; *в* — осаждение с помощью электронно-лучевого испарителя с одновременным воздействием ионного пучка на осаждаемую пленку; 1 — АИИ; 2 — подложка; 3 — мишень; 4 — электронно-лучевой испаритель

ственно управлять энергией частиц осаждаемого материала. Однако процесс прямого осаждения пленок из АИИ можно проводить только при малых энергиях осаждаемых частиц, поскольку с увеличением энергии начинается самораспыление. Это ограничивает плотность ионного тока, а следовательно, и возможность осаждения пленок из АИИ на большие площади с требуемой скоростью. Тем не менее имеются сведения о прямом осаждении эпитаксиальных пленок кремния и германия для получения гетероструктур при энергиях от 10 до 200 эВ, а также улучшении степени покрытия подложек и увеличении размера зерна тонких пленок индия в зависимости от энергии ионов в диапазоне от 24 до 120 эВ.

Осаждение пленок путем распыления мишеней с помощью АИИ (рис. 5.13,б) по сравнению с термовакуумным методом позволяет существенно улучшить свойства пленок. При этом энергия осаждающихся частиц лежит в диапазоне от нескольких единиц до десятков электрон-вольт и не снижается в про-

цессе получения пленок, поскольку процесс происходит в высоком вакууме и осаждаемые атомы не испытывают столкновений с молекулами остаточных газов. Таким путем, например, были получены эпитаксиальные пленки CdTe при  $T < 140^\circ\text{C}$ , пленки HgCdTe при  $T \approx 20^\circ\text{C}$ , а также эпитаксиальные пленки кремния. Таким же путем может быть реализовано ионное распыление в присутствии  $\text{O}_2$  или  $\text{N}_2$  для получения пленок оксидов или нитридов. Композиционный состав и микроструктура получаемых пленок могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от используемой газовой смеси и энергии осаждаемых частиц.

Распыление материала мишени с одновременной бомбардировкой осаждающейся пленки потоком ионов (рис. 5.13,в) позволяет в широких пределах изменять композиционный состав пленки. Таким путем, например, получают пленки Gd—Co-гранатов с высокими магнитными свойствами, пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , AlN, HfN, ZrN, TiO и оксидов меди, причем в зависимости от соотношения атомов Cu и ионов  $\text{O}_2$  с энергией около 100 эВ можно получать пленки CuO,  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{Cu}_5\text{O}_4$  [124].

Осаждение пленок из электронно-лучевого испарителя с одновременной бомбардировкой осаждающейся пленки потоком ионов (рис. 5.13,г) позволяет изменять структуру пленок за счет изменения подвижности адатомов, генерации дефектов и атомов отдачи.

Ионная бомбардировка способствует также снижению растягивающих или сжимающих напряжений, возникающих в процессе осаждения пленок Nb, Cr и других материалов.

Бомбардировка пленок в процессе их осаждения низкоэнергетическими ионами с каждым годом находит все более широкое применение при изготовлении ИС, магнитных пленок оптических и износостойких покрытий, для изменения микроструктуры и физических свойств при непосредственном осаждении из АИИ, распылении, молекулярно-лучевой эпитаксии и активируемом плазмой химическом осаждении из газовой фазы [125].

## Глава 6

### ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ТЕРМОИОННЫМ, ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ И ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫМ МЕТОДАМИ

#### 6.1. ТЕРМОИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК

Термоионное осаждение (которое называют также ионным покрытием, конденсацией с ионной бомбардировкой) — это процесс получения тонких пленок и пленочных покрытий осажде-

нием пара из плазменного источника (термоионного устройства), который поступает на подложку в виде двух компонентов: атомов и ионов [17, 126]. Термоионное осаждение относится к таким процессам осаждения, в которых поверхность подложки бомбардируется потоком ионов высокой энергии ( $10-10^4$  эВ). Ионы такой энергии, бомбардируя поверхность подложки и осаждаемой пленки, могут участвовать в различных физических и физико-химических процессах: вызывать распыление подложки и осаждаемой пленки, стимулировать химические реакции на поверхности, внедряться в поверхностный слой, вызывая нагрев и радиационные нарушения.

Основные параметры термоионного устройства определяются требованиями к свойствам наносимой пленки, материалу, толщине, площади поверхности, допустимой неоднородности по толщине, направлением потока осаждаемых частиц, скорости осаждения, механическими, электрофизическими и другими параметрами. Часть требований определяется условиями эксплуатации. Несмотря на многообразие требований, можно выделить основные из них. Устройство должно обеспечивать заданный поток плазмы нужного химического элемента или совокупности элементов без примесей или с их минимальным количеством. Плазма должна содержать в своем составе нужное количество ионов, определяющих процесс формирования пленки и ее качество. Желательно, чтобы поток плазмы получался с минимальным расходом рабочего вещества и мощности, рассеиваемой в устройстве и вспомогательных элементах (накал катода, катушки магнитного поля). Устройство должно быть надежным в работе, иметь наиболее простую конструкцию, питание и управление. Устройство должно иметь заданный срок непрерывной работы и максимальный срок службы.

Все термоионные устройства можно классифицировать по методу получения пара и методу ионизации. По методу получения пара различают следующие устройства: термические, плазменно-пучковые, электроразрядные, лазерные и др. По методу ионизации устройства различаются типом применяемого разряда. В дальнейшем изложении используется классификация по методу получения пара, а где этого недостаточно, вводится и тип разряда.

## 6.2. ТЕРМОИОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Термоионные устройства (табл. 6.1 [126]) характеризуются следующими параметрами:  $j$  — плотность ионного тока насыщения на находящуюся под отрицательным относительно плазмы потенциалом подложку, мА/см<sup>2</sup>;  $v$  — скорость осаждения пленки, мкм/с;  $F$  — площадь поперечного сечения потока с неоднород-

Таблица 6.1. Параметры термоионных устройств

Тип плазменного источника	$j$ , мА/см <sup>2</sup>	$v$ , мкм/с	$F$ , см <sup>2</sup>	$m$ , мг/с	$W$ , Вт	$\alpha$ , %	Осаждаемый материал
С автономным источником пара: со скрещенными полями	1—10	$10^{-3}$ — $10^{-1}$	20—100	2—20	0,2—0,8	1—10	Cu, Al
	0,1	$10^{-3}$	—	—	0,15	10—40	Ag
Плазменно-пучковый: с пучково-магнетронным разрядом	0,1—1	$10^{-2}$ — $5 \cdot 10^{-2}$	20—100	—	0,3—3	0,1—1	Cu, Mo
	1—100	$10^{-3}$ — $10^{-1}$	1—3	1—10	0,8—3	1—90	W, Mo
Электроразрядный: с вакуумной дугой с планарным магнетроном при испарении из жидкой фазы	1— $\infty$	$10^{-2}$ — $10^{-1}$	50—150	5—20	1—5	10—90	Cu, W
	70	$10^{-1}$	30	10—30	1,5	0,1—1	Cu

ностью 5%, см<sup>2</sup>;  $m$ —расход рабочего вещества, мг/с;  $W$ —мощность источника, Вт;  $\alpha$ —степень ионизации плазмы в потоке, %.

Для реализации термоионного осаждения обычно испаритель и подложку, на которую осаждается пленка, помещают в среду разреженного инертного газа, в качестве которого чаще всего используют Ag. На подложку подают отрицательный потенциал, достаточный для зажигания и горения самостоятельного тлеющего разряда между подложкой и испарителем (или заслонкой). Вначале разряд зажигается между подложкой и заслонкой, в результате чего подложка бомбардируется положительно заряженными ионами Ag, что приводит к очистке поверхности подложки. Затем разогревают испаритель, заслонку открывают и в разряд вводят атомы осаждаемого вещества, которые, попадая в разряд, частично ионизируются. Положительно заряженные ионы осаждаемого вещества ускоряются по направлению к подложке, приобретают высокую энергию (до  $10^4$  эВ) и при осаждении на подложку вызывают частичное распыление осаждаемой пленки.

Для обеспечения высокой скорости распыления и очистки подложки прикладываемый к подложкодержателю потенциал должен составлять несколько тысяч вольт и обеспечивать плотность тока до 10 мА/см<sup>2</sup>. При осаждении проводящих пленок на подложки из проводящего материала применяют постоянное напряжение, а при осаждении диэлектрических пленок или осаждении материала на диэлектрические подложки—ВЧ-напряжение мегагерцевого диапазона. ВЧ-напряжение устраняет поверхностный заряд на диэлектрике и одновременно позволяет существенно снизить давление, при котором зажигается разряд (до  $10^{-2}$  Па).



Осаждение пленок термоионным методом возможно и в высоком вакууме (при отсутствии Ag), если зажигание разряда происходит в парах испаряемого вещества (что имеет место, если вещество обладает большой упругостью пара или применяется мощный испаритель), или же когда ионы генерируются автономным источником. Метод обеспечивает хорошую адгезию пленки к подложке, поскольку ему присущи следующие особенности:

способность очищать ионами Ag поверхность подложки и поддерживать ее «чистой» до тех пор, пока не начнется формирование пленки;

разогрев подложки в результате высокой кинетической энергии осаждающихся частиц (ионы и нейтральные атомы);

изменение границы раздела пленка — подложка, обусловленное взаимным внедрением материала пленки и подложки;

возможность управления процессом зародышеобразования и ростом осаждаемой пленки.

Источники ионов для реализации метода термоионного осаждения можно разделить на четыре группы [126];

1) плазма самостоятельного тлеющего разряда, который зажигается между испарителем и подложкодержателем;

2) плазма несамостоятельного разряда с использованием термокатада, а также ВЧ-разряда, скрещенных электрических и магнитных полей, плазмотронов и др.;

3) автономные ионные источники;

4) источники пара с частичной ионизацией испаряемого вещества (ЭЛИ, ионная пушка, планарный магнетрон с испарением из жидкой фазы и др.).

Источником пара осаждаемого вещества может служить резистивный испаритель, ЭЛИ, а также металлоорганика, вводимая в разрядную область (в последнем случае реализуется метод химического термоионного осаждения).

Важной проблемой ЭЛИ является долговечность его термокатада при давлении, создаваемом для зажигания разряда. Поскольку для длительной работы термокатада требуется высокий вакуум ( $p < 10^{-3}$  Па), а процесс термоионного осаждения протекает обычно при давлении  $10^{-1}$ — $10$  Па, то в этом случае необходима двухкамерная вакуумная система, снабженная разделительным экраном с небольшим отверстием для электронного пучка (диаметр отверстия менее 5 мм). При этом в нижней части рабочего объема, непосредственно примыкающей к паромасляному насосу, в которой расположена электронная пушка, обеспечивается высокий вакуум. В то же время в верхней части рабочего объема, куда подается Ag, обеспечивается давление, необходимое для стабильного горения тлеющего разряда.

Термоионное осаждение может быть реализовано также с помощью ионной пушки, позволяющей одновременно испарять

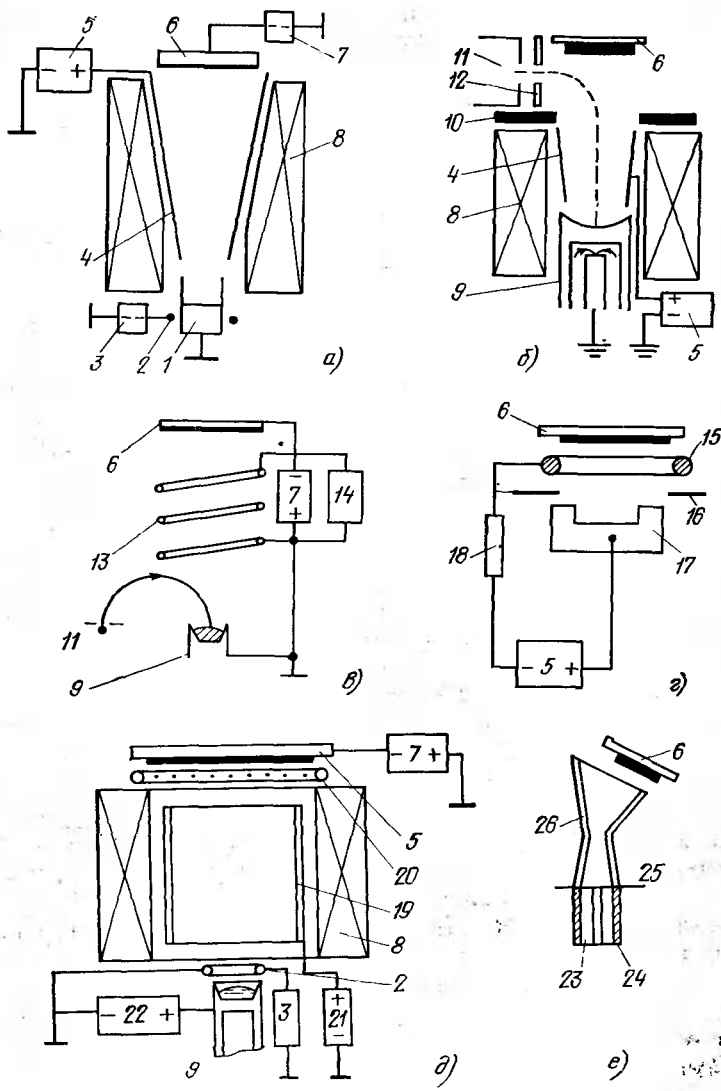


Рис. 6.1. Основные виды термоионных устройств:

а — тигельное с автономным источником пара; б — лучково-магнетронное; в — лучково-высокочастотное; г — с несамостоятельным дугвым разрядом; д — с несамостоятельным дугвым разрядом и вспомогательным электродом; е — с взрывающимся проводником; 1 — тигель-катод; 2 — нить накала для электронной бомбардировки тигля; 3 — источник питания нити накала; 4 — анод; 5 — источник питания анодной цепи; 6 — держатель с подложками; 7 — источник питания для подачи смещения на подложку; 8 — электромагнит; 9 — водоохлаждаемый тигель; 10 — магнитный экран; 11 — электронная пушка; 12 — система отклонения электронного пучка; 13 — ВЧ-индуктор; 14 — ВЧ-генератор; 15 — накаливаемый кольцевой катод; 16 — диафрагма; 17 — анод с рабочим веществом; 18 — резистор; 19 — вспомогательный электрод; 20 — кольцо для напуска газа; 21 — источник питания вспомогательного электрода; 22 — высоковольтный источник питания; 23 — центральная жила кабеля; 24 — оболочка кабеля; 25 — взрывающаяся фольга; 26 — два усеченных конуса сепаратора капель

и ионизовать испаряемое вещество в условиях высокого вакуума ( $p < 10^{-3}$  Па).

Наиболее простое по принципу действия термическое устройство с автономным источником пара (рис. 6.1,а). Катодом служит тигель с рабочим веществом, нагреваемый до высокой температуры ионной бомбардировкой. Пары осаждаемого вещества ионизируются в пространстве между тиглем-катодом и подложкодержателем в разряде, создаваемом с помощью конусообразного анода в скрещенных электрическом и магнитном полях. Положительный по отношению к тиглю и подложке потенциал анода препятствует уходу электронов вдоль магнитного поля. Таким образом, система скрещенных электрического и магнитного полей образует ловушку для электронов, дающих основной вклад в ионизацию паров. Энергия ионов, бомбардирующих металлическую подложку при потенциале держателя подложек, равном потенциалу тигля, в слабом магнитном поле близка к  $eU_a$  (где  $U_a$  — анодное напряжение) и снижается при увеличении индукции магнитного поля  $B$ . Разрядный ток ( $\alpha$  следовательно, и  $\alpha$ ) пропорционален  $U_a$  и  $B$ .

Устройства со скрещенными полями обладают основными свойствами большинства последующих термоионных устройств: разряд в парах чистых твердофазных веществ без присутствия балластного газа позволяет получать пленки повышенной чистоты в вакууме ( $p \approx 10^{-3}$  Па); заряженные частицы ускоряются до энергии 0,2—3 кэВ, способствующей активации процесса осаждения; наличие в потоке ионов нейтральных атомов обеспечивает высокие по сравнению с осаждением из ионного пучка и катодным распылением скорости осаждения; наличие в потоке быстрых электронов позволяет осаждать пленки на любые подложки независимо от их проводимости. Вместе с тем значения  $\alpha$ ,  $v$ ,  $F$  этих устройств были малы по сравнению с потенциально возможными. Устройства со скрещенными полями усовершенствованы путем использования эффекта полого катода, когда тигель изготавливается в виде длинного стакана или сопла, и широко применяются в лабораторной практике.

В термических устройствах наиболее высокие токи получаются, если тигель является катодом. Однако для исключения загрязнения пленок в результате распыления материала тигля возможно использование горячего тигля и в качестве анода. Зажигание разряда с холодным катодом в этом случае затруднено, поэтому ионизацию интенсифицируют накаливанием до температуры термоэмиссии катода при резистивном разогреве анода. Магнитное поле в устройстве отсутствует. В такой простой системе для Ag получено  $\alpha = 10-40\%$ . Известно также применение для ионизации вещества, испаряемого из автономного горячего тигля, высокочастотного разряда. Общий недостаток всех термических испарителей — это ограниченность выбора рабочего

вещества из-за возможности взаимодействия расплавленного рабочего вещества с горячим тиглем. В основу плазменно-пучкового устройства магнетронного типа (рис. 6.1,б) для зажигания разряда положено использование продольного по отношению к потоку пара магнитного поля и радиального электрического поля цилиндрического анода. Возникающий при этом разряд называют пучково-магнетронным. Скорость осаждения пленки  $v$  можно легко регулировать, изменяя мощность электронного пучка, а значения  $\alpha$  — изменяя разрядный ток  $I_a$ , однако увеличение  $I_a$  и зависящего от него  $\alpha$  ограничено, поскольку  $I_a$  достигает насыщения при  $U_a > 250$  В. Площадь поперечного сечения потока  $F$  увеличивается с ростом  $v$ . Значение  $\alpha$  можно повышать, увеличивая мощность разряда до нескольких киловатт.

Как показали эксперименты, разряд можно зажечь и одним электронным пучком при отсутствии анодного электрода. Происходит это при достаточной мощности пучка, когда плотность пара достигает такого значения, что одна из собственных частот колебаний плазмы совпадает с собственной частотой колебаний пучка. Электроны плазмы увеличивают свою энергию в поле резонансных колебаний системы плазма — пучок и начинают более интенсивно ионизовать пар, вызывая развитие плазменно-пучкового разряда. Коэффициент ионизации плазмы в таком разряде может приближаться к 100%. Критическое значение давления пара для развития плазменно-пучкового разряда  $p \approx 1$  Па. Основной недостаток устройств с плазменно-пучковым разрядом — малое сечение потока  $F$  (менее 30 см<sup>2</sup>), поскольку ионизация происходит только вблизи пучка электронов. Кроме того, в этих устройствах взаимосвязаны скорость испарения и коэффициент ионизации плазмы.

Электрический разряд в парах испаряемого электронной пучкой вещества можно зажечь и при отсутствии над тиглем продольного по отношению к пучку электронов магнитного поля или при наличии слабого поперечного магнитного поля. В последнем случае электронный пучок отклоняется в поперечном магнитном поле на 180 и 270°. Для создания разряда над тиглем помещается вспомогательный электрод под положительным потенциалом. Режим горения разряда может быть как дуговым, так и тлеющим. Дуговой режим предпочтительнее при испарении тугоплавких материалов, у которых температура плавления выше температуры термоэмиссии. В настоящее время намечались пути разработки устройств, позволяющих получать более высокие скорости испарения за счет интенсификации процессов выхода электронов из катода.

Вместо вспомогательного электрода в устройствах с поперечным магнитным полем нередко применяют высокочастотный индуктор (рис. 6.1,в). Достоинством индукционного высокочастотного разряда является слабое загрязнение пленок матери-

лом конструкции и возможность осаждения пленок на большие поверхности. Однако при этом возникают серьезные трудности с согласованием ввода ВЧ-мощности в разряд при переходе с одного рабочего вещества на другое, что значительно ограничивает области применения указанных устройств. Весьма перспективно применение ВЧ-разряда между пластинами конденсатора для ионизации вещества, испаряемого электронным пучком. Предпринимаются попытки применения в качестве источника электронного пучка тлеющего разряда с полым катодом. Основные достоинства устройств с полым катодом — отсутствие нити накала и простота конструкции, но при этом происходит загрязнение пленки материалом катода.

Помимо электронных пучков для повышения чистоты осаждаемых пленок применяют индукционный нагрев взвешенной в высокочастотном поле капли рабочего вещества. Однако более широкое распространение получили устройства с индукционным разогревом рабочего вещества, помещенного в тигель. Тот же индуктор служит и для создания разряда. Он же может нагревать тигель, при этом рабочее вещество получает тепло от тигля и индуктора. В этом случае более правильно говорить о термическом устройстве. На практике в одном и том же устройстве могут быть использованы оба способа нагрева рабочего вещества. Так называемая «ионная пушка» представляет собой тигель с наружным индукционным нагревом. Между индукционной катушкой и тиглем, который обычно изготовляется из графита, смеси VN и  $TiB_2$ , установлен экран из  $Al_2O_3$ , «прозрачный» для высокой частоты, но уменьшающий тепловые потери. ВЧ-катушка окружена металлическим экраном, предотвращающим рассеяние подводимой к катушке мощности в окружающее пространство. Ионная пушка позволяет осаждавать пленки Al, Cu, Si,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и многих других материалов.

В устройстве, изображенном на рис. 6.1,2, разряд поддерживается благодаря эмиссии электронов из накаливаемого катода. Для того чтобы повысить температуру рабочей части анода, его экранируют от катода контрагирующей диафрагмой. Разряд легко поддерживается в парах любого проводника, а если применить специальный тигель, то и диэлектрика. В последнем случае диэлектрик загружают в прикрытую сеткой тугоплавкую коробочку.

Известны три режима работы устройства: вакуумный, дуговой и тлеющий. Вакуумный режим характеризуется малым разрядным током ( $I_a \leq 200$  мА), повышенным анодным напряжением ( $U_a \approx 1,8$  кВ) и малой скоростью осаждения ( $v \leq 5$  нм/с). Испаряющихся атомов в этом режиме недостаточно для развития лавин ионизации, производительность процессов испарения и осаждения низкая.

При увеличении мощности испарителя, например, путем увеличения анодного напряжения при постоянном ограничивающем ток сопротивлении наблюдается переход в дуговой режим (падающий участок ВАХ). Дуговой режим характеризуется значительным возрастанием разрядного тока, уменьшением анодного напряжения и увеличением скорости осаждения в 5—6 раз по сравнению с вакуумным режимом. Существенно возрастает и коэффициент ионизации при переходе от вакуумного режима к дуговому, однако  $\alpha$  все же остается небольшим ( $\alpha \approx 1\%$ ). Испаритель дает бескапельный поток плазмы рабочего вещества, но кроме низкого  $\alpha$  его существенным недостатком является присутствие горячего катода в потоке пара.

При высоком анодном напряжении ( $U_a \approx 10^3$  В) и выключенном накале кольцевого катода наблюдается «тлеющий» режим работы устройства. Переход в этот режим осуществляется постепенно уменьшением тока накала катода и увеличения  $U_a$ . В тлеющем режиме возрастает мощность, которую можно подвести к устройству, скорость осаждения увеличивается в 5—6 раз, в 15—20 раз возрастает поток ионов на подложку, т. е.  $\alpha$  увеличивается в 3—4 раза. Разряд поддерживается термоэмиссией электронов из части катода в результате саморазогрева ионной бомбардировкой. Если накаливаемый катод изготовить в виде полости, то возможен режим дугового разряда с саморазогревающимся до температуры аномальной термоэмиссии катодом при анодных напряжениях  $U_a = 20 \div 30$  В.

В результате ионной бомбардировки катода в устройствах с несамостоятельным дуговым разрядом возможно загрязнение пленок материалом катода в количестве  $3 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$  массы материала пленки. Некоторая сложность возникает и с источниками питания, поскольку разряд зажигается при высоком анодном напряжении, а рабочий режим реализуется при низком анодном напряжении. Значение  $\alpha$  увеличивают приложением магнитного поля в области разряда и размещением над катодом вспомогательного электрода под положительным относительно анода потенциалом. При этом устройство работает как плазменный ускоритель. Ускорение плазмы достигается за счет азимутального дрейфа электронов в скрещенных полях, наличия градиента концентрации атомов вдоль магнитного поля и заземленного источника электронов (накаленного катода). Энергия ионов в таком ускорителе, близка к  $eU_c$ , где  $U_c$  — потенциал вспомогательного электрода.

Наиболее совершенными электроразрядными термоионными устройствами, нашедшими применение в промышленных установках, являются вакуумно-дуговые устройства. Широко их стали применять после того, как были решены вопросы стабилизации катодного пятна на рабочей поверхности катода. Уход катодного пятна с рабочей поверхности изменяет направление пото-

ка плазмы и засоряет его материалом крепления катода. Весьма просто стабилизация достигается путем окружения водоохлаждаемого катода вспомогательным экраном под потенциалом анода. Зажигается разряд с помощью поджигающего электрода, импульсной подачей газа в разрядный промежуток, пробоем пленки из рабочего вещества между анодом и катодом и другими способами.

Более громоздка стабилизация катодного пятна на рабочей поверхности катода магнитным полем: поток плазмы устойчив в направлении, совпадающем с силовыми линиями магнитного поля. Экспериментально установлено, что катод следует выполнять в виде усеченного конуса с углом наклона образующей нерабочей боковой поверхности к оси конуса, равным  $7^\circ$ , и помещать катод в соленоид. Если направление потока плазмы из катодного пятна перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, пятно удерживается на кольцевой траектории. Магнитное поле при этом создается аксиально-симметричным магнитом, диаметрального сечения которого напоминает букву Ш. Индукция магнитного поля составляет  $10^{-2}$  Тл.

Основные достоинства вакуумно-дуговых устройств состоят в высокой степени ионизации плазмы ( $\alpha \approx 100\%$ ), простоте конструкции, легкости формирования диаграммы направленности потока плазмы. Характерный диапазон токов  $I_a = 100 - 300$  А, напряжений  $U_a = 10 - 60$  В. ВАХ — прямая, параллельная оси токов. Ток задается напряжением источника питания и разрядным сопротивлением. Основной недостаток испарителей — присутствие жидкой фазы в потоке. Размеры и количество капель зависят от материала катода. В среднем радиус капель составляет от 1 до 10 мкм. Поскольку капли летят по прямым траекториям, плазму можно отделить от капель с помощью сепаратора, поворачивающего поток плазмы. Следует отметить, что сепарация усложняет испаритель, уменьшает плотность плазмы в потоке и тем самым снижает конкурентоспособность вакуумно-дуговых устройств по сравнению с другими.

Сравнительно недавно предложен новый тип вакуумной дуги, горящей без капель на теплоизолированном саморазогреваемом тигле-катоде с рабочим веществом. Первоначально зажигается обычный вакуумно-дуговой разряд на холодном тигле-катоде с микропятнами. Ионная бомбардировка тигля-катода повышает его температуру, и, если средняя плотность тока на катоде будет выше некоторой критической  $j \approx 10 - 100$  А/см<sup>2</sup>, давление насыщенных паров над рабочим веществом превысит критическое значение, зажжется распределенный разряд. Достигнуто устойчивое горение распределенной по катоду дуги на Сг, Си, Мо при  $\alpha \approx 100\%$ . Расширение набора рабочих веществ, получение тонких пленок с помощью такой дуги и исследование их свойств представляют несомненный интерес.

Следует отметить, что для термоионного осаждения можно использовать практически любые устройства с автономным горячим тиглем-катодом при работе в режиме с саморазогревом тигля-катада ионной бомбардировкой, в частности МРС с нагреваемым тиглем-катодом [64].

Термоионное осаждение может быть реализовано также из плазмы взрывающихся проводников. Для этого в течение  $t = 0,1 \div 10$  мкс к тонкой (0,1 мм) проволочке или фольге подводится мощность 0,1—1 ГВт. Проводник испаряется и ионизуется вместе с каплями. Для отделения капель от потока плазмы на подложку предложено между проводником и подложкой помещать два усеченных конуса, совмещенных меньшими торцами (рис. 6.1,е).

### 6.3. ЛАЗЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

Большие возможности при термоионном осаждении открывают импульсные методы получения высокоинтенсивных и высокоионизованных плазменных потоков, обеспечивающие наибольшие из полученных в настоящее время скорости осаждения ( $10^2 \div 10^3$  мкм/с). Высокие значения  $\alpha$  эквивалентны повышению вакуума на несколько порядков и обеспечивают получение тонких пленок сложных соединений толщиной до  $10^{-2}$  мкм с сохранением стехиометрического состава пленок.

Среди импульсных устройств наибольшее распространение получили лазерные устройства. Их основным элементом является сам лазер. Плотность потока энергии  $R$  (в месте воздействия излучения) на мишень из рабочего вещества, длительность импульса  $\tau$  и длина волны  $\lambda$  лазера полностью определяют характер взаимодействия излучения с веществом и параметры образующейся плазмы: энергетический спектр частиц, их концентрацию и диаграмму направленности.

Таблица 6.2. Параметры процесса осаждения пленок с помощью лазерных

Длина волны, мкм	Длительность импульсов, мкс	Плотность светового потока, ГВт/см <sup>2</sup>	Энергия ионов	
			$E_n$ max, кэВ	$E_n$ , кэВ
1,06	0,01	0,1—1,0	0,7	0,04
1,06	0,03	0,1—1,0	2—3	0,1
10,6	0,1	0,1—1,0	5—6	1—2
10,6	2	0,1	5—6	0,4—0,6

Примечание. Расстояние рабочее тело—подложка 4 см.



Плазма образуется при работе лазера в режиме с модулированной добротностью при плотности светового потока  $R \geq 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Установлено, что металлы и большинство полупроводников при этом могут испаряться без образования капель с высоким значением  $\alpha$ . Образующаяся над рабочим веществом плазма взаимодействует с излучением, нагревается им в объеме порядка нескольких радиусов облучаемой области мишени и под действием силы инерции разлетается. Для этого способа характерно присутствие большого количества высокоэнергетических ионов.

Количество вынесенной массы при использовании лазера с энергией в импульсе 20 Дж при  $R \approx 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> не превышает 1 мг. Параметры технологических лазеров и плазмы приведены в табл. 6.2 [126].

Лабораторные лазеры позволяют получать  $R \leq 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>, для технологических лазеров  $R < 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Изменяя  $R$ , можно изменять количество ионизованных и нейтральных частиц в плазме и их энергию. Как видно из табл. 6.2, переход к большим  $\lambda$  увеличивает энергию разлетающихся частиц.

Ионы имеют значительный разброс по энергиям и находятся на фронте потока разлетающихся частиц, за ними следуют низкоэнергетические атомы. Подходящие к подложке высокоэнергетические ионы плазмы создают в ней радиационные дефекты, распыляют ее. Над подложкой может образоваться облако с повышенной концентрацией частиц, ослабляющее поток рабочего вещества на подложку. Из-за очистки подложки и взаимного проникновения рабочего вещества и материала подложки возрастает адгезия пленок. При расстояниях между рабочим веществом и подложкой  $L = 1-10$  см плотность плазмы у поверхности подложки понижается на 4-6 порядков по сравнению с плотностью плазмы в фокусе  $n = 10^{25}-10^{27}$  см<sup>-3</sup>, но этого вполне достаточно для получения больших значений  $v$ ,  $E$  и тонких пленок с уникальными свойствами.

#### устройств

Энергия нейтральных атомов		Степень ионизации, %	Ширина диафрагмы, град	Время поступления частиц, мкс	Скорость поступления частиц на площади в 1 см <sup>2</sup> за 1 с
$E_a \text{ max}$ , эВ	$E_a$ , эВ				
10	4	75	30-40	10	5
200	20-30	50	40-50	10	20
—	—	—	60-70	2	2
1000	400-600	40	100-120	2	10

#### 6.4. СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОИОННЫХ КОНДЕНСАТОВ

Следует отметить, что пленки даже простых веществ, полученных в условиях конденсации с ионной бомбардировкой, существенно отличаются по адгезии, плотности, электропроводности, микротвердости, коэффициенту отражения и другим характеристикам от пленок, полученных термическим испарением в вакууме или другими традиционными способами. Так, при термическом осаждении в вакууме Si на ситалле с подслоем Cr не удается получить покрытия с толщиной более 15 мкм вследствие их отслоения от подложки из-за больших внутренних напряжений. Между тем уже при небольшой степени ионизации паров Si (несколько процентов) и при энергии ионов в сотни электрон-вольт удается получить покрытия практически любой толщины. Реально полученные покрытия из Si и других материалов имели толщину 150 мкм. Если и происходит отлущивание таких пленок из-за внутренних напряжений, то трещины проходят по слоям ситалла, а не по границе Si—Cr. Сами пленки обладают плотностью  $8,9 \text{ г/см}^3$  и  $\rho = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , имеют параметры, близкие к параметрам сплошного образца, а их микротвердость в 2 раза превосходит микротвердость исходного образца. Зависимость приведенного удельного сопротивления от скорости осаждения пленок с ионной бомбардировкой и без нее показывает, что при давлении  $p = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$  и малой скорости осаждения  $v \approx 0,5 \text{ мкг/с}$  получаются пленки со свойствами массивного образца.

При направлении на подложку смеси ионов газа, металла и нейтральных частиц происходят поверхностные химические реакции, труднодоступные или невозможные в ранее существующих технологиях.

При отсутствии охлаждения подложки и направлении на нее потока ионов углерода с энергией в десятки электрон-вольт и током в несколько ампер происходит нагрев подложки до  $700\text{—}800^\circ\text{C}$  и образуется легкостираемое покрытие темно-серого цвета, мелкодисперсного, полностью неграфитизированного углерода. Охлаждение подложки до комнатной температуры дает светло-серые покрытия, твердость которых близка к твердости алмаза, плотность  $2,9 \text{ г/см}^3$  и  $\rho = 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Кроме того, термоионные пленки обладают в 2—3 раза более высокой стабильностью к коррозии.

Характеризуя развитие термоионного осаждения в целом, следует отметить, что разработаны устройства, позволяющие получить плазму практически всех элементов.

Присущие термоионному методу осаждения достоинства, такие, как обеспечение исключительно высокой адгезии осаждаемой пленки к подложке, равномерность пленки по толщине как

на плоских, так и на рельефных поверхностях, высокая производительность процесса, свидетельствуют о возможности его широкого промышленного использования. Метод может быть применен для металлизации медью печатных плат, осаждения Al на майларовые подложки, защиты фотосаблонов окисью алюминия. Однако бомбардировка поверхности подложки потоком высокоэнергетических ионов (до  $10^3$  эВ) и нейтральных атомов вызывает разогрев подложки, взаимное внедрение материалов пленки и подложки, изменение границы раздела пленка — подложка и является причиной возникновения трудноустраняемых радиационных дефектов. Все это существенно ограничивает применение термоионного осаждения в производстве СБИС.

### 6.5. ИОННО-КЛАСТЕРНОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК

В методе ионно-кластерного осаждения [127—130] используется явление образования кластеров (многоатомных агрегатов) при истечении в вакуум со сверхзвуковой скоростью потока пара из квазизамкнутого тигля через одно или несколько отверстий (сопел) малого диаметра. Если температура пара в тигле  $T_T$ , то после выхода его из сопла в результате адиабатического расширения она понижается до  $T_B$ , которая может быть определена из уравнения

$$T_B/T_T = (p_B/p_T)^{(v-1)/v},$$

где  $p_T$  и  $p_B$  — давление пара в тигле и в вакуумной камере вблизи сопла;  $v$  — отношение удельной теплоемкости пара при постоянном давлении  $c_p$  и его удельной теплоемкости при постоянном объеме  $c_v$ ,

$$v = c_p/c_v = 1 + 2/n,$$

где  $n$  — число степеней свободы молекулы пара.

Образование кластеров протекает наиболее эффективно, когда  $p_T/p_B > 10^4$ , что обеспечивается выбором температуры тигля и диаметра отверстия сопла, который обычно составляет 0,1—1,0 мм. Число атомов в кластере  $N$  составляет  $10^2$ — $10^3$ . Энергия кластеров  $E = kT_T N$  (где  $k$  — постоянная Больцмана). Для повышения энергии кластеров их ионизируют электронным ударом и ускоряют в электрическом поле. Сечение ионизации кластера  $\sigma_{кл}$  является функцией его размера, и при энергии электронов порядка 50—500 эВ  $\sigma_{кл}$  в первом приближении равно геометрическому сечению кластера, что позволяет получить степень ионизации потока кластеров до 50%.

Ионизируют поток кластеров путем инъекции в него ускоренных электронов. В качестве ионизатора может использоваться обычная трехэлектродная пушка, электронный пучок которой,

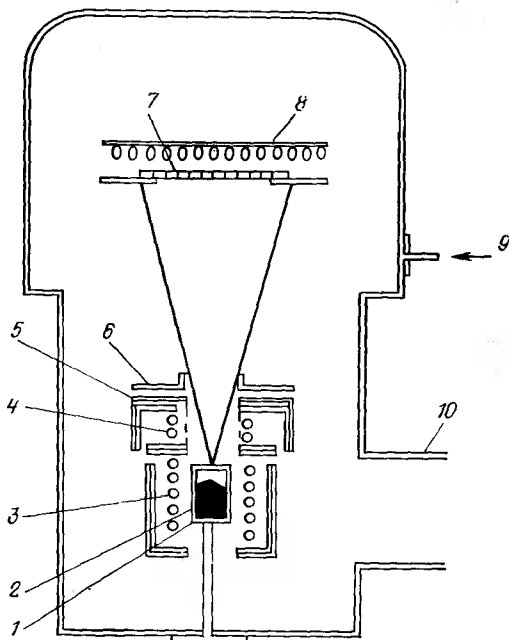


Рис. 6.2. Схема устройства для ионно-кластерного осаждения пленок:

1 — тигель; 2 — испаряемый материал; 3 — нагреватель тигля; 4 — ионизатор (инжектор электронов); 5 — экстрагирующий электрод; 6 — ускоряющий электрод; 7 — подложка; 8 — нагреватель подложки; 9 — напуск реактивного газа; 10 — откачка

проходя через анодное отверстие, бомбардирует и ионизует поток кластеров. Ионизатором может служить также цилиндрический диод, сеточный анод которого ограничивает область бомбардировки потока кластеров электронами.

Ионно-кластерным методом можно получать пленки метал-

лов, сплавов, полупроводников, диэлектриков как простого, так и сложного составов. Этим методом были получены пленки Au, Ag, Cu, Pb, Si, GaAs, ZnS, CdS, GaP, CdTe, сплавы Au—Be, соединения Mn—Bi. Если необходимо производить легирование пленок, то легирующее вещество помещают в отдельный тигель или в тигель вместе с материалом наносимой пленки. Проводя осаждение в присутствии реактивного газа ( $O_2$ ,  $N_2$ , C и пр.), ионно-кластерным методом можно получать пленки оксидов, нитридов, карбидов и др.

На рис. 6.2 приведена схема устройства для ионно-кластерного осаждения пленок  $SiO_2$  путем реактивного распыления  $SiO_2$  в виде порошка, загружаемого в тигель и нагреваемого в нем до температуры  $1600^\circ C$ . Пары  $SiO_x$  ( $1 < x < 2$ ) выходят из тигля через сопло диаметром  $d = 1 \div 2$  мм и длиной  $L \approx 1$  мм и попадают в рабочую камеру, где осаждаются на кремниевую пластину, нагретую до  $200^\circ C$ . Осаждение пленок  $SiO_2$  производится при парциальном давлении кислорода порядка  $4 \cdot 10^{-3}$  Па (общее давление в камере около  $10^{-2}$  Па). Распределение пленки по толщине очень близко к  $\cos^2 \theta$  (где  $\theta$  — угол между нормалью к плотности тигля и краем ускоряющего электрода) при  $L/d = 0,5$ ; наблюдается тенденция резкого снижения толщины пленки на краях подложки при увеличении  $L/d$ . Осажденные реактивным ионно-кластерным методом пленки  $SiO_2$  не уступа-

Таблица 6.3. Параметры пленок  $\text{SiO}_2$ , полученных различными методами

Параметр	Реактивное ионнокластерное осаждение	Термическое осаждение	Распыление	Осаждение из газовой фазы
Скорость осаждения, нм/мин	6	2,5	10	300
Температура подложки, °C	200	1000	200—400	450
Исходный материал	$\text{SiO}_2 + \text{O}_2$	$\text{Si} + \text{O}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 (1:10)$
Давление, Па	$10^{-2}$	$10^5$	1	$10^5$
Скорость травления, нм/мин	54	45	80	500—700
Пик поглощения ИК-излучения, $\text{см}^{-1}$	1060	1080	1060	1060
Коэффициент отражения	1,46	1,46	1,46	1,47

ли по своим параметрам пленкам  $\text{SiO}_2$ , полученным другими методами (табл. 6.3) [127].

Параметры процесса осаждения гидrogenизированных пленок аморфного кремния, легированных фосфором или бором с помощью ионно-кластерного устройства [128], приведены ниже:

Напряжение на ускоряющем электроде, кВ . . . . .	До 8
Ускоряющее напряжение электронного пучка для ионизации кластеров, В . . . . .	150
Электронный ток ионизатора, мА . . . . .	100
Давление водорода, Па . . . . .	$4 \cdot 10^{-2}$
Концентрации фосфина или диборана в водороде . . . . .	До 5000
Температура подложки, °C . . . . .	220—300
Температура тигля, °C . . . . .	2000

С помощью ионно-кластерного метода были получены пленки Al на кремниевых подложках как с предпочтительной ориентацией, так и имеющие эпитаксиальную структуру (табл. 6.4) [129].

Таблица 6.4. Параметры процесса осаждения пленок алюминия

Параметр	С предпочтительной ориентацией	Эпитаксиальные
Напряжение на ускоряющем электроде, кВ	До 8	0,2—5
Ускоряющее напряжение электронного пучка для ионизации кластеров, кВ	0,5	0,2—0,5
Электронный ток ионизатора, мА	100	100
Температура подложки, °C	50—90	20
Давление в процессе осаждения, Па	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Скорость осаждения, нм/мин	50	12
Толщина пленки алюминия, мкм	0,5—1	0,36

Полученные пленки Al обладали высокой стабильностью в процессе отжига при  $T=550^\circ\text{C}$ . В них не было обнаружено деградации качества кристаллитов, изменения высоты барьера Шотки, появления бугорков и электромиграции. Помимо кремниевых подложек пленки Al были получены на подложках из GaAs,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Высокое качество полученных этим методом пленок по существу позволяет решить ряд проблем, возникающих при металлизации СБИС. В перспективе ионно-кластерный метод может быть использован в полностью эпитаксиальной технологии изготовления МОП-структур, в том числе для трехмерной интеграции.

В [130] дан обзор последних достижений в использовании ионно-кластерного метода при получении пленок различных материалов. Возможности метода показаны на примере получения контактов из Al шириной 1 мкм, стабильных в диапазоне температур  $450\text{--}550^\circ\text{C}$ , пленок из Al на подложках кремния с ориентациями  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ , сопротивление которых не изменяется после пропускания электрического тока с плотностью  $10^6\text{ A/cm}^2$  при  $250^\circ\text{C}$  в течение 400 ч, плотных и стехиометрических пленок диэлектриков типа  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также многослойных структур  $\text{CdTe}\text{--}\text{PbTe}$  со слоями толщиной 1,5 нм на подложках InSb.

Осаждение пленок ионно-кластерным методом сопровождается рядом специфических процессов, которые во многом определяют адгезию, структуру и электрофизические свойства пленок. Ионная бомбардировка вызывает глубокое травление поверхности подложки, ее частичное распыление и очистку, а также легирование и нагрев пленки в процессе ее осаждения на подложку. При этом образуется межфазный слой на границе пленка — подложка и увеличивается концентрация дефектов в подложке. Конденсация кластеров на подложке сопровождается частичным или полным распадом их на составляющие атомы, которые могут мигрировать по поверхности подложки. Значительный средний путь миграции атомов (10—50 мкм) стимулирует процессы зародышеобразования, рост островков, их коалесценцию и т. д., что позволяет получать поликристаллические и монокристаллические пленки при более низкой температуре подложки по сравнению с термовакуумным методом.

В результате миграции атомов снижается удельное сопротивление металлических пленок и уменьшаются в них внутренние напряжения. Плотность материала пленки растет с увеличением энергии кластеров, что обусловлено непрерывным удалением ионной бомбардировкой слабо связанных с поверхностью подложки атомов рабочего материала, а также повышенной миграцией по подложке сконденсированных частиц. С увеличением энергии изолированных частиц растет число имплантированных в подложку ионов, интенсифицируется травление ее поверхности, что способствует повышению адгезии

пленки к подложке. С помощью ионно-кластерного метода удается наносить пленки не только на плоские подложки, но и на подложки, имеющие сложный профиль поверхности, что очень важно при создании межсхемных соединений ИС.

К недостаткам метода следует отнести сложность изготовления квазизамкнутых тиглей с соплами малых размеров из материалов, которые выдерживают высокие температуры и при этом не взаимодействуют с испаряемым материалом и не растворяются в нем. Ограниченный объем испаряемого материала, который может быть загружен в тигель, не позволяет использовать ионно-кластерный метод в установках и линиях непрерывного действия.

Разновидностью ионно-кластерного метода является осаждение пленок проводящих материалов в сильном электрическом поле. При этом используется отрыв положительно заряженных частиц (кластеров или атомов) под действием высокого отрицательного потенциала экстрагирующего электрода, расположенного вблизи поверхности проводящего материала (который в этом случае находится под высоким положительным потенциалом). Для преодоления сил поверхностного натяжения требуется высокая напряженность электрического поля, что может быть достигнуто, если поверхность материала в зоне отрыва кластеров будет иметь очень маленькую площадь. Для этой цели внутри тигля с расплавленным материалом по нормали к его поверхности размещают иглы таким образом, чтобы их острия покрывались пленкой жидкого металла в результате действия сил поверхностного натяжения при механической вибрации тигля. Для этого могут быть также использованы конические сопла с каналами небольшого диаметра, в которых расплавленный металл удерживается силами поверхностного натяжения или подается под давлением. Замена резистивного нагрева разогревом электронным лучом позволяет снизить экстрагирующее напряжение с 10—15 до 1 кВ и получить в 2—3 раза более высокую по сравнению с обычным ЭЛИ скорость осаждения. Таким путем были получены пленки Pb, Sn, Al, Ag, Pt и др.

К числу недостатков рассматриваемого метода осаждения пленок следует отнести резко выраженную зависимость размера кластеров от ионного тока, а следовательно, от скорости осаждения пленок, причем при больших скоростях осаждения в конденсате появляется капельная фаза и диаметр частиц достигает несколько микрометров. Кроме того, для реализации этого метода и получения высоких скоростей осаждения материал должен находиться в жидкой фазе, в то время как некоторые из применяемых в микроэлектронике веществ интенсивно сублимируются при более низкой температуре, чем температура их плавления (например, Cr, Te, CdS и др.). Следует отметить, что ионизованные кластеры, образовавшиеся при отрыве микрока-

пель с поверхности расплава, состоят из сравнительно большого числа атомов (до  $10^9$ ), которые связаны между собой сильнее, чем атомы в кластерах, полученных ионно-кластерным методом, что обуславливает низкую вероятность их разрушения при соударении с подложкой. Поскольку размеры многоатомных частиц довольно большие, миграционный эффект у них практически отсутствует, поэтому получать пленки, ориентированные относительно монокристаллической подложки, невозможно. Пленки в этом случае имеют поликристаллическую мелкодисперсную структуру (характерную для пленок Al) или аморфную (пленки соединений  $Ni_{60}Nb_{40}$ ). Такая структура пленок обусловлена прежде всего сверхбыстрым охлаждением многоатомных частиц при конденсации на подложке (при осаждении пленок Al и Ag скорость их охлаждения достигает  $10^6$  °C/c). Поэтому в отличие от ионно-кластерного метода пленки, полученные таким путем, имеют высокие внутренние напряжения, что делает их очень хрупкими [25].

#### 6.6. ОСАЖДЕНИЕ И ТРАВЛЕНИЕ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЫ, СОЗДАВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫМ РЕЗОНАНСОМ

К числу сравнительно новых методов получения пленок относится распыление материала мишени ионами плазмы, создаваемой с помощью ионно-циклотронного резонанса (ЭЦР) [131—133]. Метод может быть реализован с помощью устройства, изображенного на рис. 6.3,а [133].

Стандартное электронно-оптическое устройство обеспечивает получение коллимированного пучка ионов, извлекаемого из плазмы, которая возбуждается СВЧ-мощностью ( $f=2,45$  ГГц). Для этой цели СВЧ-волну, генерируемую магнетроном, по волноводу подают в область разряда, которая заключена в кварцевую трубку. Магнитная ловушка состоит из двух электромагнитов и одного постоянного магнита. Значения магнитной индукции лежат в диапазоне 0,05—0,2 Тл. Для введения СВЧ-энергии в область разряда создают такой вид колебаний, при котором электрические поля перпендикулярны статическому магнитному полю. Круглый волновод и специального типа электромагнитные катушки делают систему простой и надежной в работе.

Плазму из источника вытягивают постепенным плавным ослаблением магнитной индукции от области ЭЦР (где она достигает 0,2 Тл) к распыляемой мишени. Под действием ЭЦР происходит ускорение движущихся по круговым траекториям электронов, и при этом имеет место взаимодействие электронов с магнитным полем. Поскольку разрядная и рабочая камеры электрически изолированы друг от друга, электроны, достигая пластины, на которую осаждается пленка, сообщают ей отрицательный потенциал, в результате чего в потоке плазмы поддер-



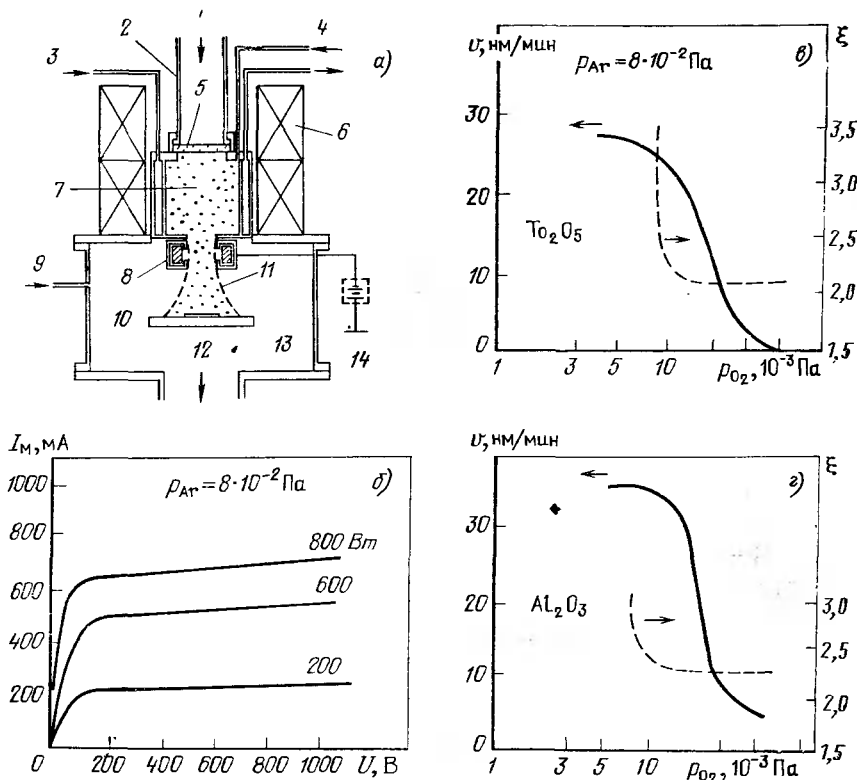


Рис. 6.3. Осаждение пленок с помощью плазмы, созданной ЭЦР:

а — схема установки (1 — ввод СВЧ-мощности от магнетрона 2,45 ГГц; 2 — волновод прямоугольного сечения; 3 — подвод охлаждаемой воды; 4 — напуск Ar; 5 — кварцевое окно; 6 — электромагнит; 7 — разрядная камера; 8 — распыляемая мишень; 9 — напуск O<sub>2</sub>; 10 — подложкодержатель с пластиной; 11 — плазменный поток; 12 — откачка; 13 — рабочая камера; 14 — источник питания); б — зависимость тока на мишень от приложенного напряжения при различных уровнях СВЧ-мощности; в — зависимость скорости осаждения и коэффициента отражения от парциального давления O<sub>2</sub> для пленок TiO<sub>2</sub> и г — для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

живается статическое электрическое поле; оно и обеспечивает перенос ионов и ускорение их в направлении к пластине.

Кольцевая водоохлаждаемая мишень из распыляемого материала (Al и Ta) размещается у окна для выхода плазмы. Температура пластин в процессе осаждения пленки лежит в диапазоне 50—150 °С. На рис. 6.3,б представлено семейство кривых, показывающих зависимость тока на мишень от приложенного напряжения для различных уровней СВЧ-мощности при давлении Ar  $p = 8 \cdot 10^{-2}$  Па. Скорость осаждения металлической пленки пропорциональна току мишени, который зависит от уровня СВЧ-мощности. Кроме того, скорость осаждения увеличивается по мере повышения давления Ar до уровня  $10^{-2}$  Па, и при

этом соответственно возрастает ток на мишень. При дальнейшем повышении давления Ag скорость осаждения начинает снижаться, по-видимому, из-за рассеяния атомов распыляемого материала на атомах Ag. Полученные пленки металлов имеют ровную, зеркальную поверхность и хорошую адгезию к пластине. Энергия, выделяемая в пластине в результате ионной бомбардировки, составляет 10—30 эВ и ее можно варьировать изменением уровня СВЧ-мощности и давления рабочего газа.

На рис. 6.3,в показаны зависимости скорости осаждения и коэффициента отражения от парциального давления  $O_2$  при осаждении пленок  $Ta_2O_5$ . ЭЦР обеспечивает полное окисление Ta при скорости осаждения более 20 нм/мин. На пластинах диаметром 100 мм неоднородность пленок  $Ta_2O_5$  по толщине была в пределах  $\pm 5\%$ , разброс значений коэффициента отражения на этой площади был не более  $\pm 0,01$ . Столь высокие параметры пленок достигаются благодаря тому, что СВЧ-возбуждение сообщает распыленным частицам металла энергию, вполне достаточную для реакций формирования окисла.

На рис. 6.3,г показаны зависимости скорости осаждения и коэффициента отражения пленок  $Al_2O_3$ . В отличие от обычных вариантов реактивного ионного распыления Al в кислородсодержащей плазме при ЭЦР имеют место высокая скорость осаждения пленок  $Al_2O_3$  и их высокое качество.

В целом осаждение пленок с помощью ЭЦР, несмотря на отсутствие предварительного нагрева пластин, обеспечивает лучшие свойства пленок металлов и их оксидов по сравнению с широко распространенными способами термического испарения в вакууме и ионного распыления. Улучшение свойств пленок может быть связано с воздействием плазмы при ЭЦР и ионной бомбардировки, что ведет к повышению скорости распыления мишени и интенсивности реакций формирования пленок металлов и их оксидов. Это процесс может быть использован для осаждения пленок нитридов, силицидов и других материалов.

Помимо осаждения пленок СВЧ НГП может быть использована также для нетермического окисления пластин монокристаллического кремния [134, 135]. Проведение окисления при низкой температуре позволяет снизить концентрацию термически стимулированных дефектов и избежать перераспределения примесей. Использованный в экспериментах реактор содержит одномерный подстраиваемый резонатор, который может функционировать в широком диапазоне расходов газов и давлений. Плазма СВЧ-разряда возбуждается генератором непрерывного действия с частотой 2,45 ГГц в дискообразном пространстве диаметром 10 см, толщиной 1,5 см и объемом 118 см<sup>3</sup>, ограниченном съемным кварцевым контейнером (рис. 6.4). Исследованы две схемы расположения пластин: в непосредственном контакте с плазмой и на удалении 15 см под ней. В обоих случаях

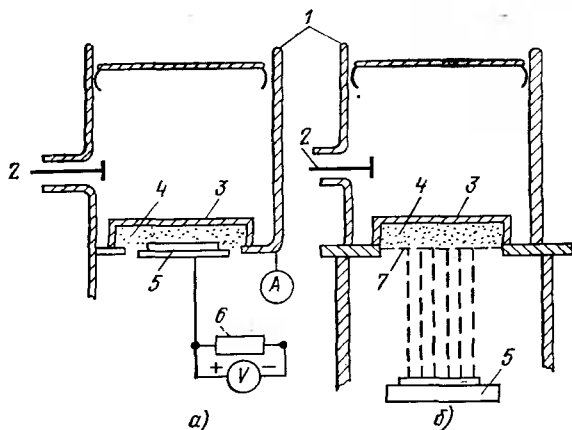


Рис. 6.4. Устройства для окисления кремниевых пластин с помощью СВЧ-плазмы:

*a* — с размещением пластины непосредственно в плазме; *б* — с удалением пластины от источника СВЧ-плазмы; 1 — одноמודовый подстраиваемый резонатор; 2 — ввод СВЧ-энергии; 3 — съемный кварцевый контейнер; 4 — СВЧ-плазма; 5 — держатель с окисляемой кремниевой пластиной; 6 — регулируемый источник для подачи постоянного смещения; 7 — сетка

плотность тока смещения, вызванного движением электронов и отрицательных ионов  $O^-$ , была порядка  $100 \text{ mA/cm}^2$  при плотности плазмы  $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Окислению подвергали подложки кремния с проводимостью *n*-типа, ориентацией поверхности в плоскости  $\langle 100 \rangle$  и удельным сопротивлением  $2,8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , полированные с одной стороны. Площадь поверхности подложек ( $3,2 \text{ см}^2$ ) была меньше возможной площади поверхности обработки пластин с использованием предлагаемой конструкции реактора. Диапазон исследованных давлений составил  $4\text{--}20 \text{ Па}$ , а СВЧ-мощности  $100\text{--}400 \text{ Вт}$ . Максимальная температура подложек не превышала  $300^\circ\text{C}$ . Толщину оксидного слоя оценивали по цвету пленки, а также на основании результатов емкостных измерений и измерений интерферометрическим методом.

Рост  $\text{SiO}_2$  в окислительном разряде происходит под воздействием отрицательных ионов кислорода, поступающих непосредственно из плазмы или образующихся на поверхности оксида в результате реакций между электронами и нейтральными частицами. В обоих случаях положительное смещение образца увеличивает скорость окисления за счет понижения потенциального барьера для ионов  $O^-$ , поступающих из плазмы, и увеличения концентрации электронов на поверхности образца. Экспериментально обнаружена линейная зависимость между скоростью окисления и напряжением смещения: скорость окисления увеличивается от  $50 \text{ нм/ч}$  при напряжении смещения  $18 \text{ В}$  до  $130 \text{ нм/ч}$  при  $50 \text{ В}$ . Напряжение смещения более  $50 \text{ В}$  на пла-

стины не подавали, чтобы избежать распыления оксида. Линейным экстраполированием приведенных выше данных к нулевому смещению получена скорость окисления 3 нм/ч.

Установлено, что скорость окисления проявляет параболическую зависимость от времени  $d^2 = kt$ , где  $d$  — толщина оксидной пленки;  $k$  — константа скорости окисления;  $t$  — время окисления. Исходя из экспериментальных зависимостей плотности тока смещения от времени и окончательной толщины оксида, рассчитали  $k$  для разных значений напряжения смещения. Значение  $k$  увеличивается от  $4,17 \cdot 10^2$  нм/мин при напряжении смещения 18 В до  $2,8 \cdot 10^3$  нм/мин для 50 В. Зависимость толщины оксидной пленки от рассчитанной поверхности суммарного накопленного заряда смещения также имеет линейный характер. При плотности заряда смещения  $70 \text{ Кл/см}^2$  толщина оксидной пленки равна 50 нм, а при  $250 \text{ Кл/см}^2$  — 123 нм. На основании этих данных было рассчитано отношение ионного тока в оксиде к суммарному току, которое лежит в диапазоне  $3,4 \cdot 10^{-4}$ — $5,4 \cdot 10^{-4}$ .

Скорость окисления зависит и от плотности плазмы. В свою очередь, плотность плазмы определяется давлением и подаваемой СВЧ-мощностью. В экспериментах плотность плазмы составила  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при 100 Вт. Были определены зависимости плотности плазмы и скорости окисления от давления кислорода. Скорость окисления имеет максимум (около 100 нм/ч) в диапазоне давлений кислорода от 6,6 до 13,3 Па и резко убывает за пределами этого диапазона до 60 нм/ч при 4 Па и 73 нм/ч при 20 Па. Пик зависимости плотности плазмы от давления кислорода наблюдается при давлении около 4 Па, при этом плотность плазмы при СВЧ-мощности 140, 120, 100 Вт составляет соответственно  $2,8 \cdot 10^{12}$ ;  $2 \cdot 10^{12}$ ;  $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . При давлениях 0,13 и 13 Па плотность плазмы для трех указанных значений СВЧ-мощности равна  $0,7 \cdot 10^{12}$ ;  $1,5 \cdot 10^{12}$ ;  $2 \cdot 10^{12}$  и  $0,9 \cdot 10^{12}$ ;  $1,1 \cdot 10^{12}$ ;  $1,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  соответственно.

Для оценки качества оксида на его поверхность наносили алюминиевые контакты и измеряли характеристики полученных конденсаторов. Напряженность электрического поля пробоя составила  $6 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ . При толщине оксидной пленки 60 нм пороговые напряжения были равны —1,9 В. Каких-либо отклонений толщины оксидной пленки, связанных с возможной неоднородностью плазмы, обнаружено не было. Оксидные пленки имели однородную толщину центральной области пластины, занимающей от 90 до 100% площади пластины. Эта область увеличилась с увеличением давления кислорода.

ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ  
ПРИ Пониженном давлении с ПЛАЗМЕННОЙ  
И ФОТОННОЙ СТИМУЛЯЦИЕЙ ПРОЦЕССА

7.1. ТРЕБОВАНИЯ К МНОГОСЛОЙНЫМ КОНТАКТНО-МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

В последние годы при изготовлении СБИС все шире применяют многослойные контактно-металлизационные системы, состоящие из контактного, барьерного и токопроводящего слоев разных металлов. К этим системам предъявляют следующие требования:

хорошая адгезия ко всем материалам на поверхности пластины;

обеспечение омического контакта на участках окон, а при необходимости одновременного формирования контактов с барьером Шоттки;

однородность пленки по толщине на плоских участках пластины в пределах  $\pm 5\%$ ;

однородность по толщине на ступеньках топологического рельефа;

высокая устойчивость к электромиграции;

ровная поверхность слоев металлизации (наличие неровностей может вызвать дефекты в верхних диэлектрических слоях и снижает качество фотолитографии, однако зеркальная поверхность пленок затрудняет совмещение при проведении фотолитографического процесса);

низкое удельное сопротивление (что необходимо для уменьшения рассеиваемой мощности и времени задержки сигнала);

слабая взаимодиффузия с материалами прилегающих слоев (что необходимо для создания мелкозалегающих слоев и получения минимально возможных размеров элементов);

пригодность для присоединения проводящих выводов;

долговременная стабильность и коррозионная стойкость;

низкий уровень радиационных нарушений поверхности пластины в процессе осаждения металла (осаждение из паровой и газовой фаз обладает в этом отношении явными преимуществами);

пригодность для формирования рисунка узких проводников (путем жидкостного или ионно-плазменного травления) с резкими краями.

Для осаждения пленок в производстве СБИС в настоящее время наиболее широко используются четыре вакуумных метода (табл. 7.1) [136].

Таблица 7.1. Сопоставление различных методов осаждения пленок при низком давлении

Параметр	Испарение в высоком вакууме	Распыление	Осаждение из газовой фазы при пониженном давлении	Активируемое плазмой осаждение из газовой фазы при пониженном давлении
Давление, Па	$10^{-4}$ — $10^{-1}$	<2	65—130	13—260
Температура осаждения, °С	25—200	25	600—1000	<300
Скорость осаждения, мкм/мин	1—2	0,01	0,1—1	0,05
Структура пленки	Аморфная	Аморфная или кристаллическая	Аморфная или поликристаллическая	Аморфная или поликристаллическая
Источники загрязнений	Нагреватели, тигли, стенки	Стенки, газ, мишень	Стенки, газ	Стенки, газ
Вид пленки	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , металлы	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , TiN, TaN	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiC
Постоянное напряжение смещения, кВ	—	0,5—3	—	0,5
Плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>	—	1—5	—	0,5

Из этих методов большинству требований, предъявляемых к многослойным контактно-металлизационным системам, удовлетворяет активируемое плазмой осаждение из газовой и паровой фаз при пониженном давлении [136]. Этот метод пригоден для формирования пленок с использованием практически любых материалов. Исходные реагенты подбирают по свойствам их паров — важны достаточно высокое давление паров, определенная температура подложек, чистота используемых реагентов, от которой в первую очередь зависит чистота формируемых пленок, а также возможность утилизации продуктов реакции.

Следует отметить, что по однородности слоев (в особенности на ступеньках топологического рельефа) термовакuumное испарение и ионное распыление при размерах элементов менее 2 мкм существенно уступают химическому осаждению из газовой фазы при пониженном давлении. Однако поскольку при осаждении из газовой фазы в качестве исходных реагентов обычно используют галогениды металлов, карбонильные и алкиловые соединения, которые по степени очистки далеки от идеала и к тому же токсичны, коррозионно активны и пожароопасны, то это может оказаться серьезным препятствием для перехода от чистых и безопасных методов физического осаждения к химическому осаждению из паровой и газовой фаз при пониженном давлении.

Тем не менее этот метод уже получил широкое распространение в технологии полупроводниковых приборов и ИС для осаждения разных металлов и их сплавов. Проведение осаждения при низком давлении позволяет существенно уменьшить температуру процесса выращивания пленок Al и его сплавов (до 520 °С). Условия осаждения Al варьируют в зависимости от типа источника, конструкции реактора, материала подложек, необходимой степени матовости поверхности и т. д. Хорошо исследовано осаждение тугоплавких металлов W, Ta, Mo и их силицидов, а также Pt и PtSi, проводятся исследования для Cr, Nb, Ni и Os. Чрезвычайно необходимый для многих контактно-металлизационных систем Ti оказался своего рода «уродом» в семье перечисленных металлов — свойства его соединений позволяют проводить осаждение лишь путем высокотемпературного пиролиза либо восстановления галогенидов водородом.

## 7.2. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И СВОЙСТВ ПЛЕНОК, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Осаждение слоев из газовой фазы — это сложный процесс, включающий следующие стадии: перенос исходных реагентов в зону осаждения, их превращение в газовой фазе в промежуточные продукты, массоперенос исходных веществ или промежуточных продуктов к поверхности нагретых подложек, реакции на поверхности подложек с образованием слоя материала, десорбцию продуктов реакции и их удаление из рабочей зоны реактора.

До середины 70-х годов для осаждения диэлектрических и полупроводниковых слоев из газовой фазы использовали в основном реакторы атмосферного давления (РАД). Однако повышение требований к качеству и равномерности слоев по тол-

Таблица 7.2. Сопоставление параметров процессов осаждения в РПД и РАД

Параметр	РПД	РАД
Давление, Па	$10^2-10^3$	$10^5$
Производительность, пластин в 1 ч	До 200	До 50
Снижение производительности при увеличении диаметра пластин	Слабее	Сильнее
Равномерность температуры в рабочей зоне, °С	1	5—10
Разброс слоев по толщине, ±%:		
по диаметру пластины	2	5—10
по парти пластин	3	10—15
Скорость осаждения кремния, нм/мин	5—20	20—100
Расход газа-носителя, м <sup>3</sup> /ч	0,05	1,5—5
Затраты на обработку одной пластины, отн. ед.	1	5—10

щине, увеличение диаметра обрабатываемых пластин, необходимость снижения расхода газа-носителя, повышения производительности процесса и снижения затрат на обработку одной пластины потребовали перехода от РАД к реакторам с пониженным давлением (РПД), работающим при  $10^2$ — $10^3$  Па. В табл. 7.2 приведено сопоставление параметров процесса осаждения в РПД и РАД [26].

Процесс осаждения слоев в РПД должен удовлетворять следующим требованиям [26]:

#### Технические

Допустимая неравномерность слоев и толщины, %:

по пластине  $\pm 2$ ,

по рабочей зоне РПД  $\pm 3$ .

Допустимое отклонение от свойств материала (концентрация фосфора в поликремнии, слоях фосфоросиликатного стекла и др.)  $\pm 5$ — $10$ %.

Допустимая невоспроизводимость свойств от цикла к циклу  $\pm 5$ %

Допустимая плотность дефектов 1,5 част./см<sup>2</sup>.

Длительность цикла менее 2 ч.

Производительность 100 пластин диаметром 150 мм за цикл.

#### Эксплуатационные

Простота конструкции, высокая надежность, удобство в обслуживании, автоматическое управление процессом с использованием дисплея. Возможность проведения регламентной чистки и ревизии узлов и деталей установки.

#### Техника безопасности

Полное исключение возможности взрыва. Использование нетоксичных и в особо разрешенных случаях слаботоксичных веществ с утилизацией продуктов реакции и обеспечение безопасности при проведении регламентной чистки и ревизии узлов и деталей установки.

#### Экономические

Использование наиболее доступных, безопасных и недорогих реагентов, допускающих большой срок хранения.

В РПД пленки можно осаждать без плазменной стимуляции процесса, однако при этом необходим высокотемпературный нагрев пластины. Так, кремний осаждают в РПД при 1100—1200 °С. Такая сравнительно высокая температура вызывает значительное перераспределение легирующей примеси вблизи границы раздела пленки с подложкой, что ограничивает минимальную толщину и электропроводность слаболегируемых пленок, когда они осаждаются на подложке с сильнолегируван-



Таблица 7.3. Параметры и свойства пленок оксида и оксинитрида кремния, осажженных из газовой фазы без стимуляции и с плазменной стимуляцией процесса

Параметр	Осаждение из газовой фазы при пониженном давлении		
	Осаждение из газовой фазы при пониженном давлении	Стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы при пониженном давлении	
Исходные реагенты	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2$	$\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O}$	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2 + \text{O}_2$
Соотношение реагентов	1:4	1:1,1:8	1:5
Частота генератора, кГц	—	57; $13,5 \cdot 10^3$	$10$ ; $5 \cdot 10^2$ ; $10^3$ $13,5 \cdot 10^3$ , $2,45 \cdot 10^6$
Давление, Па	$10^2 - 10^3$	$10^2 - 5 \cdot 10^3$	13—80
Температура осаждения, °С	700—900	300—400	100—200
Скорость осаждения, нм/мин	20—100	20—40	7—10
Состав получаемой пленки	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_x\text{N}_y$ , $x \sim 1,9$ ; $y \sim 0,15$	$\text{SiO}_x$ , $1,5 < x < 2$
Полоса абсорбции	Si—O	$\text{H}_2\text{O}$ , SiOH, SiH, SiO	SiO, SiC, SiH, $\text{CH}_x$ , OH, $\text{SiOC}_2\text{H}_5$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,07—2,27	2,26—2,35	—
Коэффициент отражения	1,44—1,46	1,49—1,9	1,45—1,5
Пробивное напряжение	$8 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$\sim 5 \cdot 10^6$
Тип напряжения в пленке	Сжимающие	Растягивающие	—
Скорость травления, нм/мин	$\sim 13$	$\sim 160$	—

ной приповерхностной областью. Чтобы уменьшить автолегирование пленок, осаждение кремния следует проводить при более низких температурах (750—800 °С). Высокая температура пластины, необходимая для реализации пиролитических реакций, не позволяет проводить осаждение пленок на ранее осажденные слои или пленочные структуры (например,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на Al), если последние могут расплавляться, испаряться, вступать в химическую реакцию или диффундировать в осаждаемую пленку.

Активация процесса осаждения с помощью НГП оказывает существенное влияние на кинетику, механизм роста и свойства получаемых пленок. При этом имеется возможность в несколько раз понизить температуру процесса (табл. 7.3) [136], что по существу дает возможность осаждать пленки на любые ранее созданные структуры и устраняет возможность возникновения больших внутренних напряжений в пленках при последующем охлаждении кремниевых пластин.

Поскольку в РПД вследствие высокого коэффициента диффузии образуется однородная среда, в которой значительно улучшены условия массопереноса и практически отсутствует

Таблица 7.4. Параметры и свойства пленок нитрида кремния, осажденных из газовой фазы с плазменной стимуляцией процесса при различных исходных реагентах

Параметр и свойство пленок	Исходные реагенты	
	$\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 + \text{N}_2$	$\text{SiH}_4 + \text{N}_2$
Скорость осаждения, нм/мин	20	5—8
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,5—2,8	—
Коэффициент отражения	1,9—2,2	2,0—2,4
Пробивное напряжение, В/см	$10^6$ — $10^9$	$10^6$
Удельное сопротивление, Ом·см	$10^{20}$ при Si/N=1 $10^5$ при Si/N=2	—
Соотношение Si/N	0,8—1	0,7—5
Энергетическая щель в оптическом диапазоне, эВ	5 при Si/N=0,75 2,5 при Si/N=2	3—3,5
Скорость травления, нм/мин		
49 % HF	150—300	10—600
30 % HF	20—30	10—30
20 % HF	—	20—80
Глубина проникновения ионов N <sup>+</sup> , нм	<10	—

градиент концентрации реагентов в объеме РПД, то пленка равномерно покрывает любую сложную топографию пластины.

Исходные реагенты оказывают существенное влияние на свойства получаемых пленок (табл. 7.4) [136].

### 7.3. ТИПИЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРОВ И УСТАНОВОК

Первоначально для возбуждаемого НПП химического осаждения пленок из газовой фазы в качестве реактора использовали модернизированные диффузионные печи. Печь представляет собой кварцевую трубу, с одного из торцов которой вводят газ или газовую смесь, а с другого конца откачивают реагенты. Возбуждение НПП в объеме реактора осуществляется емкостным или индукционным методом. В тех случаях, когда необходимо выравнивание скорости осаждения по длине рабочей зоны, производят периодическое переключение подачи или откачки газа с одного конца реактора на другой (так называемый триггерный режим РПД). Для этой же цели используют РПД с распределенным вводом газа и двусторонней откачкой, что устраняет эффект обеднения газовой смеси и способствует более равномерному распределению реагентов по длине рабочей зоны.

Пластины в зоне осаждения располагают перпендикулярно потоку газа на небольшом (3—15 мм) расстоянии друг от друга. Число пластин при одной загрузке достигает 100 шт. Поток рабочего газа формируется в кольцевом зазоре между стенками круглого кварцевого реактора и цилиндрической поверхностью, образуемой партией загруженных пластин. Пограничный

слой возникает вдоль стенки реактора и распространяется по радиусу к центру реактора, а поступление реагентов к пластинам происходит в результате диффузии. При определенных условиях между пластинами могут возникнуть также конвекционные потоки, что подтверждается симметричностью свойств получаемых слоев относительно вертикальной оси.

По мере движения газовой смеси по реактору происходит расходование компонентов на образование слоя осаждаемого материала, вследствие чего концентрация компонентов постепенно снижается. Поэтому при плоском температурном профиле наблюдается уменьшение скорости осаждения по длине реактора, что особенно характерно для осаждения низкотемпературного оксида кремния и легированного фосфором поликремния. В этом случае необходимо компенсировать очень сильный спад скорости осаждения по длине реактора, для чего вводят температурный градиент по рабочей зоне, увеличивают скорость пролета по реактору газовой смеси и разбавляют ее инертным газом для снижения парциального давления основных компонентов. В некоторых случаях для выравнивания скорости осаждения ввод газа делают распределенным по рабочей зоне.

Свойства пленок, получаемых в РПД, при активации процесса осаждения НГП помимо давления, скорости газового потока и его компонентов зависят также от частоты и мощности приложенного напряжения, электрического смещения на подложках и расстояния между электродами. Такое большое число взаимосвязанных операционных параметров показывает необходимость управления процессом осаждения с помощью микропроцессора или ЭВМ с тем, чтобы обеспечить воспроизводимость свойств получаемых тонкопленочных слоев.

Таким образом, установка, использующая РПД, должна обеспечивать возможность регулировки и поддержания с требуемой точностью давления, газового потока и состава его компонентов, частоты и мощности приложенного напряжения, а также электрического смещения, поданного на подложки. Кроме того, должна быть обеспечена воспроизводимость и стабильность температурного градиента по длине рабочей зоны реактора.

Перед осаждением пленок в планарном реакторе (рис. 7.1) предварительно его рабочий объем 1 с помощью диффузионного 12 и вращательного 14 насосов откачивают до давления  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  Па. На входе реактора в кварцевую трубу помещен контейнер 2, в который загружен кусковой кремний, нагретый до  $1150^\circ\text{C}$  с помощью электропечи 3. Основной рабочий газ в реакторе четырехфтористый кремний  $\text{SiF}_4$ ; он подается через отдельную газовую магистраль, снабженную измерителем расхода газа 15 и регулятором потока 16. Проходя через нагретый

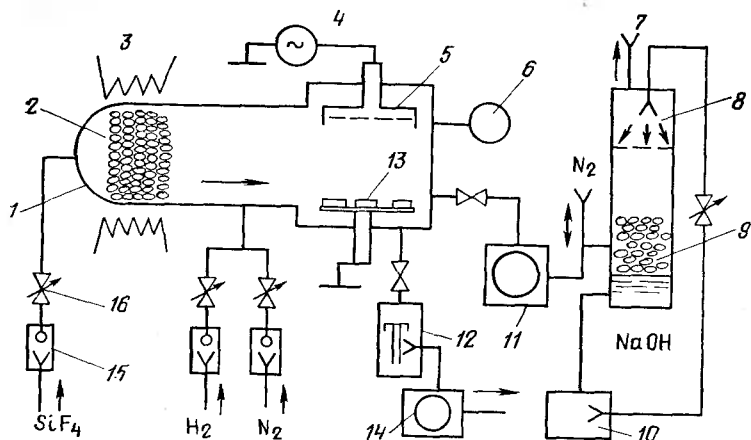


Рис. 7.1. Схема установки для осаждения пленок нитрида кремния в реакторе планарного типа при активации процесса с помощью НГП

тый контейнер 2 с кремнием,  $\text{SiF}_4$  реагирует с ним,  $\text{SiF}_4 + \text{Si} \rightarrow 2\text{SiF}_2$ , в результате чего образуется более активный газ  $\text{SiF}_2$ . Одновременно с  $\text{SiF}_4$  и  $\text{SiF}_2$  в объем реактора через отдельные газовые магистрали подается водород  $\text{H}_2$  и азот  $\text{N}_2$ . Находясь на нижнем (заземленном) электроде подложки 13 нагреются до  $380^\circ\text{C}$ , давление газовой смеси, измеряемое теплоэлектрическим датчиком 6, составляет 100 Па. Откачка рабочего объема реактора в процессе осаждения пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  производится вращательным насосом 11.

Продукты реакции нейтрализуются с помощью специального устройства 8, снабженного контейнером 9 с пористой керамикой, на которую сверху подается  $\text{NaOH}$ , для чего используется перекачивающий насос. Выброс нейтрализующих продуктов осуществляется через трубку 7. Процесс осаждения активизируется с помощью НГП, которая возбуждается между плоскими электродами с помощью ВЧ-генератора 4. Генератор работает на частоте 13,56 МГц, плотность ВЧ-мощности  $0,64 \text{ Вт/см}^2$ . ВЧ-мощность подается на верхний электрод 5 [8].

В промышленных типах стимулируемых плазмой РПД производится осаждение пленок двуоксида и нитрида кремния (при температуре  $300^\circ\text{C}$ ), поликремния, фосфоро- и боросиликатных стекол. Наибольшее распространение получил реактор планарного типа, у которого скорость осаждения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$  составляет  $70\text{--}100 \text{ нм/мин}$ . Однако бомбардировка поверхности пластин заряженными частицами НГП вызывает значительные радиационные повреждения, что существенно ухудшает электрофизические характеристики создаваемых структур. Для уменьшения радиационных повреждений специалисты фирмы

НЕС (Япония) предложили располагать обрабатываемую пластину на тыльной стороне одного из плоских электродов. Как показали эксперименты, скорость осаждения пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при этом снижается в 5 раз, но значительно улучшаются электрофизические свойства получаемых пленок.

К числу наиболее современных установок со стимулируемым НПП осаждением пленок из паровой и газовой фаз следует отнести модель Precision 5000 фирмы Applied Materials (США), которая помимо осаждения диэлектрических пленок позволяет планаризовать получаемые структуры. Поштучная загрузка пластин из стандартных кассет в реакционные камеры происходит в специальном блоке с помощью робота, обеспечивающего угол поворота  $360^\circ$ . Установка имеет четыре отдельные реакционные камеры диаметром 330 мм и обеспечивает индивидуальную обработку пластин диаметром 100—200 мм. Пластины нагреваются с помощью кварцевых ламп, вводы рабочих газов расположены у нижнего основания реакционных камер. После окончания процесса осаждения предусмотрена возможность очистки каждой камеры в газоразрядной плазме (продолжительность очистки около 1 мин).

Согласно имеющимся прогнозам, с переходом к производству СБИС следующего поколения возрастет значение метода стимулированного плазмой осаждения пленок из газовой фазы. Ожидается, что к 1991 г. доля оборудования этого типа составит 65—70% всего объема подобного рода установок.

Эпитаксиальные пленки кремния в РАД формируются при температуре 1050—1150 °С. Замена РАД на РПД позволяет при давлении  $5 \cdot 10^3$ — $10^4$  Па снизить температуру процесса до 650—800 °С. Дальнейшее снижение давления до 2—3 Па дает возможность использовать НПП не только для активации процесса осаждения пленок, но и одновременно для предварительного ионного травления пластин, а также удаления собственного оксида с поверхности кремния.

На рис. 7.2 схематично показан реактор для выращивания эпитаксиальных пленок кремния, представляющий собой кварцевую трубу диаметром 160 и длиной 380 мм. Труба нагревается расположенными снаружи мощными галогенными лампами, позволяющими получать в реакторе температуру до 800 °С. ВЧ-напряжение частотой 13,56 МГц подводится к электроду в верхней части кварцевой трубы. Снизу трубы находится заземленный электрод. Пластины размещаются в центре трубы на конусообразной подставке. С помощью турбомолекулярного насоса реактор откачивают до давления  $10^{-5}$  Па. Затем на верхний электрод подают ВЧ-напряжение мощностью 50 Вт, а на пластины — постоянное отрицательное смещение 300 В. Одновременно в реактор напускают  $\text{Ag}$  до давления 2 Па. При этом в объеме реактора возникает тлеющий разряд. Образующиеся

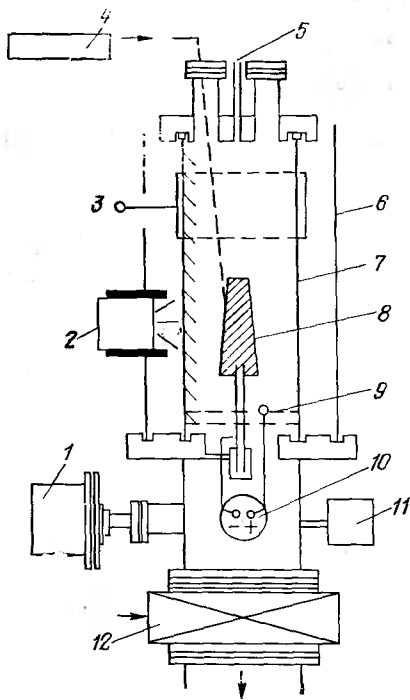


Рис. 7.2. Реактор для выращивания эпитаксиальных пленок кремния:

1 — квадрупольный масс-спектрометр; 2 — галогенные лампы; 3 — ВЧ-электрод; 4 — оптический пирометр; 5 — напуск газа; 6 — экран; 7 — кварцевая труба; 8 — подставка для крепления пластины; 9 — заземленный электрод; 10 — подача напряжения смещения; 11 — датчик давления; 12 — вакуумный затвор

положительные ионы Ag бомбардируют поверхности пластин, освобождая их от загрязнений и удаляя тонкий слой естественного оксида. После очистки пластин напуск Ag прекращают, подачу напряжения смещения на пластины отключают и в объем реактора напускают силан, снижая уровень ВЧ-мощности до 20 Вт. Скорость роста эпитаксиального кремния при температуре пластин 600 °С с активацией НГП составляет около 6 нм/мин, а при повышении температуры до 750 °С она увеличивается до 30 нм/мин.

Концентрация  $O_2$  и С не превышает  $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и имеет максимум на глубине 100 нм. Удельное сопротивление пленок 40 Ом·см.

Электрофизические свойства эпитаксиальных пленок, полученных при активированном НТП низкотемпературном процессе, близки к свойствам материала кремниевой подложки [137].

#### 7.4. ТИПИЧНЫЕ РЕАКЦИИ И ОСНОВНЫЕ ГАЗЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ПЛЕНОК

Поликристаллический кремний, диоксид кремния, нитрид кремния и силициды тугоплавких металлов получают разложением летучих соединений кремния, в качестве которого чаще всего используют моносилан  $SiH_4$  (табл. 7.5) [136]. Моносилан — стабильный, но токсичный и пирофорный газ, способный непредсказуемо самопроизвольно воспламениться при контакте с воздухом. Опасность воспламенения и взрыва сильно увеличивается при скоплении моносилана в местах, где застаивается воздух и скапливается пыль. Поэтому необходима вентиляция, обеспечивающая эффективное перемешивание моносилана с воздухом и его непрерывное удаление из производственного по-

Таблица 7.5. Типичные реакции и газы, используемые при осаждении пленок из газовой фазы при пониженном давлении

Получаемые пленки	Типичные реакции	Рабочий газ	Газовые примеси и продукты реакций
Поликремний	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{поли-Si} + 2\text{H}_2$	$\text{SiH}_4$ , $\text{SiCl}_4$ ; $\text{SiHCl}_3$ , $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ; $\text{Si}_2\text{H}_6$ и их смеси	$\text{PH}_3$ , $\text{AsH}_3$ , $\text{B}_2\text{H}_6$ , $\text{H}_2$
Диоксид кремния	$\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{SiH}_4 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 2\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{N}_2$	$\text{SiH}_4$ , $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ , $\text{N}_2\text{O}$ , $\text{O}_2$ , $\text{CO}_2$ и их смеси	$\text{PH}_3$ , $\text{AsH}_3$ , $\text{B}_2\text{H}_6$ , $\text{H}_2$ , $\text{CO}$
Нитрид кремния	$3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$	$\text{SiH}_4$ , $\text{NH}_3$ , $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ и их смеси	$\text{AsH}_3$ , $\text{PH}_3$ , $\text{H}_2$
Салициды	$\text{WF}_6 + 2\text{SiH}_4 \rightarrow \text{WSi}_2 + 6\text{HF} + \text{H}_2$	$\text{WF}_6$ , $\text{SiH}_4$	$\text{HF}$ , $\text{H}_2$
Вольфрам	$\text{WF}_6 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{W} + 6\text{HF}$	$\text{WF}_6$ , $\text{H}_2$	$\text{HF}$
Алюминий	$2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Al} + 6\text{HCl}$	$\text{H}_2$ и его смеси с $\text{N}_2$ , $\text{He}$ , $\text{Ar}$	$\text{HCl}$

мещения. Природа самовоспламенения силана не связана с его деструкцией. Это по существу мгновенный взрыв, при котором вся реакция протекает за  $10^{-3}$  с, а давление достигает  $10^9$  Па. Поэтому баллоны с моносиланом должны храниться вне производственного помещения — под открытым небом или в укрепленных бетонированных бункерах.

Помимо моносилана применяют тетрахлорид кремния ( $\text{SiCl}_4$ ) — сильно токсичную коррозионную дымящуюся жидкость; тетрахлорсилан ( $\text{SiHCl}_3$ ) — воспламеняющуюся, коррозионную бесцветную жидкость с удушающим запахом; дихлорсилан ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ) — очень токсичную легко воспламеняющуюся коррозионную жидкость; дисилан ( $\text{Si}_2\text{H}_6$ ) — легко воспламеняющийся пирофорный газ. Во избежание осаждения диоксида кремния и углерода при осаждении кремния в качестве газоносителя используют высокочистый водород, обеспечивающий восстановительную газовую среду, свободную от углеводородов. Для продувки реактора применяют азот. Поскольку примеси ухудшают кристаллическую структуру и проводимость кремниевых пластин, летучие соединения ( $\text{SiH}_4$ ,  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  и др.) должны быть высокой степени чистоты. Это требование относится также к  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ , в особенности в части влаги, которая может вызывать окисление поверхности обрабатываемых пластин.

Источником летучих добавок в процессе химического осаждения из паровой фазы также обычно являются газы. Эпитаксиальные слои легируют бором для получения проводимости *p*-типа и фосфором для получения проводимости *n*-типа. Летучими

Таблица 7.6. Физико-химические свойства вещества, используемых для осаждения пленок из газовой фазы

Соединение	Химическая формула	Молекулярная масса	Состояние при нормальных условиях	$T_{пл}$ , °C	$T_{кип}$ , °C	Плотность		Пределы допустимая концентрация, мг/м <sup>3</sup>	Воспламеняемость и взрывоопасность
						газа, г/л	жидкости, г/см <sup>3</sup>		
Моносилил	SiH <sub>4</sub>	32,1	г	-185	-112	1,44	0,68 (-185)*	1	Воспламеняется на воздухе при $T=140^{\circ}\text{C}$
Дихлорсилан	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	101,0	г	-122	-8,3	—	1,42 (-120)	5	Пределы взрываемости в смеси с воздухом 4,1—9,8 %
Дисилан	Si <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	62,2	г	-132	-14,3	2,30	0,91 (25)	5	—
Тетрахлорид кремния	SiCl <sub>4</sub>	169,9	ж	-68	57,6	2,16	1,48 (20)	20	—
Тетраэтоксилан	Si(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>	208,3	ж	-82	166,5	—	0,99 (25)	—	—
Диметилдихлорсилан	Si(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	129,0	ж	-86	70,3	—	1,06 (20)	1	Воспламеняется при $T=445^{\circ}\text{C}$ , пределы взрываемости в смеси с воздухом 0,8—39 %
Фосфин	PH <sub>3</sub>	34,0	г	-134	-87,4	1,53	0,75 (-90)	0,1	Воспламеняется в смеси с воздухом 0,5—100 %, самовозгорается при $T=40^{\circ}\text{C}$ , взрывоопасен
Треххлористый фосфор	PCl <sub>3</sub>	137,3	ж	-90	75,1	—	1,56 (25)	1	—
Оксихлорид фосфора	POCl <sub>3</sub>	153,3	ж	1,2	105,8	—	1,68 (25)	—	—
Триметилфосфат	(CH <sub>3</sub> O) <sub>3</sub> PO	140,1	ж	—	195	—	1,21 (20)	—	—
Диборан	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	27,7	г	-165	-92,5	1,24	0,45 (-112)	0,05	Сильнотоксичен
Трипропилборат	(C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O) <sub>3</sub> B	188,8	ж	—	176	—	0,86 (25)	—	Самовоспламеняется на воздухе при $T=100^{\circ}\text{C}$
Триизопропилборат	(i-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O) <sub>3</sub> B	188,8	ж	—	139	—	0,82 (25)	—	—
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,0	г	-78	-33,5	0,77	0,68 (25)	—	Самовоспламеняется при $T=$ $=650^{\circ}\text{C}$ , взрывоопасен в смеси с воздухом 13—79 %
Закись азота	N <sub>2</sub> O	44,0	г	-91	-88,5	1,98	1,23 (-89)	20	Образует взрывоопасные смеси с органическими веществами
Арсин	AsH <sub>3</sub>	78,0	г	-117	-62,5	2,70	1,64 (-64)	0,05	Сильно токсичен

Примечание: г—газообразное; ж—жидкое. \* В скобках указана температура, °C.



добавками могут служить бромид бора  $BBr_3$  — коррозионная, бесцветная или слегка желтоватая прозрачная жидкость с резким раздражающим запахом; хлорид бора  $BCl_3$  — токсичный коррозионный газ; трехфтористый бор  $BF_3$  — токсичный коррозионный газ; фосфин ( $PH_3$ ) — сильно токсичный легко воспламеняющийся газ; оксихлорид фосфора  $POCl_3$  — коррозионная дымящаяся жидкость с сильным раздражающим запахом; пентофторид фосфора ( $PF_5$ ): трехбромистый фосфор  $PBr_3$ ; треххлористый фосфор  $PCl_3$ ; трехфтористый фосфор ( $PF_3$ ).

Основные свойства веществ, используемых при осаждении пленок из газовой фазы при пониженном давлении, приведены в табл. 7.6 [26].

#### 7.5. СТИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ СВЧ

Несмотря на то что плазменная стимуляция дает возможность существенно снизить температуру процесса, широкое использование этого метода ограничивается двумя причинами. Во-первых, бомбардировка растущей пленки частицами высоких энергий создает радиационные нарушения, для устранения которых необходим высокотемпературный отжиг, что, по существу, сводит к нулю преимущества низкотемпературного процесса. Во-вторых, в плазме образуется множество нейтральных и ионизованных фрагментов молекул, что сильно ограничивает выбор исходного материала. Удобные во многих отношениях комплексные металлоорганические соединения разлагаются в плазме, образуя разнообразные мономеры, в результате чего осаждаются нежелательные полимеры. Кроме того, при плазменной стимуляции наблюдаются сильно выраженная зависимость параметров процесса друг от друга и необходимость обеспечения давления, достаточного для возбуждения и поддержания разряда в плазме (10—100 Па).

Перечисленные недостатки в значительной мере могут быть устранены, если с помощью НГП производить только диссоциацию молекул исходного продукта, не допуская в то же время бомбардировки растущей пленки частицами высоких энергий. Это может быть реализовано в низкотемпературном методе получения металлических и диэлектрических пленок путем переноса вещества в плазменном потоке. Метод основан на возбуждении СВЧ-разряда ( $f=2,45$  ГГц) в газе или в смеси рабочего и транспортирующего газов. Ионизованное вещество переносится продольным магнитным полем к коллектору, на котором и осаждается в виде тонкой пленки. Первоначально плазму возбуждали непосредственно в рабочем газе. Однако при этом пленки осаждаются на стенках разрядной трубки, а реакция в некоторых случаях может начинаться до зажигания разряда. От этих

недостатков свободен источник плазмы с обменным зарядом (перезарядкой). В этом случае поток плазмы генерируется в разрядной трубке в среде инертного газа (Ar) либо газов, не реагирующих со стенками разрядной трубки ( $N_2$ ). Затем образовавшийся поток плазмы поступает в трубку перезарядки, туда же вводится рабочий газ (например, силан). В разрядной трубке происходит обмен зарядом между ними (перезарядка) и формируется вторичный поток плазмы, который транспортируется к коллектору. Физические свойства пленок  $SiO_2$ , полученных этим методом при температуре, близкой к комнатной, идентичны свойствам термического оксида  $SiO_2$ , полученного при  $T=1000^\circ C$ . Кроме того, при использовании плазмы СВЧ-ряда обеспечивается резкая граница раздела между диэлектриком и полупроводником с низкой плотностью фиксированного заряда и высокое напряжение пробоя ( $5 \cdot 10^6$  В/см).

При осаждении тонких пленок аморфного кремния с одновременной активацией процесса с помощью СВЧ НПП ( $f=2,45$  ГГц) (рис. 7.3), пластины, на которые осаждаются пленки аморфного кремния, размещают на специальном держателе 9, помещаемом внутри цилиндрического стеклянного реактора 8. Реагенты подают в реактор по двум коаксиальным трубкам. Через внутреннюю трубку из нержавеющей стали диаметром 6 мм подают смесь  $90\% Ar + 10\% SiH_4$ , а через наружную кварцевую трубку диаметром 25 мм — чистый Ar. Каждый газопровод снабжен вентилем 3, измерителем потока 4 и регулируемым натекателем. Кроме того, на наружном газопроводе имеется теплоэлектрический манометр 11, с помощью которого измеряется давление. Энергию СВЧ-поля подают через волновод 6 и с ее помощью возбуждают СВЧ-разряд в кварцевой трубке

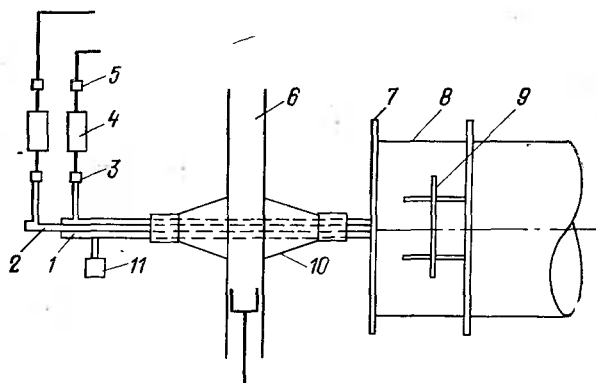


Рис. 7.3. Установки для осаждения пленок аморфного кремния:  
1, 2 — внешняя и внутренняя трубки; 3 — вентиль; 4 — измеритель потока; 5 — напуск газа; 6 — волновод СВЧ-энергии; 7 — пластина из нержавеющей стали; 8 — реактор; 9 — держатель пластин; 10 — цилиндрическая полость; 11 — манометр

с аргоном. Электромагнитное поле СВЧ-разряда не протекает внутрь реактора, отделенного пластиной 7 из нержавеющей стали. Попадая в цилиндрическую полость 10, силан диффундирует в НГП Ag и под воздействием плазмы диссоциирует на молекулы  $\text{SiH}_x$  и атомы Si. Последние, попадая в рабочий объем реактора 8, осаждаются на закрепленные в держателе 9 пластины и образуют высококачественные пленки аморфного кремния. Продукты реакции удаляются непрерывной откачкой реактора. Рабочее давление в реакторе 40 Па, подача Ag и его смеси с  $\text{SiH}_4$  70—80  $\text{см}^3/\text{мин}$ , СВЧ-мощность 150 Вт. Температура пластин в процессе осаждения 300 К, скорость осаждения достигает 40 нм/мин. Использование коаксиальных трубок для подачи реагентов (расстояние от конца внутренней трубки до держателя пластин 20 мм) устраняет осаждение кремния на стенках реактора, а отсутствие плазмы в объеме реактора — бомбардировку растущей пленки высокоэнергетическими частицами, а следовательно, и радиационные нарушения, что позволяет получать высококачественные пленки аморфного кремния с высокой равномерностью на большой площади пластин диаметром 100 мм [138].

#### 7.6. ФОТОННАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ И ТРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Фотонная стимуляция процесса осаждения пленок из газовой фазы обеспечивает наиболее низкую температуру по сравнению со всеми другими процессами, используемыми в технологии кремниевых ИС (табл. 7.7) [139—141].

Фотонная стимуляция процесса осаждения пленок может быть реализована коротковолновым излучением от ртутной лампы (рис. 7.4) [142]. Стенки реакционной камеры выполнены из нержавеющей стали и имеют кварцевое окно, через которое фотоны ( $\lambda=247,7$  нм) излучаемые ртутной лампой, проникают к поверхности кремниевых пластин. Последние помещены на плату, нагреваемую снизу излучением ламп ИК-диапазона. Приготовленную заранее смесь реакционных газов пропускают через резервуар со ртутью; она проходит над поверхностью пластин и откачивается вакуумным насосом. Процесс проводят при давлении 100 Па, подаче  $\text{SiH}_4 \sim 3$   $\text{см}^3/\text{мин}$  и температуре пластин 50°C; скорость осаждения 10 нм/мин.

Под воздействием излучения с  $\lambda=257,7$  нм атомы становятся активными:



При напуске силана имеет место передача энергии от активных атомов  $\text{Hg}^*$  к  $\text{SiH}_4$ :

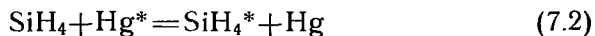


Таблица 7.7. Диапазон температур, используемых при различных технологических процессах кремниевой технологии

Процесс	Температурный диапазон, °C					
	0	250	500	750	1000	1250
Эпитаксия						—
Диффузия						—
Осаждение силицида вольфрама из газовой фазы при пониженном давлении						—
Окисление кремния					—	—
Осаждение золота					—	—
Осаждение фосфоросиликатного стекла					—	—
Отжиг					—	—
Осаждение диоксида кремния из газовой фазы при атмосферном давлении					—	—
Осаждение нитрида кремния из газовой фазы при атмосферном давлении					—	—
Окисление кремния при повышенном давлении				—	—	—
Осаждение поликремния и диоксида кремния при пониженном давлении			—	—		
Осаждение алюминия				—		
Стимулируемое плазмой осаждение диоксида кремния и поликремния из газовой фазы			—	—		
Стимулируемое плазмой осаждение нитрида кремния из газовой фазы			—	—		
Фотонно-стимулированное осаждение нитрида кремния из газовой фазы	—					

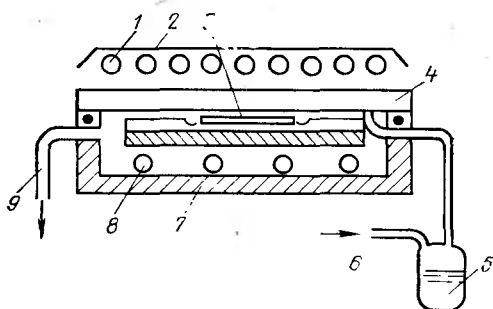


Рис. 7.4. Установка для осаждения пленок  $\text{SiO}_2$  с фотонной стимуляцией процесса:

1 — лампа УФ-диапазона; 2 — экран; 3 — пластина кремния; 4 — кварцевое окно; 5 — резервуар со ртутью; 6 — напуск газа; 7 — стенки реактора; 8 — лампы ИК-диапазона; 9 — откачка

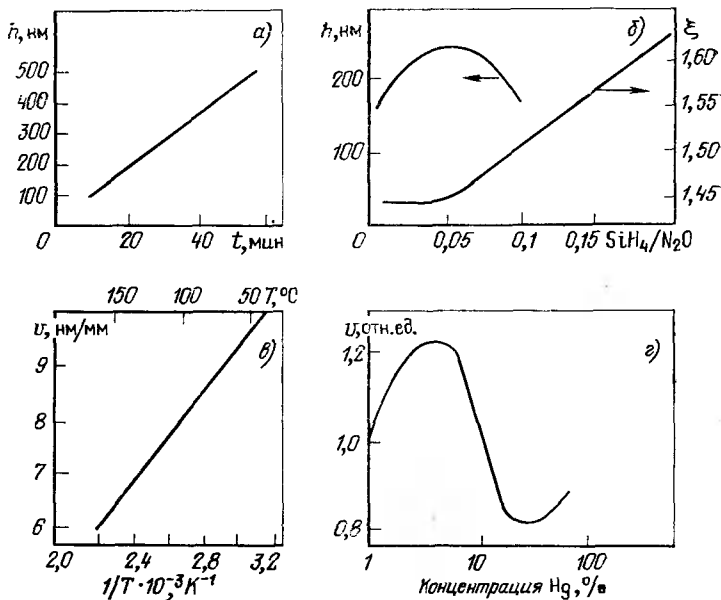
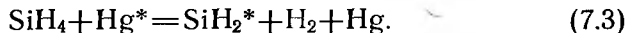


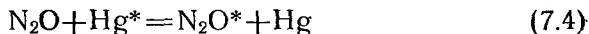
Рис. 7.5. Влияние технологических факторов на свойства пленок  $SiO_2$ :

а — зависимость толщины пленки  $h$  от времени осаждения  $t$ ; б — зависимость толщины пленки  $h$  и коэффициента отражения  $\xi$  от отношения  $SiH_4/N_2O$ ; в — зависимость скорости осаждения  $v$  от температуры пластины кремния; г — зависимость скорости осаждения  $v$  от концентрации Hg

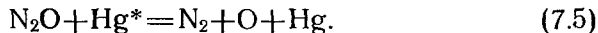
или



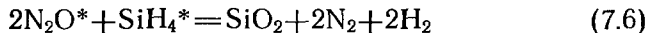
При напуске оксида азота имеет место передача энергии от активных атомов  $Hg^*$  к  $N_2O$ :



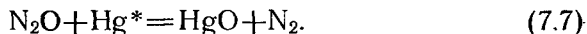
или



Если не рассматривать промежуточные реакции образования свободных радикалов, то конечная реакция имеет вид



и сопутствующая ей реакция



На свойства пленок  $SiO_2$ , полученных с помощью фотонной стимуляции процесса, большое влияние оказывают технологические параметры (рис. 7.5).

На основе описанного процесса и макета реактора проектируется создание установок непрерывного действия для получе-

ния пленок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  со скоростью осаждения до 50 нм/мин на пластины кремния диаметром 150 мм. Предусматривается перегрузка пластин из кассеты в кассету, производительность установок до 100 пластин в 1 ч.

Пленки  $\text{SiO}_2$ , полученные при фотонной стимуляции процесса, обладают хорошими электрическими и механическими параметрами: малой плотностью проколов ( $\leq 3 \cdot 7 \text{ см}^{-2}$ ), высокой электрической прочностью ( $\geq 3 \text{ МВ/см}$ ), малой неравномерностью (менее 3% на пластине диаметров 100 мм). Кроме того, проведение процесса при низкой температуре (ниже  $50^\circ\text{C}$ ) сводит к минимуму диффузию Al в Si и образование бугорков на алюминиевой металлизации, характерной для высокотемпературных процессов.

В последние годы для фотонной стимуляции технологических процессов все шире начинают применять лазеры. К достоинствам лазерной обработки относятся:

- высокая скорость протекания локальных лазерных процессов, которая на несколько порядков превышает скорость всех известных однородных процессов, причем чем меньше размер зоны лазерного воздействия, тем выше скорость реакции;

- минимальное загрязнение, коробление и деформация пластин в процессе их обработки;

- низкие радиационные дефекты в обрабатываемых структурах, поскольку энергия наиболее короткого УФ-излучения не превышает нескольких электрон-вольт;

- универсальность воздействия, позволяющая с помощью лазерной обработки реализовать процессы осаждения, модификации, удаления (травления) и отжига материалов.

Лазерное излучение может активировать производящие травление частицы непосредственно на поверхности твердого тела или вблизи нее, а также саму рабочую поверхность, способствуя удалению с нее продуктов реакции. Механизм протекания процесса определяется природой взаимодействующих фаз (газ — твердое тело или жидкость — твердое тело), а также параметрами лазерного излучения (длина волны, интенсивность, длительность импульса и др.). Лазерное излучение обладает высокой когерентностью и моноэнергетичностью и легко может быть сфокусировано на рабочей поверхности в пятно малых размеров (менее 1 мкм) с высокой плотностью энергии на единицу площади, что обеспечивает протекание локальных процессов. Сканируя обрабатываемую поверхность таким сфокусированным лучом или же перемещая ее, можно формировать конфигурацию будущей микросхемы с высоким разрешением без применения маски. В том случае, когда не требуется высокой интенсивности излучения, возможна реализация различных процессов (например, проекционного травления) с применением эталонных фотошаблонов.

Универсальность лазерной обработки показывает перспективность ее широкого использования в производстве интегральных микросхем, поскольку отвечает тем тенденциям в развитии технологии ИС, которые наметились за последние годы.

Расширению области использования лазерной обработки в производстве ИС способствовало появление эксимерных лазеров — нового класса газовых лазеров, в которых активной средой являются квазимолекулы, существующие только в возбужденном состоянии (эксимерные молекулы). Возбужденное состояние создается электронным пучком или с помощью разряда (самостоятельного или с предварительной ионизацией активной среды различными способами). Переходя в основное состояние, эксимерные молекулы испускают кванты УФ-излучения. Высокая выходная мощность УФ-излучения эксимерных лазеров на длине волны 157—353 нм сделала их перспективными для применения в технологии ИС.

Уникальные свойства эксимерных лазеров (табл. 7.8) делают их наиболее перспективными для использования в технологическом оборудовании полупроводникового производства [143, 144].

Малая длительность импульсов излучения эксимерных лазеров (5—80 нс) недостаточна для эффективного проведения процессов непосредственного локализованного осаждения и удаления пленок, в связи с чем предпринимаются попытки увеличить ее.

Особенно интенсивно проводятся работы по увеличению надежности и срока службы эксимерных лазеров. Так, применение магнитоуправляемого коммутатора позволяет увеличить КПД

Таблица 7.8. Параметры современных промышленных образцов эксимерных лазеров

Параметр	Среднее значение	Наивысшее значение
Длина волны, нм	249	157
Энергия в импульсе, Дж	0,4	1,5
Частота повторения импульсов, Гц	150	1000
Средняя мощность, Вт	60	150
Длительность импульса, нс	12	80
Стабильность от импульса к импульсу, %	±3	±2
Пространственная неоднородность, %	—	3
Ширина спектра, нм	0,3	0,001
Расходимость излучения, мрад	3	0,2
Срок службы (количество вспышек без смены газов)	10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>
Занимательный объем, м <sup>3</sup>	0,85	0,39

разрядного контура и срок службы его высоковольтных элементов. Долговечность таких систем достигает  $10^8$  импульсов без смены газов. На предприятиях фирмы Questen (США) такая же долговечность достигается вынесением вторичных конденсаторов за пределы газоразрядной области и использованием криогенной системы обработки рабочих газов. Усилия специалистов фирмы XMR (США) направлены на увеличение надежности эксимерных лазеров применением твердотельной схемы возбуждения. В Японии разработка эксимерных лазеров проводится в рамках восьмилетней программы освоения передовых полупроводниковых технологий. Планируется изготовить лазер мощностью 1 кВт (с энергией излучения в импульсе 1 Дж) для использования в установках химического осаждения пленок из газовой фазы.

В зависимости от состава квазимолекулы газовую активную среду эксимерных лазеров можно разделить на три группы: на димерах инертных газов ( $\text{Ar}_2$ ,  $\text{Xe}_2$ ,  $\text{Kr}_2$  и др.); на молекулах, включающих атом галогена ( $\text{XeF}$ ,  $\text{XeCl}$ ,  $\text{KrF}$  и др.); на оксидах инертных газов ( $\text{XeO}$ ,  $\text{KrO}$  и др.). Лазеры на димерах инертных газов дают излучение в области вакуумного УФ-излучения. Лазеры на оксидах инертных газов работают на переходах между состоянием квазимолекулы, составленной из атома инертного газа и возбужденного атома кислорода. Малая энергия связи в этих квазимолекулах ведет к образованию лишь небольшого числа возбужденных атомов кислорода, несмотря на значительное количество атомов кислорода, в результате чего лазеры этого типа имеют невысокие выходные параметры. Наиболее высокие КПД и среднюю мощность по сравнению с другими эксимерными лазерами имеют лазеры на галогенидах инертных газов. Активная среда таких лазеров состоит в основном из буферного газа ( $\text{Ne}$  или  $\text{He}$ ) и небольших добавок инертных и галогенсодержащих газов. Типичное соотношение давлений компонентов рабочей смеси газов следующее:  $\text{Ne}(\text{Ne}) : \text{Ar}(\text{Kr}, \text{Xe}) : \text{F}_2(\text{NF}_3, \text{Cl}_2, \text{BCl}_3 \text{ и др.}) = 100 : 1,0 : 0,1$ . Общее давление смеси  $10^5$  Па.

Большое разнообразие эксимерных лазеров позволяет охватить широкий диапазон УФ-спектра. В отличие от других лазеров выходной луч эксимерного лазера имеет сравнительно невысокую когерентность, что устраняет интерференционные явления на обрабатываемой полупроводниковой пластине. УФ-излучение обеспечивает субмикронное разрешение при проведении различных технологических операций. Сильное поглощение большинства металлов и полупроводников в УФ-диапазоне дает возможность концентрировать энергию лазерного луча на небольшой глубине от поверхности, что позволяет локализовать область теплового воздействия при обработке пластин путем варьирования энергии и длительности импульса. Фотоны УФ-



излучения, обладая сравнительно невысокой энергией (менее 10 эВ), способны взаимодействовать с большинством материалов, применяемых в производстве ИС, инициируя в них различные химические и термические реакции. Наибольшее распространение получили системы с электроразрядной накачкой. Они компактны, способны обеспечить более 10 млн. импульсов за один цикл заполнения газом и имеют килогерцовую частоту повторения импульсов при длительности импульса от 10 до 100 нс. Средняя мощность импульса составляет десятки ватт, а пиковая — несколько мегаватт. При дискретно-плавной стабилизации (дискретность достигается сменой газов, плавкость — повышением энергии разряда) обеспечивается долговременная стабильность энергии излучения от импульса к импульсу в пределах  $\pm (5-10) \%$ .

Лазерный фотолиз позволяет независимо изменять мощность лазера, длину волны излучения и положение пластины в пространстве. Единственным требованием, предъявляемым к давлению газа или парогазовой смеси, является обеспечение малой оптической плотности. Поскольку фотолиз протекает вдоль пути распространения лазерного пучка, получаемые при этом пленки содержат меньшее число примесей, чем при использовании плазменной стимуляции, когда пластина загрязняется примесями, образующимися в результате бомбардировки стенок камеры ионами. Фотолиз успешно применяют для осаждения пленок металлов,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Скорость осаждения пленок при фотолизе определяется мощностью лазерного импульса, давлением в камере и площадью, на которую осаждается пленка, и обычно лежит в диапазоне от 100 до 300 нм/мин. Изоляционные пленки, полученные методом фотолиза, характеризуются малой плотностью дефектов и высоким пробивным напряжением даже при малой толщине. Эти пленки можно использовать в качестве масок для проведения процессов диффузии, а также в качестве пассивирующих слоев в производстве КМОП ИС. Уже в настоящее время разработана методика лазерного осаждения пленок диоксида кремния толщиной менее 10 нм и интенсивно проводятся работы по лазерному осаждению пленок нитрида кремния и других пассивирующих материалов на кремний и на арсенид галлия.

Большие потенциальные возможности для фотонной стимуляции процессов имеет применение лазеров с перестраиваемой длиной волны, что может обеспечить разрыв строго определенных химических связей, необходимых для получения пленок того или иного материала.

Процессом диссоциации донорного газа и последующим зародышеобразованием пленки можно управлять путем изменения интенсивности лазерного излучения, что позволяет решать ряд проблем, возникающих в процессе осаждения пленок из па-

ровой фазы при нагреве (неконтролируемая диффузия примесей, растрескивание пластин, образование и распространение дефектов) или воздействии плазмы (радиационные нарушения, загрязнение пластин примесями, выделяющимися со стенок реактора в результате ионной бомбардировки). В настоящее время исследована возможность разложения фторида вольфрама в водороде под воздействием излучения эксимерного лазера с целью осаждения высококачественных пленок вольфрама с высокой удельной проводимостью. Аналогичным путем выращиваются пленки Mo, Cr, Al, Zr и In, а также диоксида кремния и оксида алюминия. Пленки характеризуются хорошей адгезией к пластине, высокой степенью однородности, низкими механическими напряжениями, а также хорошим покрытием ступенек оксида.

Лазерные фотохимические процессы характеризуются большим числом физических механизмов. Фотодиссоциация включает разрыв молекулярных связей непосредственно УФ-фотонами с выделением атомов, которые затем осаждаются или реагируют с подложкой. Поскольку энергия связей в большинстве случаев составляет несколько электрон-вольт, для начала фотолитического процесса чаще всего требуются УФ-лазеры. В некоторых случаях, например в случае с  $Cl_2$ , достаточно энергии фотонов лазера видимого диапазона.

При пиролизе происходит разрыв молекулярных связей под действием тепловых колебаний. Примером подобного процесса является осаждение Si при пиролизе  $SiH_4$  на подложках Si, нагреваемых Ar-ионным лазером. В этом случае газ  $SiH_4$  не поглощает свет на длине волны лазера. Внедрение легирующих атомов, которые осаждаются на поверхности вследствие фотолитического или пиролизного процесса, требует термической активации. Нагрев подложки лазером позволяет легирующим атомам внедряться по механизму твердофазной либо жидкофазной диффузии.

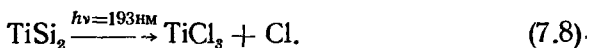
Адсорбированные молекулярные пленки играют важную роль. Они могут диссоциировать по механизму пиролиза или фотолитического, оставляя на поверхности атомы, создающие центры зарождения или фотоосаждения.

Для осаждения металлов можно использовать фотолитический металл-алкилов или карбонил под действием лазера с непрерывным излучением на длине волны  $\lambda = 257$  нм. Стимулируемое лазером осаждение применяли для получения фотомасок, а также для непосредственного формирования электродов различной геометрии при изготовлении полевых транзисторов. Осаждение кремния на подложках из кварца впервые было продемонстрировано с помощью  $CO_2$ -лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм). Поскольку коэффициент поглощения кремния при  $\lambda = 10,6$  мкм слишком мал для нагрева кремниевых пластин, локальное осаждение кремния на кремниевые пластины демонстрировалось с использова-

нием Ag-лазера, и при этом линии шириной 2—20 мкм и толщиной 1 мкм получали со скоростью 0,1 мм/с. При добавлении в качестве легирующих газов  $\text{BCl}_3$  или  $\text{B}(\text{CH}_3)_3$  были получены линии поликристаллического кремния с удельным сопротивлением  $\rho < 1,5 \cdot 10^{-3}$  Ом·см.

Силицид титана  $\text{TiSi}_2$  — перспективный материал для низкоомной металлизации МДП СБИС можно получать лазерно-стимулированным химическим осаждением из паровой фазы с использованием смеси  $\text{TiCl}_4$  и  $\text{SiH}_4$  (2:1) особой чистоты. При возбуждении смеси эксимерным лазером  $\text{ArF}$  с  $\lambda = 193$  нм, работающим в импульсном режиме с частотой повторения 10 Гц и мощностью 30 мВт в импульсе, скорость осаждения пленок  $\text{TiSi}_2$  оставляла 20 нм/мин [145].

Плазмохимическое осаждение инициируется прямой диссоциацией



Согласно масс-спектрометрическому анализу, при воздействии излучения эксимерного лазера в газовой смеси преобладают  $\text{HCl}$  и  $\text{H}_2$ , что свидетельствует о протекании реакции



Удельное сопротивление пленок  $\text{TiSi}_2$  при температуре подложек  $\text{Si}$  в процессе осаждения 400 °С составляет  $3 \cdot 10^{-4}$  Ом·см, а при 450 °С —  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см. После отжига пленок при 700 °С структура пленок соответствует орторомбическому  $\text{TiSi}_2$ , удельное сопротивление уменьшается до  $2 \cdot 10^{-5}$  Ом·см.

Фотонную стимуляцию процесса с помощью эксимерного лазера на  $\text{ArF}$  ( $\lambda = 193$  нм) успешно использовали для химического осаждения из газовой фазы гидрогенизированного аморфного кремния в результате фотодиссоциации молекул дисилана ( $\text{Si}_2\text{H}_6$ ) [146]. Для исключения прямого разогрева подложки луч лазера, обеспечивающий 100 имп./с при 140 мДж/имп., был направлен строго параллельно поверхности подложки. Поскольку край фундаментального поглощения  $\text{Si}_2\text{H}_6$  составляет 200 нм,  $\text{ArF}$ -лазер обеспечивает прямое фоторазложение реагирующего газа. Проведенные измерения показали, что в пленках  $\alpha\text{Si}:\text{H}$ , осажденных при температуре подложки 200, 300 и 400 °С, концентрация  $\text{H}_2$  составляла соответственно 17; 9,3 и 7,2 %. Максимальная скорость осаждения пленок  $\alpha\text{Si}:\text{H}$  составляла 5,5 нм/с при общем давлении 133 Па и расходе  $\text{Si}_2\text{H}_6$  20 см<sup>3</sup>/мин. При снижении скорости осаждения до 0,1 нм/с удалось получить пленки, обладающие фото- и тепловой проводимостью, совпадающими со значением этих величин для пленок, полученных плазмохимическим газофазным осаждением.

Сравнительно недавно разработан процесс формирования тонких пленок химическим осаждением из газовой фазы под воздействием потока радикалов, образованных многофотонной диссоциацией газовых молекул и генерацией радикалов под воздействием лазерного излучения. Благодаря высокой плотности мощности имеет место многофотонное поглощение энергии в газовой фазе, в результате чего отпадают ограничения, обусловленные пороговой энергией для различных комбинаций газ-источников и типа лазера. Новый процесс позволяет применять для формирования пленок широкий ассортимент газ-источников.

Осаждение металлических непрозрачных пленок с помощью лазерного излучения позволяет устранять проколы, царапины и участки фотошаблонов с искаженной геометрией. Для этого вполне пригодна серийная установка лазерной ретуши ЭМ-511А, укомплектованная импульсным лазером на молекулярном азоте ( $\lambda=337$  нм,  $\tau=6-8$  нс,  $f=1000$  Гц), обеспечивающая лазерно-химическое осаждение (ЛХО) непрозрачных пленок. Для реализации ЛХО исходным реагентом использовали пентакарбонил железа  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  при давлении 100 Па и давлении Ag более  $4 \cdot 10^4$  Па, обеспечивая при воздействии лазерного излучения осаждение металлических непрозрачных пленок с высокой адгезией к подложке. В ходе испытаний было установлено, что на установке ЭМ-551А, дополненной устройством ЛХО, можно устранять дефекты с линейными размерами 2—25 мкм в течение нескольких минут. Для ретуширования дефектов больших размеров или сложной формы необходимо последовательное осаждение пленки внутри дефектной области. В этом случае удается получить резкий край пленки с погрешностью не хуже 0,5 мкм.

В [147] исследовали возможность корректировки топологии фотошаблонов методом ЛХО. Мощность лазерного излучения регулировали с помощью ступенчатого attenuатора и более плавно (в небольших пределах) — напряжением питания лазера. Контроль средней мощности лазера осуществляли фотодиодом. При плотности мощности в импульсе  $2 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и частоте повторения импульса 1000 Гц за время 100 с была нанесена прямая полоска толщиной 50 нм, шириной 2 и длиной 30 мкм. Созданный методом ЛХО дополнительный элемент топологии фотошаблона имел высокую адгезию и достаточную оптическую плотность, причем за пределами лазерного луча фоновое осаждение отсутствовало. Это показывает, что подобный метод корректировки топологии фотошаблонов может быть эффективно использован при разработке и производстве СБИС.

Фотонную стимуляцию можно применять не только для процессов осаждения пленок, но и для процессов травления микроструктур. Широко используемая в настоящее время плазмен-

ная стимуляция процессов травления одновременно воздействует на обрабатываемую структуру потоком ионов, электронов и фотонов. Однако для воспроизводимости, управления и контроля такой широкий спектр стимулирующих воздействий нежелателен, поскольку при этом нет возможности выделить вклад каждого конкретного стимулирующего воздействия в процесс травления и независимо управлять его параметрами. Так, повышение концентрации электронов увеличением мощности разряда автоматически изменяет концентрацию и энергию ионов, а также интенсивность излучения плазмы. Еще сложнее дело обстоит, когда НГП является одновременно средой, источником частиц, производящих травление, и стимулятором, например, в процессах плазменного и реактивного ионно-плазменного травления. В этом случае изменение стимулирующего воздействия (концентрации электронов) приводит к изменению еще и концентрации химически активных частиц, производящих травление.

Невозможность точного выделения стимулирующего воздействия из плазмы, а также независимого управления его параметрами без изменения параметров других воздействий и потоков частиц, производящих травление, приводит:

к значительному усложнению конструкции оборудования для реализации процессов травления за счет необходимости высокой точности и стабильности поддержания операционных параметров;

к необходимости введения устройств контроля момента окончания процессов травления слоев;

к большому разбросу геометрических и электрофизических параметров обрабатываемых структур, особенно при групповых способах обработки;

к ограничению функциональных возможностей процессов травления по скорости, селективности, разрешению и однородности обработки.

Все это сдерживает и затрудняет внедрение процессов травления с использованием НГП в том случае, когда необходимо получать микроструктуры с субмикронными размерами элементов.

Таблица 7.9. Длина волны и энергия излучения эксимерных лазеров

Излучающая частица	Длина волны, нм	Энергия, эВ	Излучающая частица	Длина волны, нм	Энергия, эВ
F <sub>2</sub>	157	8,0	ClF	284	4,4
ArF	193	6,4	XeCl	308	4,0
KrCl	222	6,0	I	342	3,4
KrF	249	5,0	XeF	353	3,2

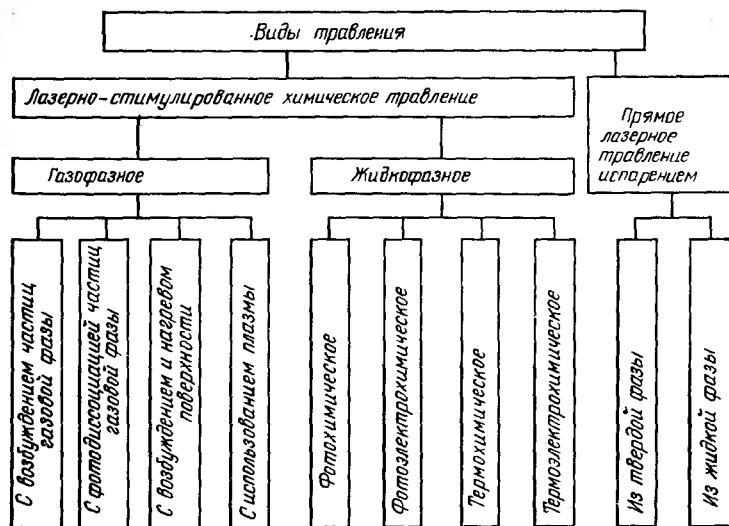


Рис. 7.6. Классификация методов лазерного травления

Создание в последние годы разнообразных эксимерных лазеров, работающих в УФ-области спектра (табл. 7.9), стимулировало разработку различных методов лазерного травления (рис. 7.6) [148].

Из представленных на рис. 7.6 методов в производстве ИС наибольшее распространение получили газофазные процессы лазерно-стимулированного химического травления микроструктур (жидкофазные процессы, а также прямое лазерное травление испарением из-за низкой разрешающей способности не применяются). При этом следует иметь в виду, что хотя лазерно-стимулированное травление и использование излучения в области дальнего УФ-спектра и обеспечивает высокое разрешение, однако отнюдь не является универсальным процессом.

Как показали исследования [149], при облучении МОП-структур эксимерным лазером на  $\text{AgF}$  ( $\lambda=193$  нм,  $E=6,4$  эВ) образуются нейтральные центры захвата носителей в тонком подзатворном оксиде. Поглощение лазерного излучения в  $\text{SiO}_2$  сопровождается разрывом связей атомов Si и группы OH. Возникающие при этом ионы Si становятся центрами захвата электронов и вызывают появление нейтральных ловушек в тонком подзатворном оксиде. Образующиеся в процессе РИПТ радиационные нарушения не удается устранить даже с помощью высокотемпературного отжига ( $T=900^\circ\text{C}$ ), что делает этот процесс непригодным для низкотемпературной технологии МОП СБИС.

Травление поверхности твердого тела химически активными частицами (ХАЧ) в газовой фазе состоит из нескольких стадий и включает в себя диссоциативную и недиссоциативную хемосорбцию, реакцию между адсорбированными частицами и атомами поверхности, а также удаление продуктов реакции с поверхности. Лазерное излучение способно увеличить скорость протекания каждой из перечисленных стадий процесса. Ускорение хемосорбции связано с резонансным возбуждением молекул газовой фазы и нагревом поверхности. Для простых молекулярных газов ( $F_2$ ,  $Cl_2$  и др.) хемосорбция, как правило, сопровождается диссоциацией молекул. При недиссоциативной хемосорбции лазерное возбуждение адсорбированных молекул вызывает их разложение с образованием радикалов или же обратную десорбцию в газ. Радикалы имеют высокую химическую активность и энергично взаимодействуют с атомами поверхности. Поверхностная реакция стимулируется также фононным и электронным возбуждением атомов решетки твердого тела и в некоторых случаях образованием на поверхности носителей заряда. Кроме того, если продукты реакции нелетучие при 300 К, то в ряде случаев лазерное возбуждение и нагрев поверхности способствуют их десорбции в газовую фазу.

Травление с возбуждением частиц газовой фазы характеризуется близостью энергии колебательного возбуждения молекул к энергии активации реакции, что играет важную роль в механизме взаимодействия газ — твердое тело.

Скорость травления в очень сильной степени зависит от длины волны лазера, интенсивности лазерного луча и давления рабочего газа. Травление происходит только в том случае, если луч лазера направлен перпендикулярно поверхности обрабатываемой пластины. В то же время, если при прочих равных условиях лазерный луч проходит параллельно поверхности кремниевой пластины на расстоянии всего 1 мм от нее, травления не происходит, поскольку молекулы  $SF_6^*$ , возбужденные в результате многофотонного процесса, быстро дезактивируются за счет газофазных столкновений, причем эффект дезактивации усиливается с ростом давления. Таким образом, возбужденные молекулы способны травить поверхность, только когда они образуются в непосредственной близости от нее.

Травление с фотодиссоциацией молекул газовой фазы может происходить даже в том случае, если луч лазера направлен параллельно поверхности обрабатываемой пластины на значительном расстоянии от нее. Для реализации этого процесса нужна высокая интенсивность лазерного луча. Так, при интенсивности излучения  $CO_2$ -лазера более  $10 \text{ Дж/см}^2$  молекулы  $SF_6$  диссоциируют с образованием  $SF_5$  и атомов F. Нестабильная молекула  $SF_5$  далее вновь разлагается на  $SF_4$  и еще один атом фтора. Аналогичным образом идет процесс диссоциации

галогенсодержащих многоатомных молекул типа  $CF_3X$  ( $X=Cl, Br, I, CF_2X_2$  и др.). Молекулы галогенов ( $F_2, Cl_2$ ) легко распадаются при возбуждении их электронных состояний в результате фотолиза в видимом и УФ-диапазонах длин волн, а образующиеся при этом активные атомы  $F^*$  и  $Cl^*$  диффундируют к поверхности подложки и активно взаимодействуют с ней. Поскольку время жизни активных атомов  $F^*$  и  $Cl^*$  больше, чем возбужденных частиц, то они способны взаимодействовать с поверхностью даже в том случае, когда они образуются на значительном расстоянии от нее. Например, если луч  $CO_2$ -лазера с интенсивностью  $I \geq 10$  Дж/см<sup>2</sup> направлен параллельно поверхности подложки и находится от нее на расстоянии нескольких миллиметров, кремний интенсивно травится активными атомами  $F^*$ . Двуоксид кремния интенсивно травится радикалами  $CF_3^*$ , которые образуются при воздействии фотонов ИК-спектра, а также активными атомами  $Cl^*$ , возникающими при диссоциации  $Cl_2$  под воздействием излучения аргонового лазера.

Травление с возбуждением и нагревом поверхности связано с поглощением излучения в ИК-видимой и УФ-областях спектра подавляющим большинством материалов, применяемых в производстве ИС (что прежде всего относится к металлам). Двуоксид кремния сильно поглощает излучение ИК-фотонов с  $\lambda=10$  мкм. Кремний имеет максимум поглощения при  $\lambda=265$  нм. Лазерный луч почти всегда вначале взаимодействует с электронной оболочкой атомов поверхности. Как правило, возбуждение поверхности вызывает нагрев подложки, в результате чего резко возрастает скорость травления. Нагрев подложки оказывает определяющее влияние на процесс травления в том случае, когда продукты травления нелетучи (так, большинство галогидов металлов имеют низкое давление паров при комнатной температуре, чем объясняется низкая скорость их плазменного травления). Например,  $MnZn$ -феррит практически не травится в плазме, однако при фокусировке луча  $Ag$ -лазера на поверхности феррита в атмосфере  $CCl_4$  скорость травления достигает 10 мкм/с. Такое громадное различие в скоростях травления (более чем на три порядка) объясняется тем, что плазмохимическое травление — это в основном низкотемпературный процесс, в то время как лазерно-стимулированные реакции часто протекают при высоких температурах.

Лазерно-стимулированное плазменное травление (ЛСПТ) состоит в том, что традиционное реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ) дополняется лазерным облучением подвергаемого травлению образца. При этом значительно увеличивается скорость травления и существенно уменьшаются радиационные дефекты в результате уменьшения прикладываемой ВЧ-мощности. Химически активные частицы при ЛСПТ можно получать в двух процессах: возбуждения и диссоциации моле-



кул химически активного газа под действием фотонного облучения лазера и электронно-ударной диссоциации в тлеющем ВЧ-разряде. Возникающие при этом химически активные частицы адсорбируются на поверхности подвергаемого травлению образца в результате диффузии активных атомов и радикалов или же направленного потока заряженных частиц и вступают в химическую реакцию с атомами поверхностного слоя. При ЛСПТ луч лазера всегда направлен перпендикулярно к поверхности обрабатываемого образца. Возникающие при этом термические и фотоэффекты способствуют протеканию химических процессов и десорбции образующихся продуктов реакции. Скорость ЛСПТ зависит от подаваемой на электрод ВЧ-мощности, состава и давления газовой смеси и характеристик газového излучения.

При проведении лазерно-стимулированного реактивного ионно-плазменного травления GaAs с помощью установки, изображенной на рис. 7.7 [148], с использованием излучения второй гармоники лазера на алюмоиттриевом гранате ( $\lambda = 532$  нм, ширина импульса 150 нс), глубина травления GaAs зависит от мощности лазерного излучения, от ВЧ-мощности и от давления газовой смеси (рис. 7.8). При отсутствии ВЧ-мощности (кривая 3 на рис. 7.8,а) реакция не начинается до тех пор, пока мощность лазерного облучения не обеспечит плавление GaAs (40 мВт).

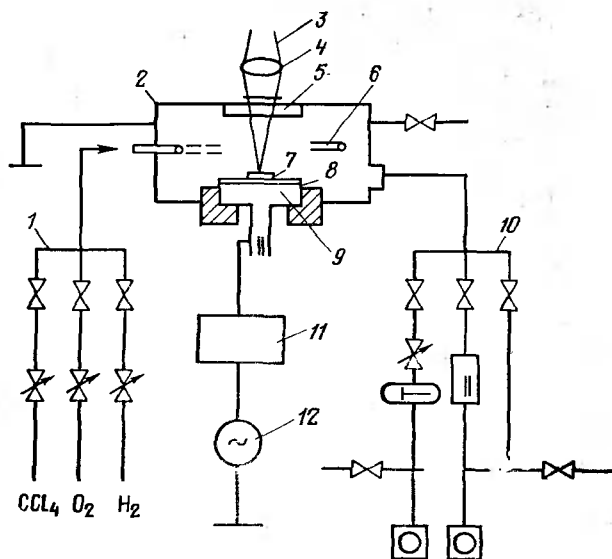


Рис. 7.7. Схема установки для проведения лазерно-стимулированного РИПТ:

1 — система напуска газов; 2 — корпус реактора; 3 — лазерный луч; 4 — линза; 5 — верхний заземленный плоский электрод; 6 — распределитель газа; 7 — обрабатываемая подложка; 8 — кварцевая плита; 9 — нижний водоохлаждаемый плоский электрод; 10 — система откачки; 11 — согласующее устройство; 12 — источники ВЧ-мощности

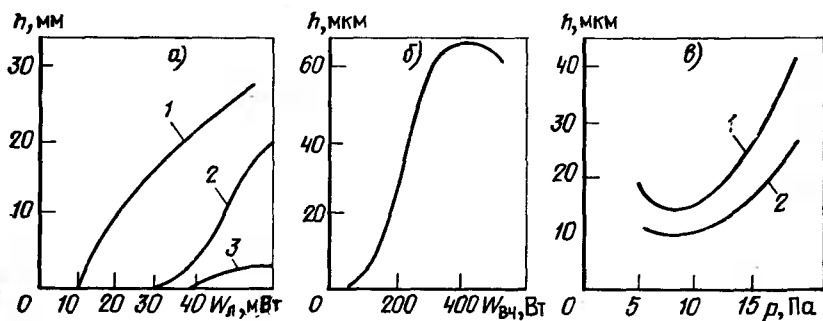


Рис. 7.8. Зависимость глубины лазерно-стимулированного РИПТ GaAs в смеси 30 %  $CCl_2$ +70 %  $H_2$  (диаметр лазерного пятна 100 мкм) от мощности лазерного излучения  $W_l$  при постоянной ВЧ-мощности  $W_{BЧ}=200$  Вт и различных значениях давления газовой смеси (а) (1 —  $p=15$  Па; 2 —  $p=1,5$  Па; 3 —  $p=1,5$  Па;  $W_{BЧ}=0$ ), от ВЧ-мощности (б) ( $p=1,5$  Па,  $W_l=100$  мВт) и от давления газовой смеси при различных  $W_l$  (в) (1 —  $W_l=200$  мВт; 2 —  $W_l=100$  мВт; продолжительность травления 120 с)

Скорость РИПТ GaAs без лазерного облучения при ВЧ-мощности 200 Вт ( $0,125$  Вт/см<sup>2</sup>) составляет 5 нм/с при  $p=1,5$  Па и увеличивается до 13 нм/с при  $p=15$  Па. В случае облучения поверхности GaAs фотонами скорость травления увеличивается в 10 раз и более и одновременно резко снижается пороговая мощность, необходимая для начала травления. С ростом ВЧ-мощности от 100 до 400 Вт глубина травления быстро увеличивается (рис. 7.8,б). Дальнейшее снижение при более высоких мощностях связано с эффектом переосаждения подвергаемого травлению материала [148].

По данным фирмы Electronic Trend Publications (США), увеличение производства заказных, полузаказных и специализированных СБИС (в том числе с субмикронными топологическими нормами) потребует широкого использования установок лазерно-стимулированного осаждения и травления для безмасочной обработки пластин. Эти установки позволяют изготовить СБИС без шаблонов за несколько часов по сравнению с несколькими неделями, которые требуются в современном производстве. Поэтому ожидается, что среднегодовые темпы прироста выпуска такого оборудования за период 1990—1995 гг. могут превысить 40%, а к 2000 г. доля оборудования для проведения лазерно-стимулированных процессов в общем объеме продажи всего технологического оборудования для изготовления ИС составит около 60%.

Типичная установка для реализации лазерно-стимулированных процессов помимо камеры для обработки пластин с прозрачным окном в крышке или в боковой стенке для ввода лазерного излучения имеет: подсистему точного перемещения пла-

стин, оптическую подсистему для управления лазерным пучком, подсистемы подачи и контроля газов и микропроцессор или управляющую ЭВМ. В лабораторных условиях на подобного рода установках проводили осаждение более 20 различных материалов (Ni, Al, двуоксида и нитрида кремния, поликремния и др.). Успешно реализовано травление стандартных для микроэлектроники диэлектрических пленок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Благодаря локальному нагреву пластины лазерно-стимулированные процессы являются по существу «холодными», поскольку в них не происходит деградации или разрушения ранее созданных  $p-n$ -переходов, диффузии примесей или подложки в активную область пластины, а также перемещения имеющихся в кристаллической решетке дефектов.

Широко применяемая в настоящее время диффузия и имплантация начинают постепенно заменяться лазерным легированием из паровой фазы, для чего применяют лазер видимого (обычно на александрите) или УФ-излучения (экимерные лазеры). На подобного рода установках можно создавать слои с малым количеством дефектов кристаллической решетки и неглубокие  $p-n$ -переходы с четкими границами раздела.

В последние годы ведутся разработки лазерных установок осаждения, травления и легирования, с помощью которых можно будет выполнять следующие операции:

непосредственное формирование перед монтажом в корпус рисунка металлизации вентиляльных матриц, что позволит сократить цикл создания заказных ИС с нескольких дней до нескольких часов;

изготовление бездефектных шаблонов, когда нанесение рисунка шаблона реализуется без фоторезиста при одновременном контроле и исправлении дефектов, а также модификации уже имеющихся шаблонов;

исправление дефектов пластин, что позволит увеличить выход годных ИС примерно на 50%;

непосредственное формирование структуры всех ИС на пластине (с выполнения рисунка до проведения испытаний) в одной установке.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВАКУУМНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК8.1. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Еще сравнительно недавно наиболее распространенным способом получения тонких пленок было испарение и конденсация веществ с помощью термического или электронно-лучевого нагрева в высоком вакууме ( $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Па) [2—4, 9]. Несколько позднее начали интенсивно развиваться ионно-плазменные методы осаждения пленок [3], среди которых лидирующая роль принадлежит магнетронному методу распыления [5, 19—23], когда процесс осаждения проводится в Ag при давлении 0,1—1 Па. Вопросы рационального использования откачных средств для осаждения пленок термовакuumным и ионно-плазменным методами рассмотрены в [153, 154].

В последние годы все более широкое распространение находит осаждение пленок из паровой и газовой фаз при давлении 10—500 Па [8, 26]. Помимо того что процессы осаждения переместились из области высокого вакуума сначала в средний, а затем в низкий вакуум, одновременно существенно изменился состав газовой среды. Если при производстве ИС и БИС приходилось в основном откачивать воздух и инертные газы (главным образом Ag и его смесь с  $N_2$ ) и речь шла о физике вакуума, то при изготовлении СБИС необходима откачка агрессивных, коррозионных, огнеопасных, пирофорных и токсичных газов. Таким образом, ситуация коренным образом изменилась, и первоочередное значение приобрели вопросы химии вакуума [155, 156].

Для новых вакуумных технологических процессов, используемых в производстве ИС (табл. 8.1), характерны более высокие рабочие давления в сочетании с большими скоростями откачки и, как следствие, с большими газовыми потоками (рис. 8.1,а). При этом в одних случаях высокий поток газа разбавляет или пополняет реагирующие частицы и одновременно отводит продукты реакций и загрязнения, в других служит главным образом для отвода загрязнений.

Для охвата всего диапазона давлений и потоков газа, используемого в процессах нанесения и травления тонких пленок, требуются насосы нескольких типов (рис. 8.1,б) [156].

Газы вводят в реакционный объем в чистом виде или в смеси с другими соединениями, и они образуют при разложении

Таблица 8.1. Вакуумные процессы в производстве ИС [156]

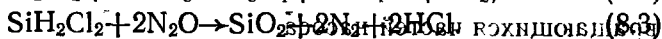
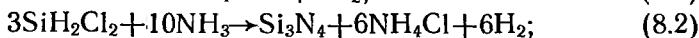
Процесс	Используемые газы	Параметры процесса		Источник загрязнений
		Давление, $10^{-3}$ Па	Поток, $10^{-3}$ Па·дм <sup>3</sup> /с	
Выращивание кристаллов	Ar, He	1—50	1—50	Абразивные частицы
Химическое осаждение из газовой фазы	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , AsH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> , PH <sub>3</sub> , SiH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub>	0,1—5,0	1—30	То же, высокотоксичные и взрывоопасные газы
Ионная имплантация	BF <sub>3</sub> , BCl <sub>3</sub> , AsH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> , PH <sub>3</sub> , Ar	0,01	1—2	Ионный источник
Эпитаксиальное осаждение	BF <sub>3</sub> , AsH <sub>3</sub> , PH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> , SiH <sub>4</sub> , SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	0,5—5,0	1—30	Абразивные частицы, токсичные газы
Плазменное и реактивное, ионно-плазменное травление	Cl <sub>2</sub> , BCl <sub>3</sub> , CCl <sub>4</sub> , CF <sub>4</sub> , CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>8</sub> , SF <sub>6</sub> , N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub>	0,05—10	1—10	Абразивные частицы. Хлорсодержащие вещества, полимеризующие вакуумные масла
Плазменная очистка	CF <sub>4</sub> , O <sub>2</sub>	0,3—1,0	1—15	Пары агрессивных фторсодержащих и взрывоопасных газов

(термическом и в условиях электрического разряда) химически активные частицы (ХАЧ) — атомы, радикалы, ионы.

Происходящие при разложении реакции достаточно сложны, а продукты разложения, которые должны удаляться из реакционного объема вакуумными насосами, весьма разнообразны.

При осаждении тонких пленок различных материалов откачиваемая фаза содержит значительное количество твердых частиц (коллоидные SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> частицы кремния), обладающих абразивными свойствами.

В процессах пиролиза и плазмохимического осаждения кроме исходных реагентов вакуумные насосы откачивают HCl, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HF, NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, Cl и NO<sub>2</sub>, которые существуют в реакционном объеме в основном в газообразном состоянии, а также большое количество твердых частиц в виде пыли. Основные реакции, протекающие при пиролитическом осаждении поликремния, нитрида кремния и диоксида кремния, можно записать в виде [156]:



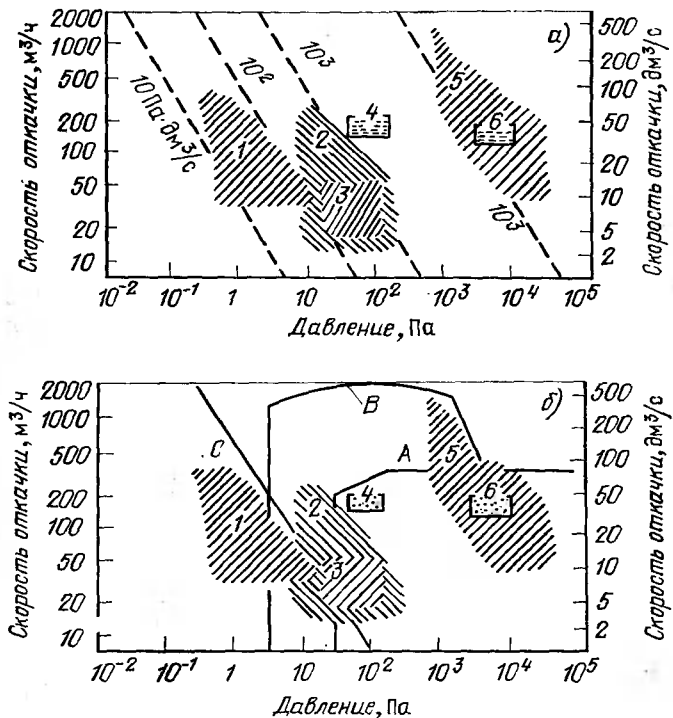
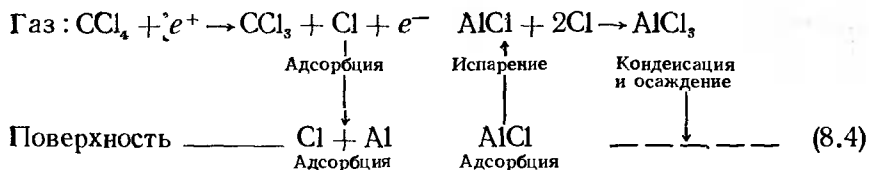


Рис. 8.1. Типичные диапазоны рабочих давлений, скоростей откачки и газовых потоков, характеризующие вакуумные процессы осаждения и травления тонких пленок (а) (1—ионно-плазменное распыление и травление, реактивное ионно-плазменное травление; 2—плазмохимическое распыление и травление; 3—4—химическое осаждение из паровой и газовой фаз при пониженном давлении; 5, 6—различные виды эпитаксии) и типичные диапазоны рабочих давлений и быстроты действия откачных средств (б), (А—механические насосы пластинчато-роторного типа; В—комбинация двухроторного и механического насоса пластинчато-роторного типа; С—дресселируемые высоковакуумные насосы)

Некоторые виды пыли образуются в самом процессе, например хлористый аммоний в реакции (8.2), который конденсируется в холодных участках реакционной камеры в виде порошка с размером частиц менее 1 мкм и переносится газовым потоком во время откачки. Поскольку перенос пыли возможен только при высоких плотностях газа, наиболее критичной стадией откачки реактора является начальная. Накопление проникающих твердых частиц в рабочей жидкости насоса и, следовательно, в каналах смазки пагубно влияет на подшипники и уплотнения вращающихся частей насоса.

Образование пыли происходит также при плазмохимическом травлении, например, Al [156]:



Помимо пыли в процессе травления алюминия образуются  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CCl}_2$ , атомы Cl,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{COCl}_2$ , HCl и др. При травлении поликремния образуются  $\text{F}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{COF}_2$ , атомы F, O,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{CF}_4$ , S и др. При травлении двуоксида кремния образуются атомы F,  $\text{F}_2$ ,  $\text{F}_4$ , HF,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{COF}_2$ ,  $\text{SiF}_4$  и др.

Таким образом (табл. 8.1), новые вакуумные технологические процессы производства ИС лежат в широком диапазоне давлений (от 1 до  $5 \cdot 10^3$  Па) и газовых потоков (от 1 до 50 Па $\times$ Хдм<sup>3</sup>/с), требуют для своей реализации насосов, обеспечивающих скорость откачки от 500 дм<sup>3</sup>/с и способных длительное время откачивать агрессивные, коррозионные, огнеопасные, пирофорные и токсичные газы.

Значительную часть откачиваемых газов составляют кислоты и коррозионные (разъедающие) вещества, которые воздействуют главным образом на рабочие жидкости насосов, в особенности минерального происхождения, образуя высоковязкие полимеры, смолы и кислоты. Высокая вязкость масла затрудняет холодный запуск насоса и приводит к перегреву двигателя. Грязь, полимеры и твердые частицы закупоривают каналы смазки. Осмоление внутренних поверхностей может, в конечном счете, вызвать заклинивание лопаток, поршня (плунжера) и кулачков насосов.

Фторсодержащие продукты менее реакционноспособны, вероятно, из-за большей прочности связи F—C в сравнении с Cl—C, однако также вызывают полимеризацию масла. Особо следует выделить такие соединения, как  $\text{BCl}_3$  и  $\text{BF}_3$ , используемые в плазменном травлении. Эти вещества относятся к классу льюис-кислот и при взаимодействии с молекулой углеводорода отрывают от нее атом водорода и электрон, что приводит к полимеризации свободных радикалов. В дальнейшем радикал бора может потерять водород, и процесс повторится, т. е. кислоты катализируют полимеризацию масла.

Из других откачиваемых газов необходимо отметить силан, аммиак и бромсодержащие. Последние имеют большую реакционную способность по сравнению с хлорсодержащими и воздействуют на масла аналогичным образом. Силан взрывоопасен, а при малых концентрациях он может растворяться в мас-

ле и, реагируя с растворенным кислородом или парами воды, образовывать коллоидный кремний. Аммиак в виде гидрата окиси аммония вызывает появление поперечных связей в уплотнениях на основе витона и тем самым ухудшение их эластичности и повышение хрупкости.

Наличие кислорода в чистом виде или в смесях с другими газами затрудняет откачку, но не в такой степени, как перечисленные выше газы. При температуре около 370 К кислород взаимодействует с минеральными маслами по многоступенчатой реакции, образуя в конечном итоге вязкий компонент и эмульсию в виде грязи. При более высоких температурах возможно появление высокоокисленных фракций, не растворимых в масле, которые осаждаются на металлических поверхностях и являются непосредственной причиной катастрофических отказов пластинчато-роторных и плунжерных насосов. Обычно последние, работающие при закрытом газобалластном клапане, имеют температуру в объеме масла 333—353 К, а при полностью открытом — выше 370 К. Во всех случаях температура пластин ротора на уплотняющей поверхности может превышать температуру основной массы на 100 К, что способствует образованию полимеров, грязи и смол при откачке кислородсодержащих газов механическими насосами.

При высокой концентрации кислорода в откачиваемом газе и определенном соотношении кислорода, паров минеральных масел и температуры возможно воспламенение или взрыв смеси в насосе или выхлопной магистрали. Диапазон опасных концентраций кислорода зависит от температуры насоса и типа масла и по некоторым данным начинается примерно с 30%; при большей концентрации  $O_2$  минеральные масла и триакрилфосфатэфиры применять нельзя [156].

Степень полимеризации углеводородных масел в зависимости от типа откачиваемого газа предложено оценивать с по-

Таблица 8.2. Оценка скорости полимеризации и углеводородных минеральных масел по ФНС

Газ	ФНС	Тип вакуумного насоса	Примечание
$CF_3Br$	1	Пластинчато-роторный	Для систем ПХТ
$Cl_2$	6	То же	—
$CCl_4$	10	»	—
$CCl_2F_2$	24	»	—
$Cl_2$	8—24	»	Непосредственная откачка $Cl$ и воздуха
$Cl_2$	40	»	Используется осветленное минеральное масло
$Cl_2$	30—40	Плунжерный	Непосредственная откачка $Cl$ или воздуха
$O_2$	$5 \cdot 10^5$	»	—



мощью специального коэффициента — фактора незначительной смазки (ФНС), выражаемого отношением объемов газа (при нормальном давлении), прокачиваемого до замены масла, и масла в насосе (табл. 8.2). [156]. При этом критерием необходимости замены масла является невозможность запуска насоса при комнатной температуре. Очевидно, что ФНС количественно определяет степень полимеризации лишь относительно предельного значения, характеризующего прекращение использования масла вследствие роста его вязкого компонента.

Из табл. 8.2 видно, что при прочих равных условиях минеральное масло быстрее всего деградирует в системах плазмохимического травления, а при откачке С1 плунжерным насосом масло служит примерно в 5 раз дольше, чем при откачке пластинчато-роторным насосом.

## 8.2. ТРЕБОВАНИЯ К ОТКАЧНЫМ СРЕДСТВАМ

Обеспечение вакуумно-технических параметров установок для осаждения тонких пленок предъявляет к откачным средствам целый ряд специфических трудновыполняемых и подчас противоречивых требований [29, 155, 156]:

запуск с атмосферного давления с малой длительностью пускового периода;

обеспечение постоянства быстроты откачки насосов в широком диапазоне давлений;

создание остаточной среды, свободной от паров воды, кислорода, углеводородов;

обеспечение строгого постоянства компонентов газовой смеси в реакторе и газового потока с исключением возможности появления в нем неконтролируемых газовых примесей ( $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $C_nH_m$  и др.);

обеспечение длительной работы без необходимости замены насоса или рабочей жидкости в нем.

При выборе откачных средств желательно, чтобы с помощью одного и того же насоса можно было сначала откачивать рабочий объем до требуемого вакуума, а затем длительное время промывать объем рабочим газом в диапазоне давлений технологического процесса. В этом случае значительно снижается стоимость вакуумной системы, но одновременно к насосу предъявляются трудносовместимые требования; с одной стороны, низкое предельное давление, а с другой — высокая производительность в условиях среднего и низкого вакуума. Диффузионный и турбомолекулярный насосы способны обеспечить откачку рабочего объема до высокого вакуума, но не могут работать при давлении больше 1 Па. Двухроторный и бустерный насосы могут работать в диапазоне значений давления  $10^{-1}$ — $10^2$  Па, но не обеспечивают высоковакуумную откачку. Крионасос заливно-

го типа способен обеспечить высоковакуумную откачку, и, кроме того, у него быстрота действия в области среднего вакуума (0,1—1 Па) возрастает в 2—2,5 раза (однако при дальнейшем повышении давления она резко снижается). По существу один только крионасос с газовой холодильной машиной (ГХМ) может обеспечивать высоковакуумную откачку и длительно работать в области среднего вакуума (вплоть до 10 Па).

Поскольку в производственных условиях решающее значение придается экономическим факторам, представляется целесообразным сопоставить откачные системы на основе различных насосов по относительной стоимости, затрачиваемой на единицу быстроты откачки. В диапазоне значений давления 0,1—10 Па наиболее экономична откачная система, использующая бустерный паромасляный насос. При значении давления выше 10 Па более предпочтительна система с двухроторным насосом, а при значении давления ниже 0,1 Па — система на основе диффузионного насоса. Если сравнить относительную стоимость откачки в зависимости от диаметра входного отверстия насоса, то крионасос с ГХМ и вспомогательным азотным охлаждением по этому параметру близок к диффузионному насосу. В то же время без вспомогательного азотного охлаждения относительная стоимость откачки крионасосом с ГХМ имеет наибольшее значение, однако с увеличением диаметра входного отверстия различие в стоимости откачки постепенно исчезает. Если сравнить усредненные значения удельных энергозатрат ( $\text{Дж/дм}^3$ ) для различных видов вакуумных насосов в характерном для них диапазоне рабочих давлений, то окажется, что минимальных энергозатрат требуют крионасосы, поскольку они являются насосами поверхностного действия, преимущественно работают в области высокого вакуума и по существу не удаляют газ из рабочего объема, а сорбируют его на охлажденной до гелиевых или водородных температур криопанели. Резкое (на 2—3 порядка) увеличение энергозатрат, характерное для двухроторных и вращательных насосов с масляным уплотнением, связано с тем, что они работают в диапазоне среднего и низкого вакуума, когда значительное количество газа приходится сжимать до давления выше атмосферного и удалять из вакуумной системы.

Важнейшие вакуумно-технические параметры, оказывающие определяющее влияние на стабильность и воспроизводимость процесса осаждения материалов, можно разделить на две группы: 1) операционные параметры (давление, состав и расход рабочего газа, определяемые скоростью откачки и производительностью вакуумной системы, а также степенью селективности насоса при откачке различных газов и газовых смесей); 2) параметры уровня (степень чистоты рабочего газа, состав остаточных газов и их парциальные давления, состав газов, десорбиру-

ющихся с поверхностями вакуумной системы, и их парциальные давления, временная нестабильность быстроты действия насоса в результате воздействия на него химически активных газов).

### 8.3. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

В зависимости от типов откачных средств рабочие жидкости выполняют различные функции. Так, в пластинчато-роторных и плунжерных насосах они служат для вакуумного уплотнения, смазки и охлаждения трущихся поверхностей, в двухроторных и турбомолекулярных насосах — для смазки и охлаждения, в пароустройных — для передачи момента движения молекулам откачиваемых газов. Тем не менее можно выделить ряд требований, которые предъявляются ко всем жидкостям, вне зависимости от типа вакуумных насосов [156]:

- сравнительно низкое (минимальное) давление насыщенного пара при рабочих температурах во внутренней полости насоса;
- термическая стабильность при нагревании;
- химическая стойкость по отношению к откачиваемым газам;
- минимальная способность растворять откачиваемые газы;
- отсутствие взаимодействия с конструкционными материалами насоса;
- отсутствие токсичности;
- пожаро- и взрывобезопасность;
- сравнительно низкая стоимость.

Вакуумные жидкости, применяемые в механических насосах, дополнительно должны иметь достаточную вязкость и малую пеннотность, а жидкости для пароструйных насосов — довольно большое давление насыщенного пара при рабочей температуре в кипятыльнике и малую теплоту парообразования. К сожалению, указанные требования не могут быть реализованы одновременно в рабочей жидкости одного типа.

Для характеристики эксплуатационных свойств рабочих жидкостей используют ряд параметров, таких, как давление насыщенного пара, вязкость, температура застывания, воспламеняемость, растворимость газов и некоторые другие.

Давление насыщенного пара наряду с вязкостью является одним из наиболее важных параметров, поскольку оно определяет степень загрязнения вакуумного объема парами рабочей жидкости. Растворимость газов в рабочей жидкости прямо пропорциональна абсолютному давлению. Для воздуха при атмосферном давлении она составляет (по объему) 7—10% в минеральных маслах, 4—8% в сложных эфирах фосфорной кислоты, 20% в силиконах. Растворимость в минеральных маслах при 293 К составляет для  $\text{CO}_2$  — 80,  $\text{N}_2$  — 6, He — 2%. Большое количество растворенных газов приводит к увеличению времени откачки вакуумного объема, снижению достижимого давления, а также вспениванию рабочей жидкости и химическому взаимо-

действию газов и паров. Так, в процессах химического осаждения при пониженном давлении растворенный в рабочей жидкости воздух взаимодействует с силаном с образованием коллоидного кремния.

Цвет рабочей жидкости не относится к числу эксплуатационных характеристик, однако позволяет идентифицировать ее и во многих случаях оценить степень деградации эксплуатационных характеристик. Цвет углеводородных масел меняется от бесцветного прозрачного до прозрачного желтоватого. Наличие нафталинов обуславливает более темную окраску жидкостей, чем парафинов, а полностью очищенные парафины и большинство синтетических жидкостей прозрачны. Следует отметить, что добавки и красители затрудняют сравнение рабочих жидкостей по внешнему виду.

По химической природе рабочие жидкости для насосов обычно подразделяют на минеральные масла и синтетические жидкости (силиконы, эфиры и фторуглероды), по областям применения — на жидкости для механических насосов (пластинчатоторных, плунжерных, двухроторных и турбомолекулярных) и для пароструйных насосов.

Минеральные масла состоят из смеси парафинов (65%), нафталинов (30%) и ароматических веществ (5%). Парафины стабильны при высоких температурах, текучи при низких и имеют умеренную неизменную вязкость в широком температурном диапазоне, а высокая температура кипения обуславливает их хорошие смазочные свойства. В присутствии кислорода при высоких температурах парафины нестабильны. Многообразие изомеров парафинов определяет широкий спектр свойств рабочих жидкостей на основе минеральных масел. Ароматические углеводороды содержат фенильные группы и вызывают образование кислых гудронов (грязей) при высоких температурах; кроме того, они имеют весьма низкую вязкость. По своим свойствам нафталины находятся между парафинами и ароматическими веществами.

Исходный для получения минерального масла продукт получают дистилляцией нефти. После очистки так называемое базовое масло подвергают рафинированию, в процессе которого отгоняют легкую и тяжелые фракции, что позволяет получить масло с узкофракционным составом. Нерафинированные масла используются в средствах откачки, обеспечивающих форвакуум в системах или откачивающих диффузионных насосах, узкофракционные — главным образом в диффузионных насосах, полностью насыщенные или осветленные парафиновые масла — в системах плазмохимического травления, так как малое содержание свободных связей в структуре молекул этих жидкостей обуславливает их стабильность в присутствии коррозионных газов. Для улучшения эксплуатационных характеристик рабочих

жидкости на основе минеральных масел в нее вводят специальные добавки — ингибиторы (антиокислители, антипенители, детергенты), а также добавки, понижающие температуру застывания и уменьшающие износ масел. Поскольку детергенты (очистители) обычно являются пенообразователями, их всегда применяют в сочетании с антипенителями, например с диметилсилоксаном.

Синтетические рабочие жидкости лишены многих недостатков, присущих минеральным маслам. В последнее время синтезированы химически инертные жидкости, обладающие низким давлением насыщенных паров, высокой вязкостью и хорошими смазочными свойствами. Качества жидкостей на силиконовой основе во многом определяются наличием связей Si—O в структуре молекул. В вакуумной технике используют два их вида: трисилоксаны и полисилоксаны. Трисилоксаны, получаемые гидролизом силанов с последующим введением при дистилляции фенильных или метильных групп, отличаются высокой стабильностью, устойчивостью к окислению, а также низким давлением паров и являются отличными рабочими жидкостями диффузионных насосов, однако имеют плохие смазочные свойства. Полисилоксаны, содержащие хлор- или алкильные группы, могут иметь лучшие смазочные свойства; к недостаткам силоксанов относятся вызываемые ими набухание или усадка эластомеров в насосах, а также несмешиваемость с большинством жидкостей, которые могли бы улучшить их эксплуатационные характеристики.

Из эфиров в промышленности применяют смеси мета- и параизомеров пентафенилового эфира, который отличается высокой вязкостью, стабильностью и хорошими смазочными свойствами при высоких температурах. Алкилдифениловый эфир по своим характеристикам соответствует жидкостям для диффузионных насосов среднего качества. Для диффузионных насосов пригодны сложные эфиры фосфорной и себациновой кислот. Первый характеризуется умеренной вязкостью, второй — отличными низкотемпературными свойствами.

Из всех синтетических продуктов фторсодержащие рабочие жидкости обладают наивысшей химической инертностью. Полностью насыщенные фтором жидкости получают путем УФ-фотоокисления гексафторпропилена. Образующийся неупорядоченный сополимер  $C_3F_6O$  и  $CF_2O$  с общей формулой  $CF_3O(C_3F_6O)_m-(CF_2O)_n-CF_3$  имеет торговую марку fomblin. Полимеризацией окиси двухатомного радикала гексафторпропилена получают перфторалкилполиэфиры или перфторполиэфиры (ПФПЭ) (торговая марка krytox). Синтезированные ПФПЭ имеют широкий фракционный состав, они химически инертны к большому числу растворителей, металлов, конструктивных и других органических материалов, однако при тем-

Т а б л и ц а 8.3. Сравнительная характеристика химических веществ,

Параметр	Обычные минеральные масла	Ингибированные минеральные масла	Осветленные минеральные масла
Молекулярная масса, а. е. м.	200—450	—	400
Плотность при 300 К, г/см <sup>3</sup>	0,9	0,9—1,0	0,88
Давление насыщенных паров при 300 К, Па	$(3-10) \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$(5-20) \cdot 10^{-5}$
Вязкость, Ст	95—130	120—145	85—130
Температура горения, К	490—570	513—545	490—543

пературе выше 370 К могут разлагаться с образованием токсичных веществ.

Рабочие жидкости на основе хлорфторуглеродов, получаемых полимеризацией хлортрифторэтилена, также характеризуются хорошими смазочными свойствами, невоспламеняемостью и инертностью ко многим химическим соединениям, имеют высокую плотность, низкую вязкость и существенно более высокое, чем ПФПЭ, давление паров, вследствие чего находят применение лишь в низковакуумных механических насосах.

Жидкости механических насосов отличаются многофункциональностью: помимо вакуумного уплотнения (в пластинчато-роторных, плунжерных и других насосах), они должны обеспечивать смазку подшипников, шестерен и других трущихся поверхностей, быть инертными по отношению к откачиваемым газам и не выделять загрязняющих технологический объем соединений, иметь приемлемую смазывающую способность, а для насосов с масляным уплотнением — давление насыщенных паров намного ниже предельного остаточного для каждого конкретного типа насоса [156, 157].

При выборе рабочей жидкости для насосов с масляным уплотнением руководствуются эмпирическим правилом: давление насыщенных паров жидкости должно быть примерно в 100 раз ниже предельного остаточного давления насоса. При откачке не очень агрессивных газов пригодны осветленные и дважды дистиллированные диффузионные масла, которые дешевле синтетических рабочих жидкостей, что существенно при частой их замене, например, в технологии химического осаждения из паровой фазы при пониженном давлении. При откачке высокоагрессивных газов находят применение сложные эфиры фосфорной кислоты, которые, однако, взаимодействуют с галогенсодержащими газами, а также хлорфтор- и фторуглеродные жидкости. Первые больше подходят для механических насосов, вторые — для всех остальных насосов. Однако необходимо учитывать, что из-за химической инертности ПФПЭ к агрессивным

## используемых в качестве рабочих жидкостей механических насосов

Сложные эфиры кислоты		Хлорметилполи- силоксан	Полихлортри- фторэтилен	Перфторполи- эфиры
фосфорной	себациновой			
410	420	3000	800—1000	1800—3250
1,15	0,92	1,05	1,93	1,9
—	$(5-20) \cdot 10^{-4}$	—	$1 \cdot 10^{-2}$	$(3-40) \cdot 10^{-4}$
18	130	335	160	50—120
630	520	610	—	—

соединениям последние не растворяются в нем, а выбрасываются через выхлопное отверстие, поэтому области нагнетания насоса следует изготавливать из коррозионно-стойких материалов. При этом выхлоп газов должен происходить с наименьшим сопротивлением для предотвращения конденсации и обратного потока откачиваемых газов. Кроме того, вследствие своей инертности ПФПЭ, в отличие от минеральных масел, не обладают моющими свойствами. Это означает, что поступающие из технологической емкости в насос твердые вещества будут осаждаться на рабочие поверхности последнего, что может вызвать заклинивание ротора насоса.

При выборе синтетических рабочих жидкостей для механических насосов с масляным уплотнением следует учитывать рекомендации фирм-изготовителей вакуумных жидкостей и конструкционные особенности конкретного насоса.

В табл. 8.3 и 8.4 [156] приведены сравнительные характеристики химических веществ, применяемых в качестве рабочих жидкостей в механических и пароструйных насосах. Видно, что в целом рабочие жидкости на основе минеральных масел характеризуются низкой термической стабильностью, устойчивостью к окислению и химической стойкостью, а ПФПЭ — наивысшей химической стойкостью при откачке многих химических соединений, однако последний разлагается на токсичные газы при температуре выше 470 К.

Использование ПФПЭ в пароструйных насосах, как правило, не требует их модернизации, а возникающие при кипении значительные вибрации, не характерные для обычных жидкостей диффузионных насосов, можно свести к минимуму оптимизацией мощности нагревателя. Следует учитывать также, что для ПФПЭ скорость откачки по воздуху составляет 83%, а по водороду — 66% скорости при применении других жидкостей, что, вероятно, связано с высокой молекулярной массой или с протяженным строением молекул перфторполиэфира.

Т а б л и ц а 8.4. Сравнительная характеристика химических веществ, используемых в качестве рабочих жидкостей пароструйных насосов

Параметр	Минеральные масла	Силиконы	Полифениловые эфиры	Перфторполиэфир	Сложные эфиры, эфиры себаценовой кислоты, фталаты, лигронны
Пределный вакуум*1 при 293 К, Па	$5 \cdot 10^{-3} - 10^{-6} *1$	$10^{-4} - 10^{-7}$	Менее $10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-7} *1$
Критическое давление*1 на выходе насоса, Па	$65 - 45 *1$	$120 - 60 *1$	60	100	$65 - 45 *1$
Воздействие бомбардировки высокоэнергетическими частицами	Обычно образуются проводящие полимеры	Обычно образуются непроводящие полимеры	Образуются проводящие полимеры	Полимеры не образуются (кроме взаимодействия с ионами водорода)	Обычно образуются проводящие полимеры
Термическая стабильность	Плохая	Очень хорошая	Превосходная	Разлагается на газы*2	Хорошая
Устойчивость к окислению	Плохая	Превосходная	Очень хорошая	Превосходная	Хорошая
Химическая стойкость	Плохая	Очень хорошая, но полимеризуется в присутствии щелочных металлов	Довольно низкая	Превосходная	Зависит от природы жидкости
Относительная стоимость	Низкая	Низкая или умеренная	Высокая	Высокая	Низкая
Применение	Производство электровакуумных приборов, ускорителей	Установки вакуумного нанесения пленок, производство кинескопов	Масс-спектрометрия, электронная микроскопия, сверхвысокий вакуум	Откачка агрессивных газов, ионная имплантация, химическое осаждение из паров, электронная микроскопия	Установки вакуумного наисесня, ускорители

\*1 Для диффузионных насосов фирмы Edwards (Великобритания).

\*2 Температура разложения обычно выше 573 К; образуемые газы токсичны.



Таблица 8.5. Совместимость типичных эластомеров с рабочими жидкостями механических насосов при различных температурах

Эластомер	Тип рабочей жидкости			
	Углеводородные масла	Сложные эфиры фосфорной кислоты	Хлорфторуглеродные	Фторуглеродные
Бутил	Несовместимы	Совместимы при $T \leq 373$ К	—	Совместимы при $T \leq 343$ К
Буна-N	Совместимы при $T \leq 373$ К	Несовместимы	Совместимы при $T \leq 373$ К	Совместимы при $T \leq 343$ К
Буна-S	Несовместимы	—	Несовместимы	—
Неопрен	Совместимы при $T \leq 393$ К	Несовместимы	Совместимы при $T \leq 393$ К	—
EPR	Совместимы	—	Совместимы	Совместимы при $T \leq 343$ К
Сил'кон	Совместимы	Совместимы при $T \leq 448$ К	Несовместимы	Совместимы при $T \leq 343$ К
Витон		Совместимы при $T \leq 408$ К	Совместимы	Совместимы при $T \leq 343$ К
Фторопласт		Совместимы при $T \leq 484$ К	"	"

При выборе рабочей жидкости следует учитывать не только ее вакуум-технические характеристики, но и совместимость с откачиваемыми средами и конструкционными материалами насосов (табл. 8.5) [156].

Из приведенных данных следует, что во многих случаях необходима одновременная замена рабочей жидкости и соответствующих уплотняющих элементов.

#### 8.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ НАСОСЫ С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ АГРЕССИВНЫХ ГАЗОВ

Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением находят широкое применение в качестве вспомогательных (форвакуумных) насосов, предназначенных для удаления основной массы воздуха из рабочего объема установки перед включением высоковакуумного насоса. Кроме того, механические насосы являются основным откачным средством при осаждении пленок из газовой фазы, поскольку при этом требуется длительная работа в диапазоне давлений 10—500 Па и откачка значительных потоков (до 1000 см<sup>3</sup>/мин) различных газов и паров, а также продуктов реакции, которые зачастую представляют собой химически активные, а в ряде случаев агрессивные, токсичные и взрывоопасные соединения.

Существуют два типа механических насосов: пластинчатороторные и золотниковые (плунжерные). При откачке газов, вызывающих коррозию, с помощью насосов пластинчаторотор-

ного типа возникает ряд специфических проблем. Части насоса, погруженные в масло и покрытые тонкой масляной пленкой, наименее подвержены коррозии. В выпускном же патрубке насоса и в прилегающей к нему камере, в которой газ сжимается до давления, выше атмосферного, коррозионные эффекты протекают наиболее эффективно. При этом наиболее опасная зона находится вблизи выхлопного клапана. В этой зоне устанавливается высокая температура и газы, проходя через выхлопное отверстие, интенсивно воздействуют прежде всего на материал клапана. Ангидриды кислот инертны в безводном состоянии, но становятся в высшей степени агрессивными в присутствии воды (что в первую очередь относится к HCl). Вода, попадая в насос в виде водяных паров при откачке влажного атмосферного воздуха, а также через газобалластный клапан, образует соляную кислоту, вызывающую коррозию деталей насоса.

Снижение вредного воздействия паров воды может быть достигнуто [155—157]:

введением в систему осушенных инертных газов, предпочтительно в зоне выхлопного отверстия насоса;

введением осушенного азота вместо воздуха в газобалластный клапан;

уменьшением потока химически активного газа за счет разбавления его инертным газом или азотом;

сливом масла из насоса и заполнением его осушенным азотом перед длительной остановкой.

Для регулирования и стабилизации давления рабочего газа в камере реактора ( $p_{рг}$ ) при заданном расходе рабочего газа ( $Q_{рг}$ ) нейтральный газ (азот) в механический насос, имеющий скорость откачки  $S$ , следует напускать исходя из следующих условий:

$$p_{рг} = p_{вх} + Q_{рг}/U; \quad (8.5)$$

$$p_{вх} = (Q_{рг} + Q_{нг})/S, \quad (8.6)$$

где  $p_{вх}$  — давление на входе в насос;  $U$  — пропускная способность трубопровода между реактором и насосом.

В этом случае поток нейтрального газа

$$Q_{нг} = Sp_{рг} - Q_{рг}(S/U + 1). \quad (8.7)$$

Приведенная зависимость может быть использована при регулировании подачи нейтрального газа в насос для создания более благоприятных условий для его работы.

При вязкостном режиме течения газа, который имеет место в том случае, когда длина свободного пробега молекул  $\lambda_m < R_{тр}/50$  (где  $R_{тр}$  — радиус трубопровода), пропускная способ-

Таблица 8.6. Значения вязкости и относительной пропускной способности трубопроводов при откачке различных газов

Газ	$\eta, 10^{-4}$ Па·с	$U_r/U_v$	Газ	$\eta, 10^{-4}$ Па·с	$U_r/U_v$
Ne	310	0,59	CH <sub>3</sub> Cl	120	1,5
Xe	229	0,80	SiH <sub>4</sub>	117	1,55
Ar	224	0,86	CH <sub>4</sub>	108	1,7
O <sub>2</sub>	205	0,89	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	100	1,8
He	197	0,93	CCl <sub>4</sub>	98	1,88
Воздух	184	1,0	CH <sub>3</sub>	97	1,88
N <sub>2</sub>	188	1,04	H <sub>2</sub> O	93	1,9
CO <sub>2</sub>	145	1,2	H <sub>2</sub>	87	2,1
HCl	140	1,3			

ность круглого трубопровода (когда его длина  $L > 20R_{\text{тр}}$ ) для воздуха при  $T = 300$  К

$$U_v = 1360D_{\text{тр}}^4 \bar{p} / L_{\text{тр}} \quad (8.8)$$

Пропускная способность трубопровода при течении по нему любого газа

$$U_r = U_v \eta_r / \eta_v \quad (8.9)$$

где  $\eta_r$  и  $\eta_v$  — динамическая вязкость газа и воздуха.

Значения  $\eta$  и  $U_r/U_v$  для некоторых газов приведены в табл. 8.6 [158].

При вязкостном режиме течения газа проводимость является сложной функцией температуры, уменьшаясь с ее возрастанием.

Характерно, что вязкость, подобно теплопроводности, пропорциональна  $\sqrt{T}$  и не зависит от давления в области давлений, где главную роль играют межмолекулярные столкновения.

Степень деградации быстроты действия насосов и скорости откачки систем, а также ухудшение предельного вакуума и увеличение времени его достижения растет с увеличением времени фактической эксплуатации установки и зависит, главным образом, от вида откачиваемых соединений (хлор-, фтор-, кислородсодержащие) и рода используемой рабочей жидкости для насоса. Деградация перечисленных параметров наиболее резко выражена при откачке хлорсодержащих соединений. Снижение эксплуатационных параметров рабочих жидкостей проявляется в уменьшении вязкости, образовании жидкой и гелеобразных фаз, а также загрязнении твердыми частицами. На первом этапе происходит снижение вязкости в результате растворения в рабочей жидкости откачиваемых газов, после чего начинается химическое взаимодействие растворенных агрессивных соединений с рабочей жидкостью.

Загрязнение рабочих жидкостей твердыми частицами наиболее характерно при откачке хлорсодержащих соединений и связано с коррозией конструкционных материалов различных элементов насоса. Установлено, что у вращательных насосов с масляным уплотнением интенсивная коррозия происходит в основном в межоперационный период эксплуатации установок и обусловлена проникновением в рабочий объем насоса влаги из атмосферного воздуха, приводящей к образованию соляной кислоты, обладающей сильно выраженными агрессивными свойствами. В то же время при откачке фторсодержащих соединений (как и при откачке кислородсодержащих газов) коррозия конструкционных материалов не столь велика, и основную роль здесь играют окислительные реакции, вызывающие деградацию свойств рабочих жидкостей.

Деградация параметров вакуумных систем зачастую приводит к невозможности получения требуемого предельного вакуума или вообще к выходу из строя откачных средств. При проведении процессов, требующих больших газовых потоков, предпочтение следует отдавать механическим насосам плунжерного типа. Основным конструкционным отличием пластинчато-роторных и плунжерных насосов является зазор между статором и ротором, который во втором случае примерно в 10 раз больше и достигает 1—2 мм. Помимо больших внутренних зазоров плунжерные насосы имеют большой объем резервуара с маслом, что позволяет примерно в 10 раз увеличить интервал времени между очередной сменой масла. Кроме того, отсутствие у плунжерных насосов непосредственного контакта ротора и статора, а также деталей, касающихся корпуса статора, позволяет производить откачку до тех пор, пока может вращаться ротор. Однако плунжерные насосы по сравнению с пластинчато-роторными имеют более высокий уровень вибраций, что является весьма существенным недостатком для реализации ряда технологических процессов.

Насосы плунжерного типа находят широкое применение в установках для осаждения пленок из газовой фазы (табл. 8.7) [26].

Для снижения деградации параметров механических насосов приходится устанавливать фильтры на впускном и выпускном отверстиях насоса, устанавливать азотные ловушки, использовать бачки для слива конденсата, применять наружную фильтрацию масла и выполнять ряд специфических требований при конструировании и эксплуатации откачной системы. Фильтры на впускном патрубке насоса предназначены в основном для защиты насоса от пыли. Внутренние зазоры в насосах обычно значительно превышают средние размеры пыли, и попадание небольшого количества твердых частиц существенно не отражается на работе насоса, поскольку частицы проходят через

Таблица 8.7. Параметры и специфика эксплуатации вакуумных систем с плунжерными насосами для осаждения пленок из газовой фазы

Получаемая пленка	Рабочий газ	Давление, Па	Поток, см <sup>3</sup> /мин	Тип насоса	Рабочая жидкость	Специфика эксплуатации рабочей жидкости	Мера безопасности
Поликремний, диоксид кремния	SiH <sub>4</sub>	70—140	500—1000	Стандартный двухступенчатый. S = 17 л/с	На основе углеродоводородов с двойной очисткой и давлением паров 10 <sup>-4</sup> Па	Наружная обособленная система очистки или частая замена жидкости	Пиррофорный очень активный газ в присутствии O <sub>2</sub> . Недопустим выброс газа из реактора в атмосферу
Нитрид кремния, диоксид кремния	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> —NH <sub>3</sub> или SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	70—140	500—1000	Коррозионно-стойкий	То же	Наружная нейтрализация кислот, обособленная система очистки или частая замена жидкости	Поступающий из насоса газ токсичен. Необходим скруббер (газопромыватель). Недопустим выброс газа из реактора в атмосферу
Поликремний или диоксид кремния	SiF <sub>4</sub> —O <sub>2</sub>	30	200	То же	Если количество O <sub>2</sub> в газовой смеси невелико, допустима жидкость на основе углеводородов. Если используется отделимый источник необходима специальная жидкость	Наружная нейтрализация кислот, обособленная система очистки	На выходе из насоса необходимы кислотный скруббер и выходной фильтр

насос, не вызывая повреждений. Однако накопление частиц в масле и, следовательно, в системе смазки вызывает существенное ухудшение состояния некоторых элементов насоса (в первую очередь подшипников и уплотнений вращающихся валов).

В том случае, если в реакторе могут появляться пылеобразные частицы, на входе в насос должен устанавливаться фильтр, к которому предъявляются следующие требования:

способность задерживать очень мелкие частицы (до 0,3 мкм);

коррозионная стойкость к воздействию кислот, образующихся при проведении процесса;

высокая проводимость, не снижающая эффективной скорости действия насоса;

невоспламеняемость материала, из которого изготовлен сменный патрон фильтра.

Поскольку улавливание пыли возможно при больших плотностях газа, соответствующих вязкостному режиму течения, то наиболее ответственной является начальная стадия откачки (от атмосферного давления до 1000 Па). Для того чтобы основная масса пыли не попадала в насос, в ряде случаев целесообразно параллельно основной линии откачки иметь вспомогательную линию форвакуумной откачки, подключаемую к основной с помощью дроссельного клапана. На входе в насос обычно устанавливают один или несколько фильтров. Для улавливания сгустков применяют двухъярусные фильтры с металлическими кольцами и масляным увлажнением, а для более мелких частиц — фильтры с элементами из стекловолокна. Большая площадь поверхности фильтра позволяет увеличить ресурс его работы до чистки (для фильтров с кольцами) или до замены элемента из стекловолокна.

Фильтрация масла предназначена для выполнения нескольких функций:

улавливания попавших в насос твердых частиц;

задержки смолы и продуктов распада, образующихся в результате воздействия кислот на масло;

улавливания значительной части попавших в насос кислот.

Используемые в механических насосах масла органического происхождения быстро окисляются и разлагаются, в результате чего образуются суспензии и своеобразный гель, состоящий из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{HCl}$  и продуктов разложения масла. Этот гель, содержащий твердые мелкодисперсные продукты, быстро заполняет отверстия насоса и фильтры для очистки масла. Применение антиокислительных добавок нецелесообразно, поскольку они интенсифицируют образование продуктов распада масла. Наиболее радикальным средством, позволяющим длительно эксплуатировать насос, является замена масел, изготавливаемых из нефти, на синтетические масла. Однако последние очень дороги, поэтому в ряде случаев предпочитают работать на маслах, из-

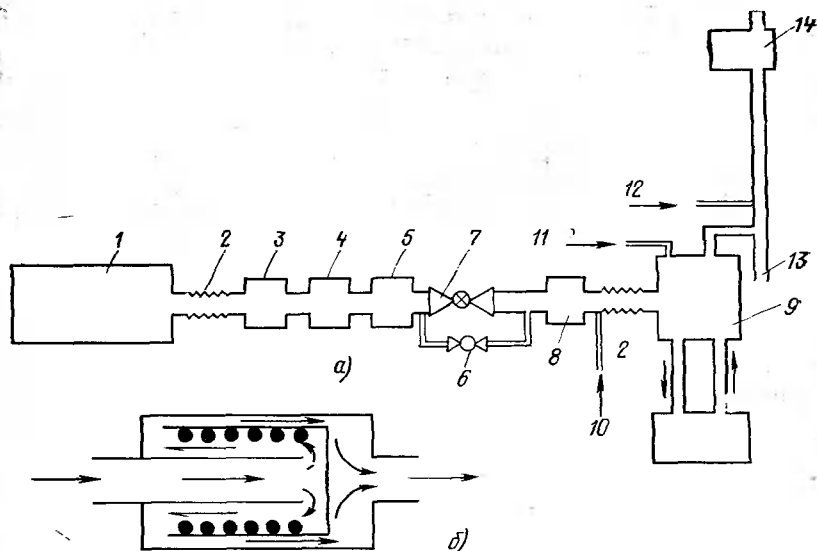


Рис. 8.2. Система защиты механического вакуумного насоса (а) (1 — реактор; 2 — сильфон; 3 — водоохлаждаемая ловушка; 4 — высокоэффективная выжигающая печь; 5 — специальная ловушка; 6 — стартовый вакуумный вентиль с низкой проводимостью; 7 — основной вакуумный вентиль; 8 — объем с контролируемым давлением; 9 — вакуумный насос с масляным уплотнением; 10 — напуск сухого азота в насос; 11 — напуск сухого азота в резервуар с маслом; 12 — напуск сухого азота в откачную трубу; 13 — дренажная труба; 14 — вентилятор) и водоохлаждаемая ловушка для летучих продуктов (б)

готовящихся из нефти, производя их очистку с помощью адсорбционных фильтров на основе активированного угля, силикагелей и других веществ.

Защита механического насоса с масляным уплотнением в установке для получения тонких пленок путем осаждения из газовой фазы при давлении 30—150 Па может быть реализована по схеме, приведенной на рис. 8.2 [157].

Вакуумная система при необходимости может быть снабжена дополнительными насосами для быстрого удаления основной массы воздуха с тем, чтобы затем вводить в объем реактора рабочие газы при низком давлении. Основные требования к системе защиты насоса:

вводить по возможности минимальное количество загрязнений в вакуумную систему;

применять только инертные конструкционные материалы и рабочие жидкости, чтобы исключить их загрязнение;

использовать резервуар для масла большого объема, чтобы обеспечить непрерывный поток масла между резервуаром, комплектом фильтров и вакуумным насосом;

использовать сухой газ, такой, как  $N_2$ , вводя его непосредственно в насос, в резервуар с маслом и откачивая для того, чтобы удалять посторонние частицы, появляющиеся при проведении процесса;

препятствовать проникновению конденсата твердых частиц и жидкостей из откачной системы обратно в насос.

Летучие продукты, такие, как  $NH_4Cl$  и  $Al_2Cl_6$ , перед входом в насос можно улавливать с помощью водоохлаждаемой ловушки (рис. 8.2,б) [157]. Очень большое количество  $NH_4Cl$  характерно для типичной установки получения пленок нитрида кремния. При этом водоохлаждаемая ловушка быстро засоряется продуктами реакции, ее сопротивление газовому потоку возрастает, вследствие чего необходима ее частая очистка. Для улавливания водяных паров и устранения их из рабочих газов наиболее эффективна ловушка, охлаждаемая жидким азотом. Однако азотная ловушка не годится для систем осаждения пленок из газовой фазы при пониженном давлении в обычных условиях, поскольку имеется опасность, связанная с самовоспламенением таких газов, как  $SiH_4$  ( $T_{кип} = 112^\circ C$ ,  $T_{пл} = 185^\circ C$ ).

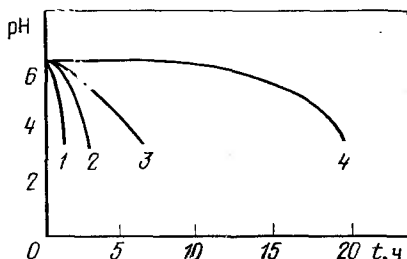
Для повышения коррозионной стойкости масел нефтяного происхождения их повторно дистиллируют, освобождая жидкость от компонентов, наименее стойких в среде повышенной коррозионной активности. Общепринятым стало также применение внешних систем фильтрации масла с целью удаления сгустков и снижения показателя кислотности, что повышает ресурс работы масла в 6—7 раз. В ряде случаев под действием соединений хлора свойства минеральных масел настолько резко ухудшаются, что иногда их приходится заменять инертными маслами или перфторированным полиэфиром. Однако использование химически инертного масла отнюдь не решает полностью проблемы коррозии. Поскольку между потоком инертной смазки и коррозионными веществами реакции не происходит, загрязняющее вещество не нейтрализуется и необходим фильтр с патроном из нейтрализующего вещества (активированный древесный уголь, активированный грунт и др.) для улавливания кислот.

Улавливание кислот реализуется в результате поглощения смол, физической адсорбции кислот на диоксиде кремния и других твердых соединениях, а также хемосорбции  $HCl$  на целлюлозе фильтрующего элемента. Качество фильтра и степень его пригодности для повышения срока службы рабочей жидкости в насосе могут быть оценены значением рН, которое резко уменьшается при отсутствии фильтра и медленно снижается, когда на входе в насос установлен «кислотный фильтр» из активированного глинозема. Свойства насосного масла на основе углеводородов существенно зависят от времени непрерывной работы механического насоса плунжерного типа при проведении

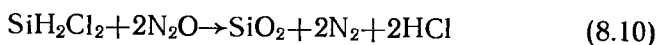


Рис. 8.3. Зависимость величины pH от времени непрерывной работы насоса плунжерного типа:

1 — без фильтра ( $Q=2000$  см<sup>3</sup>/мин); 2 — с фильтром на основе ацетатной целлюлозы ( $Q=2000$  см<sup>3</sup>/мин); 3, 4 — с фильтром на основе активированного глинозема ( $Q=700$  и  $Q=2000$  см<sup>3</sup>/мин соответственно)



высокотемпературного (850—900 °С) процесса осаждения пленок двуоксида кремния на 100 пластин диаметром 125 мм (рис. 8.3). Осаждение проводили в реакторе горизонтального типа по реакции



при использовании различного типа «кислотных фильтров» на входе в насос. Эти кислотные фильтры должны быть небольшими по размеру, поскольку дорогостоящие масла применяются в небольших количествах, поэтому система фильтрации масла должна быть по возможности минимального объема. Применение фильтров с поглощающими или нейтрализующими патронами существенно упрощает обслуживание насосов и значительно повышает время работы масла без замены (в 20—25 раз). В случае дорогостоящих синтетических масел целесообразно применять маслоуловители и регенерирующие устройства.

Поскольку между откачиваемым газом и маслом имеется контакт, газ растворяется в масле, и масло циркулирует в системе смазки насоса вместе с растворенными в нем продуктами. Поэтому желательно по возможности уменьшать парциальное давление веществ, вызывающих коррозию. Следовательно, недопустимо накопление этих веществ в насосе. С целью уменьшения их концентрации целесообразно применять продувку системы нейтральными газами. Предотвратить конденсацию агрессивных веществ в жидкой фазе в резервуаре с маслом можно, применив насос, нормально работающий при температуре 60—70 °С, или газобалластную систему с присоединением ее к источнику нейтрального газа.

Для повышения коррозионной стойкости используют насосы специальной конструкции с применением инертных масел и их непрерывной фильтрацией и нейтрализацией или охлаждаемые азотные ловушки, устанавливаемые на впускном патрубке насоса, которые резко снижают давление газов, вызывающих коррозию. Основное различие между стандартными и коррозионно-стойкими насосами состоит в том, что в последнем случае

применяются улучшенные материалы для внутренних деталей насоса, соприкасающихся с агрессивными средами, высококачественные эластомеры для создания уплотнений и высококачественные рабочие жидкости. Эти насосы требуют значительных капитальных затрат, но зато обеспечивают надежность и удобство при длительной эксплуатации, поэтому их целесообразно применять в промышленных установках.

Охлаждаемые ловушки не требуют больших капитальных затрат, но их применение возможно только при условии устранения тех затруднений, которые возникают при регенерации ловушки. Давление хлорсодержащих газов резко снижается с помощью двухступенчатых ловушек, что позволяет довести до минимума количество хлорсодержащих соединений, попадающих в насос. Если охлаждаемые ловушки снабжаются средствами промывки в водном растворе, то в откачную систему необходимо добавить еще два клапана: один для выпуска растворителя и другой для выпуска вытекающего потока жидкости. Однако следует помнить, что водные растворы вызывают сильную коррозию деталей насоса и поэтому их можно применять только в случае крайней необходимости.

При работе со фторсодержащими соединениями вымораживающие азотные ловушки малоэффективны. Уже после нескольких циклов травления ловушки перестают задерживать продукты реакции, причем наиболее резко этот эффект проявляется в случае фторсодержащих газов, что, по-видимому, связано со значительно более низкой температурой кипения откачиваемых фторсодержащих соединений по сравнению с хлорсодержащими. К числу агрессивных газов, которые плохо задерживаются азотными ловушками, относится большинство фторсодержащих соединений, а также пары  $\text{HF}$ . Малая эффективность азотных ловушек ставит под сомнение целесообразность их применения при проведении процессов во фторсодержащих газах.

В выпускной магистрали для улавливания ядовитых веществ, а также веществ, вызывающих коррозию, обычно устанавливают фильтры со сквозным потоком. Эти фильтры позволяют улавливать и пары рабочей жидкости, обеспечивая тем самым возможность ее повторного использования. В случае засорения патрона фильтр автоматически перепускает выходящий из насоса газ, устраняя тем самым возможность взрыва, который может иметь место, когда давление в герметичной системе превысит допустимое.

Для предотвращения опасности взрыва необходимо следить за тем, чтобы не допускать:

накопления в насосе взрывоопасной смеси путем присоединения насоса к форвакуумному трубопроводу нейтрального сухого газа [например,  $\text{N}_2$  с давлением 10 Па и пропускной способностью 1—5 л/мин (при нормальных температуре и давлении)];

случайного попадания кислорода из-за исключения газобалластного клапана или подсоединения его к источнику азота; использования ловушек с жидким азотом на впускном клапане насоса.

При присоединении выпускного трубопровода необходимо выполнять следующие правила:

диаметр трубопровода должен быть равен по крайней мере диаметру выхлопного отверстия насоса. Как показывает опыт эксплуатации систем плазменного осаждения и травления, в ряде случаев реакция заканчивается в выхлопном трубопроводе, в результате осадки откладываются в трубопроводе и уменьшают его внутренний диаметр. Засорение трубопровода снижает его пропускную способность и приводит к повышению давления в насосе, в результате чего увеличивается конденсация вредных веществ в насосе и сокращается его срок службы;

на выходе насоса должен быть установлен бачок для слива конденсата;

маслоуловитель должен быть исключен, поскольку фильтрующий патрон, через который циркулирует газ, оказывает большое сопротивление газовому потоку. При этом повышается давление в насосе, что увеличивает конденсацию в нем вредных веществ. Кроме того, избыточное давление насоса влияет на циркуляцию масла в устройстве для его фильтрации, изменяя уровень масла и его поток и вызывая появление пузырьков газа.

Совершенно недопустимо использование стандартных маслоуловителей при откачке воспламеняющихся газов или кислорода, поскольку фильтрующий патрон может воспламениться. Твердые или пастообразные осадки на патроне уменьшают проходимость фильтра. При этом избыточное давление в насосе возрастает и открывается предохранительный клапан. Однако твердые осадки, возникающие, например, в результате полимеризации, могут заклинить клапан, и в этом случае газ под большим давлением может прорваться через окно для наблюдения за уровнем масла в насосе.

Фирма Alcatel (Франция), имеющая большой опыт эксплуатации вакуумных насосов при откачке агрессивных газов, изготавлиет пластинчатоторторные насосы двух серий: химические («С») и плазменные («СР»), приспособленные для работы в коррозионно-опасных условиях. Модификация насосов сводится к следующему: основные детали, контактирующие с газом и рабочей жидкостью насоса, выполнены из нержавеющей стали, все уплотнения — из химически стойкого витона; внутренние и наружные поверхности корпуса имеют покрытие из фторопласта; установлены внутренний масляный фильтр (автомобильного типа) и соответствующий масляный насос для принудительной фильтрации масла от твердых частиц; предусмотрены специальные герметичные вводы для продувки рабочих объемов инерт-

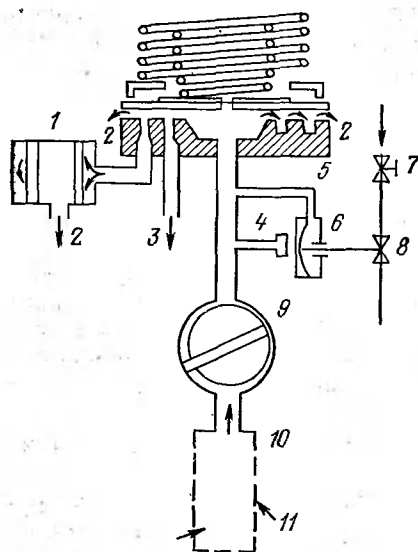


Рис. 8.4. Система принудительной подачи масла в вакуумный насос:

1 — масляный фильтр; 2 — поток масла к масляному резервуару; 3 — поток масла для смазки и уплотнения насоса; 4 — масляный манометр; 5 — распределительный клапан; 6 — автоматический газобалластный выключатель; 7, 8 — газобалластные вентили; 9 — масляный насос; 10 — сетчатый фильтр; 11 — поток масла из резервуара насоса

ным газом и исключения проникновения атмосферной влаги, которая резко повышает агрессивность некоторых кислот (например, соляной).

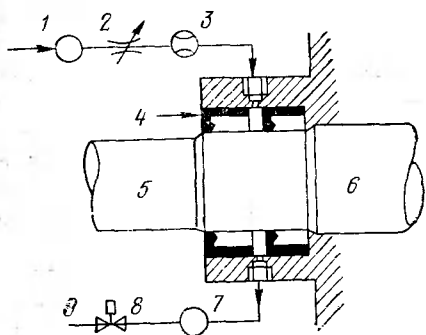
Отличительной особенностью серии СР является наличие пузырьковой системы bulleur, которая обеспечивает непрерывную равномерную (5 дм<sup>3</sup>/мин) подачу

инертного газа (например, сухого азота) в резервуар с маслом для его обезгаживания, а также снижение температуры масла на 10 К (уменьшение температуры на 12 К дает 30% -ное снижение скорости коррозии). Эффективность пузырьковой системы повышается при подаче газа через трубку с насадкой из пористого материала в нижней части резервуара с маслом. Насосы серии «СР» характеризуются также использованием термообработанной нержавеющей стали для изготовления ротора и дополнительного насоса для принудительной смазки валов чистым маслом.

Фирма Edwards (Великобритания) более 20 лет выпускает пластинчато-роторные насосы, снабженные небольшим масляным насосом для принудительной смазки, который совмещен с основной конструкцией насоса и находится на валу его ротора. Имея небольшие габариты, масляный насос обеспечивает потоки масла, во много раз превышающие необходимые для смазки и уплотнения, и надежно работает при низком уровне масла в резервуаре вакуумного насоса. Специалистами фирмы разработаны три системы принудительной подачи масла для различных условий функционирования, в том числе для одно- и двухступенчатых прямоприводных вращательных насосов с быстродействием от 40 до 80 м<sup>3</sup>/ч (рис. 8.4). Распределительный клапан имеет одну центральную полость и две кольцеобразные (внутреннюю и наружную). Под давлением масла в центральной полости крышка клапана приподнимается, и масло перетекает в первую кольцеобразную полость, откуда направляется для смазки и уплотнения насоса. Так же в первой кольцеобразной полости при-

Рис. 8.5. Конструкция двойного уплотнения вала пластинчато-роторного насоса:

1 — подача сухого азота; 2 — микрона-  
текатель; 3 — ротаметр; 4 — фторо-  
пластовый сальник; 5 — привод мотора;  
6 — вал насоса; 7 — ограничитель; 8 —  
электромагнитный клапан; 9 — вход  
газового балласта



поднимается крышка клапана, что обеспечивает поступление масла во вторую кольцеобразную полость, соединенную с фильтром тонкой очистки; избыток его перетекает через наружную перегородку клапана насоса. Скорость непрерывной фильтрации позволяет проводить полную заправку насоса через фильтр около 10 раз в течение 1 ч. Давление в главном маслопроводе поддерживается примерно на уровне  $4 \cdot 10^4$  Па даже при высокой температуре масла, благодаря чему в нем можно размещать различные гидравлические устройства, например манометр и гидроклапан для газобалластной линии, перекрывающий ее при остановке насоса. Вместо внутреннего фильтра тонкой очистки можно подсоединять наружный, гораздо большей емкости, в том числе фильтр для нейтрализации агрессивных веществ, растворенных в масле. При этом собственный масляный насос вакуумного насоса в состоянии обеспечить циркуляцию масла через наружный фильтр.

Одним из наиболее ответственных участков насоса является уплотняющий элемент вала, который в обычном стандартном исполнении наиболее часто выходит из строя при ухудшении смазывающей способности масла. Поэтому необходимо не только обеспечивать безотказную смазку уплотняющего элемента, но и своевременно фиксировать возникшее нарушение уплотнения. Фирма Edwards (Великобритания) запатентовала в ряде стран (США, Японии, ФРГ, Италии, Франции) конструкцию двойного уплотнения для вращательных насосов перфторполиэфирами в качестве рабочей жидкости (рис. 8.5). Эти жидкости легче, чем стандартные масла, проникают через поврежденные уплотнители валов. Они направляются потоком газа к газобалластному входу. Наличие масла в возвратной линии указывает на повреждение основного уплотнителя, а электромагнитный клапан на входе в газобалластное устройство обеспечивает отключение системы при остановке насоса.

## 8.5. ДВУХРОТОРНЫЕ НАСОСЫ БЕЗ МАСЛЯНОГО УПЛОТНЕНИЯ (НАСОСЫ РУТСА)

Общей тенденцией развития процессов осаждения из газовой фазы является увеличение газового потока и уменьшение рабочего давления, поэтому в ряде случаев даже двухступенчатые насосы плунжерного типа с масляным уплотнением не обеспечивают требуемого режима откачки высокопроизводительного оборудования. Вследствие этого все чаще начинают применять двухроторные насосы (ДРН), а в некоторых случаях даже два последовательно соединенных ДРН. Это значительно повышает коэффициент сжатия и снижает до минимума эффекты ухудшения предельного давления механического насоса с масляным уплотнением даже в том случае, когда качество масла ухудшается. Большие зазоры между ротором и корпусом (около 0,3 мм) позволяют мелкодисперсной пыли беспрепятственно проходить через ДРН (особенно при вертикальном потоке газа).

ДРН обеспечивают высокую производительность и работу в требуемом диапазоне давлений. Для них практически отсутствуют проблемы коррозии, поскольку откачиваемые газы быстро проходят через насос при достаточно низком давлении, вследствие чего скорости реакции очень малы. Герметичность ДРН может быть значительно повышена, если помещать индукционный двигатель в вакууме. ДРН обеспечивает снижение обратного потока паров рабочей жидкости из форвакуумного насоса вследствие увеличения давления на входе в форвакуумный насос при установившемся вязкостном течении газа и высокого коэффициента сжатия по углеводородам (около 200), уменьшающего во столько же раз их парциальное давление. Поскольку допуски на внутренние движущиеся части ДРН достаточно велики (0,1—0,3 мм), эти насосы могут откачивать газы, содержащие пыль и мелкодисперсные частицы. ДРН требуют смазки подшипников, и поэтому им присущи все основные проблемы, характерные для механических насосов с масляным уплотнением. Несмотря на то что по сравнению с механическими насосами ДРН менее подвержены воздействию коррозии, тем не менее для них следует соблюдать те же меры предосторожности в процессах, где присутствует кислород, в особенности когда для смазки подшипников и синхронизирующих шестерен используются синтетические масла (хлоруглеродистые и перфтористые эфиры). Последние обладают очень плохими смазывающими свойствами, что создает значительные трудности, особенно при больших скоростях вращения.

В ДРН герметизация валов необходима, во-первых, для предотвращения попадания паров масла в рабочую камеру насоса и, во-вторых, для защиты его масляных картеров от проникновения агрессивных откачиваемых соединений. При откачке агрессивных газов или паров давление в картере насоса поддер-

живается несколько превышающим давление в откачиваемой камере. Такой способ эвакуации масляных картеров препятствует проникновению в них откачиваемых газов и, следовательно, взаимодействию их с маслом. В особо тяжелых условиях работы давление подпора в масляных картерах может быть несколько ниже атмосферного. Проникновение откачиваемых газов в картеры при этом полностью исключается, однако уплотнения валов изнашиваются быстро.

Вакуумная плотность насоса при откачке опасных газов обычно достигается несколькими способами:

размещением электродвигателя в вакууме;

использованием двигателя с очень тонким герметичным стаканом из немагнитного металла, который окружает ротор двигателя (при этом статор и обмотки расположены снаружи стакана, а вращение осуществляется за счет магнитной индукции между статором и ротором через стакан);

применением магнитной муфты (аналогичной более толстостенному стакану), расположенной во вращающемся магнитном поле. Вращение ротора обеспечивается действием магнитной индукции между ним и индукционным ротором через стакан.

Из этих вариантов наилучший последний, поскольку здесь допустимы большие значения толщины (до 1,5 мм) стенок стакана (т. е. опасность его разрыва уменьшается) и расстояния между ротором и стаканом (до 1 мм), что уменьшает вероятность заклинивания ротора при попадании абразивных частиц. Кроме того, вращающиеся магниты работают как вентилятор, охлаждая стенки. При этом обычный гидрокинетический привод и сальники не используются, а для внутреннего уплотнения валов и подшипников применена специальная система. В сравнении с гидрокинетическим магнитный привод имеет единственный недостаток: нагрев стакана и индукционного ротора ограничивает продолжительность работы ДРН при высоких давлениях.

Газовый поток в ДРН можно регулировать с помощью одного из трех методов;

изменением скорости вращения роторов с помощью специальных регуляторов;

инжекцией газа в форвакуумную линию откачной системы через натекатель, управляющий давлением на входе в ДРН, которое, в свою очередь, изменяет давление в рабочей камере;

дросселирующим клапаном (этот метод чаще всего используют при осаждении пленок из газовой фазы).

При работе ДРН совместно с механическим насосом с масляным уплотнением следует принимать специальные меры предосторожности для устранения возможности проникновения паров масла из механического насоса в рабочую камеру реактора, когда режим течения газа переходит из вязкостного в молекулярно-вязкостный. Проникновение паров масла можно уст-

ранить постоянным напуском инертного газа между ДРН и механическим насосом. Наблюдаемое при этом увеличение остаточного давления в рабочей камере реактора не столь существенно. В качестве инертного газа могут применяться  $N_2$ , Ag, He и др.

Для реализации процессов осаждения и травления пригоден отечественный двухроторный вакуумный насос ДВЕ-160 с предельным остаточным давлением  $2 \cdot 10^{-2}$  Па. Насос имеет привод постоянного тока, что позволяет регулировать быстроту действия насоса от 11 до 160 л/с. На базе этого насоса, форвакуумного насоса НВД-16ДХ и установки очистки масла УСМ-0,15 создан вакуумный ротационный агрегат АВР-160 с повышенной стойкостью к агрессивным газам [1].

#### 8.6. ДИФФУЗИОННЫЕ ПАРОМАСЛЯНЫЕ НАСОСЫ

Использование пароструйных насосов (диффузионных и бустерных) в современном технологическом вакуумном оборудовании весьма ограничено и охватывает процессы, где применяются нейтральные или умеренно агрессивные технологические газы (например, кислород). Это связано с тем, что высокая (520 К) рабочая температура вакуумных рабочих жидкостей увеличивает скорость взаимодействия с ней и элементами конструкции насосов откачиваемых агрессивных соединений. В диффузионных насосах конструкционные элементы обычно изготавливают из материалов, не отличающихся коррозионной стойкостью (медь и ее сплавы, алюминий и др.). Даже применение нержавеющей стали для изготовления корпуса насоса не дает заметной защиты от коррозии в области нагревателя. Считается, что коррозия в диффузионных насосах является результатом накопления в рабочей жидкости химически агрессивных веществ, которые взаимодействуют с разнородными металлами при периодическом нагреве — охлаждении насоса. При откачке диффузионным насосом пылесодержащих газов пыль смешивается с рабочей жидкостью и через некоторое время образует клейкую массу, которая осаждается на соплах и выхлопных отверстиях, что снижает быстродействие насоса. Для предотвращения накопления откачиваемых газов в рабочей жидкости рекомендуется длительная прокачка, так как жидкость при этом самоочищается за счет вакуумной дистилляции. Тем не менее во всех случаях требуется довольно частая смена рабочей жидкости диффузионного насоса.

Диффузионные паромасляные насосы как наиболее дешевые и надежно работающие откачные средства без резко выраженной селективности при откачке газовых смесей используют для предварительной высоковакуумной откачки рабочих объемов



реакторов и для реализации процессов распыления, проводимых при давлении  $p < 10$  Па.

При переходе от режима предварительной высоковакуумной откачки объема реактора ( $p \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$  Па) к рабочему режиму ( $p \approx 10^{-1} \div 10$  Па) существенное значение имеет правильный выбор места дросселирования газового потока. В некоторых случаях дросселирование достигается частичным перекрытием затвора над азотной ловушкой. Если первоначально при полностью открытом затворе эффективная скорость откачки  $S_1$ , а затем при его частичном перекрытии она уменьшается до  $S_2$ , то при этом одновременно в  $S_1/S_2$  раз возрастает давление загрязняющих примесей в рабочем объеме реактора, что в ряде случаев недопустимо.

Поскольку основным компонентом остаточной среды в непрогреваемых установках периодического действия являются пары воды (до 70—90%), дросселирование потока следует выполнять ниже азотной ловушки. Это возможно в том случае, если непосредственно над впускным патрубком насоса имеется тонкостенная перегородка с отверстиями, суммарная проводимость которых зависит от требуемого перепада давлений между рабочей камерой реактора и впускным патрубком насоса. Поскольку при этом откачивающее действие азотной ловушки сохраняется на прежнем уровне, то даже при столь сильном дросселировании потока время набора вакуума при предварительной высоковакуумной откачке по сравнению с откачкой без дросселирования увеличится незначительно. Вместе с тем такой способ дросселирования позволяет [4]:

снизить в 15—20 раз давление загрязняющих примесей и контролировать это давление по показаниям манометра в процессе предварительной откачки рабочего объема реактора;

снизить обратный поток паров рабочей жидкости из насоса в результате постоянного перекрытия его впускного отверстия и одновременно повысить эффективность улавливания азотной ловушкой паров рабочей жидкости в результате их предварительного диффузного рассеяния на тонкостенной перегородке;

исключить субъективный фактор неточного регулирования опоротом потока при перекрытии затвора.

Основной тенденцией развития откачных систем на базе диффузионных насосов является создание комплектных систем, содержащих в одном блоке наряду с насосом также и другие элементы — клапаны, экраны, ловушки. При этом уменьшаются габаритные размеры систем и число разборных соединений с эластомерными уплотнениями, что позволяет улучшить такой важный параметр, как предельный вакуум насоса. Следует иметь в виду, что большинство диффузионных насосов имеют сварные соединения с припоями из различных цветных металлов,

которые подвержены сильной коррозии. Кроме того, высокая температура пара и рабочей жидкости в кипятильнике насоса повышает скорость коррозии и может быть одной из причин быстрого выхода насоса из строя.

### 8.7. ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Как показано в гл. 3 и 4, общей тенденцией развития процессов распыления материалов в инертной и реактивной средах является переход к откачным средствам без органических или других рабочих жидкостей. К таким откачным средствам относятся турбомолекулярные насосы (ТМН), характерная особенность которых состоит в постоянстве скорости откачки в широком диапазоне давлений ( $10^{-1}$ — $10^{-6}$  Па). Однако очень малые зазоры между пластинами ротора и статора позволяют использовать ТМН только в том случае, если при проведении технологического процесса не образуются твердые мелкодисперсные продукты.

Один из основных параметров ТМН — степень сжатия газа  $\chi$ . Максимальная степень сжатия  $\chi_{\max}$  (отношение давления на выходе к давлению на входе в насос при скорости откачки  $S = 0$ ) зависит от молекулярной массы откачиваемого газа и геометрической формы каналов в дисках статора и ротора, а также от окружной скорости вращения дисков ротора. Степень сжатия  $\chi$  и скорость откачки  $S$  связаны между собой соотношением:

$$S = (1 - \chi / \chi_{\max}) S_{\max}. \quad (8.11)$$

При номинальном значении окружной скорости степень сжатия значительно выше для тяжелых газов. Однако при снижении скорости вращения роторов в спектре остаточных газов резко увеличивается количество углеводородов. При определенных соотношениях давлений в случае откачки смеси газов могут одновременно существовать два противоположных потока газов: тяжелых и легких. Поэтому можно считать, что ТМН — это своеобразное газоразделительное устройство, эффективно откачивающее тяжелые газы (в том числе органического происхождения) и в то же время сохраняющее на определенном уровне давление водорода.

Для того чтобы снизить давление водорода в рабочем объеме установки, необходимо, чтобы соотношение скоростей откачки ТМН и механического насоса было не выше 20:1. Эффективность откачки паров воды увеличивают установкой на входе в ТМН ловушки, охлаждаемой жидким азотом. Она выполняет также роль дросселя, снижающего давление на входе в ТМН, что необходимо для предотвращения торможения дисков ротора ТМН при  $p > 10^{-1}$  Па, в результате которого скорость от-

качки становится нестабильной. При выполнении перечисленных требований ТМН может стабильно работать в области среднего вакуума при значительных потоках газа.

При давлениях ниже  $10^{-2}$  Па откачка коррозионных, воспламеняющихся, взрывоопасных и токсичных газов менее проблематична. Дело в том, что при столь малых давлениях количество откачиваемого газа ничтожно мало, взрывоопасная или пожароопасная ситуация очень редка. Однако необходимо учитывать специфику работы ТМН, высокоскоростные роторы которых вращаются в шариковых подшипниках, смазываемых маслами. Стандартные масла имеют минеральную основу из углеводородных цепочек с большим содержанием водорода. Коррозионные газы могут разрушать эти цепочки, в результате чего масла теряют свои смазывающие свойства, и подшипники при отсутствии смазки могут быстро выйти из строя. Эту проблему можно решать заменой минеральных масел синтетическими жидкостями (например, полифениловыми эфирами), которые не воспламеняются и инертны по отношению к большинству агрессивных газов. Кроме того, полифениловые эфиры совместимы практически с большинством эластомеров и металлов, используемых в ТМН. Правда, они примерно в 100 раз дороже обычных минеральных масел, однако в большинстве ТМН количество масла для подшипников очень небольшое, в связи с чем применение дорогостоящих эфиров для ТМН вполне целесообразно. Основной проблемой в ТМН является коррозионная стойкость масла или консистентной смазки, применяемых в качестве смазочного материала для высокоскоростных шарикоподшипников, а также материалов, из которых изготавливают ротор (особенно стойкость к хлорсодержащим продуктам). Если не применять специальных мер к улучшению надежности шарикоподшипников и системы смазки, то насос может выйти из строя через 30—40 циклов.

Откачка агрессивных газов с помощью ТМН показала, что при низких давлениях серийно выпускаемые ТМН общего назначения в основном достаточно стойки к агрессивным средам, поскольку процессы взаимодействия агрессивных сред с конструкционными материалами (в основном нержавеющая сталь и алюминий) при низких давлениях протекают крайне медленно. Наиболее критическими узлами ТМН являются подшипники, в которых смазка, взаимодействуя с агрессивными средами, быстро разрушается. Весьма стойка к агрессивным средам жидкость *fomblin* (перфторуглерод), однако агрессивные продукты, накапливаясь в ней, поступают к подшипникам и вызывают их коррозию. Для предотвращения этого процесса в область расположения подшипников и привода ТМН напускают защитный газ ( $Ar$ ,  $N_2$ ) под избыточным давлением 300 Па, что позволяет надежно защищать подшипники и привод. Выпускаемые фир-

мами Leybold — Heraeus, Alcatel, Balzers и другими ТМН в агрессивно-стойком исполнении снабжены специальными устройствами для автоматической продувки инертным газом.

В ТМН минеральные масла и синтетические жидкости помимо смазки должны одновременно обеспечивать охлаждение шарикоподшипников. Поскольку коэффициент трения в подшипниках пропорционален скорости их вращения, то при высокой скорости вращения должна использоваться рабочая жидкость с низкой вязкостью. Обычно применяют высокорафинированные узкофракционные масла, модифицированные сложные эфиры себациновой кислоты в ПФПЭ. При откачке агрессивных газов срок службы подшипников, смазываемых минеральным маслом, составляет 100—500 ч против 20 000—30 000 ч в нормальных условиях. Специалисты фирмы Balzers, использовавшие ПФПЭ в насосах с быстровращающимся тяжелым ротором, подшипниками большого диаметра и с циркуляционной системой смазки, наблюдали повышение температуры подшипников и вала ротора (в последнем случае до 363 К), а в насосах с фитильной системой смазки — недостаточную смазку. В насосах остальных типов не было трудностей в применении ПФПЭ и даже получен большой срок службы (более 2500 ч). Некоторые модифицированные ТМН фирмы Balzers при смазке подшипников жидкостью fomblin надежно работали в течение 700 ч в системах плазменного травления с потоком хлора, составляющим 30 Па·дм<sup>3</sup>/с [156].

Современные ТМН выпускают двух типов: вертикальные однороторные и горизонтальные двухроторные. Оба типа допускают оптимизацию по скорости откачки и степени компрессии, однако у насосов горизонтального типа более устойчивая конструкция подшипников. В однороторном насосе потеря проводимости между входным фланцем и ротором незначительная, а в двухроторном — большая. Однако по оценке специалистов фирмы Balzers скорость откачки у последних в 1,6 раза больше, чем у вертикальных однороторных с входным фланцем того же диаметра и аналогичными другими параметрами.

Критичными элементами насоса при откачке агрессивных газов являются подшипники и их смазка, ротор и ряд металлических частей из латуни (меди) и т. п. Для смазки и охлаждения подшипников применяют различные масла и смазки. Более низкие скорости износа характерны для воздушных и магнитных подшипников.

В том случае, когда в ТМН имеются шарикоподшипники для их защиты в процессе плазмохимического травления, необходимо применять не только специальные масла типа перфторполиэфиров, но и продувку азотом областей подшипников в месте их закрепления со стороны форвакуума. Но это не всегда дает желаемый результат, поскольку давление в указанных об-

ластях не может быть достаточно высоким для сохранения откачивающего эффекта турбонасоса.

Специалистами фирмы Leybold — Heraeus (ФРГ) было установлено, что при вводе защитного газа через масляный резервуар насоса turbovac-450 масло из системы смазки также нагнетается в область форвакуума. Это обстоятельство требует пополнения смазки через относительно короткие промежутки времени, что экономически невыгодно в случае дорогостоящих масел. ТМН, выпускаемые фирмами Balzers и Leybold — Heraeus, снабжены специальными системами продувки инертным газом, который вводится непосредственно в область подшипника. Ограничительная система в областях подшипника и двигателя создает перепад давлений около 200 Па, и возникающий благодаря этому в зазорах ламинарный поток инертного газа препятствует проникновению агрессивных газов в область подшипников. Специалисты фирмы Balzers также герметизировали двигатель и изготовили основные элементы насоса из коррозионно-стойких конструкционных материалов: лопатки — из алюминия с покрытием, держатели подшипников — из нержавеющей стали или алюминия с покрытием, систем уплотнений — из фторопласта, ротор — из алюминия с покрытием. Эффективность смазки была повышена примерно в 10 раз заменой обычной смазывающей системы масляным насосом [156].

Система газовой защиты подшипников ТМН насосов фирмы Leybold — Heraeus позволяет работать со стандартными смазками при откачке агрессивных газов, в том числе и содержащих пылеобразную фазу. В последнем случае наиболее пригодны насосы turbovac с консистентной смазкой, которые могут быть установлены «вниз головой», что сводит к минимуму проникновение пыли в насос.

Система газовой защиты шарикоподшипников существенно снижает их коррозию при откачке агрессивных газов, однако не предотвращает отложения или конденсации полимеров на лопатках ТМН, что может привести к нарушению балансировки ротора. Чтобы избежать конденсации откачиваемых веществ, специалисты фирмы Alcatel (Франция) разработали так называемый «теплый» ТМН. Модель 5401 CP с оптимизированной конструкцией и формой ротора и лопаток той же фирмы, кроме возможности установки «вниз головой», может работать при повышенных давлениях на входе с сохранением высокой скорости откачки [156, 159].

Масляная смазка подшипников в ТМН при правильной эксплуатации насоса не препятствует получению «чистого», не содержащего углеводородов вакуума. Дело в том, что при откачке тяжелых углеводородов степень сжатия составляет  $10^{12}$ — $10^{15}$ . Следовательно, даже если смазка имеет достаточно высокое давление паров ( $10^{-2}$  Па, масло ТМ-1), парциальное давление

углеводородов в откачиваемой системе составляет  $10^{-14}$ — $10^{-17}$  Па, что не может быть обнаружено даже самым чувствительным масс-спектрометром. Тем не менее пары смазки шарикоподшипников, находящихся в форвакуумной области ТМН, а также углеводорода, образующиеся при разложении смазки, могут проникнуть в откачиваемую систему, когда насос выключен и находится под вакуумом. Поэтому во всех современных конструкциях ТМН предусмотрен автоматический напуск инертного газа в насос до давления  $10^4$  Па при остановке, в результате чего полностью устраняется возможность проникновения углеводородов из области форвакуума в область впускного фланца ТМН.

В откачных системах с использованием ТМН основным источником углеводородов является форвакуумный насос, из которого последние диффундируют в откачиваемый объем в период предварительной откачки до запуска ТМН. Для устранения этого источника загрязнений обычно применяют ловушки, устанавливаемые на впускном патрубке форвакуумного насоса. Эффективен также одновременный запуск с атмосферного давления форвакуумного насоса и ТМН. В этом случае в начальный период откачки при разгоне ТМН вязкостный поток газа препятствует обратной диффузии углеводородов из форвакуумного насоса, а затем, по мере понижения давления, сам ТМН не дает возможности углеводородам проникнуть в откачиваемый объем.

Отечественные ТМН с вертикальной конструкцией ротора имеют предельное давление  $2 \cdot 10^{-5}$  Па и скорость откачки по воздуху 130 л/с (насос 01 НВТ-160 1А с отверстием входного фланца 100 мм) и 2500 л/с (насос 010 В-3500-006 с отверстием входного фланца 400 мм) [1]. Фланцы этих насосов имеют резиновое уплотнение, допускающее нагрев до  $100$ — $120$  °С. Надежность ТМН можно увеличить заменой подшипников качения, которые служат опорными узлами, магнитной подвеской ротора, как это сделано в насосе ТМН-400-МП ( $S_{эф} = 400$  л/с). Бесконтактная магнитная подвеска ротора обеспечивается в осевом направлении электромагнитами, а в радиальном — постоянными магнитами.

На базе серийно выпускаемых отечественных ТМН созданы высоковакуумные агрегаты АВТ-100 и АВТ-200 со скоростью откачки соответственно 100 и 250 л/с, снабженные затвором и байпасной линией для циклической откачки установок непрерывного и периодического действия с временем цикла 3—10 мин. В этих агрегатах использован форвакуумный модуль АВТ-10, разработанный на базе форвакуумного насоса НВР-16Д [1].

Последние годы характеризуются широким развитием работ по совершенствованию существующих и разработке новых видов ТМН со следующими параметрами:

Быстрота действия, л/с . . . . .	50—10 000
Предельное давление (при предварительном прогреве насоса и испытательного колпака с целью обезгаживания), Па . . . . .	$10^{-8}$
Окружная скорость вращения лопаток ротора, м/с . . . . .	До 500
Максимально достигнутая степень сжатия:	
по $N_2$ . . . . .	$10^{10}$
по $H_2$ . . . . .	$5 \cdot 10^4$
Удельная быстрота действия:	
на единицу площади впускного отверстия, л/(с·см <sup>2</sup> ) . . . . .	До 5
на единицу массы, л/(с/кг) . . . . .	До 45
на единицу объема, л/(с·дм <sup>3</sup> ) . . . . .	До 75
на единицу потребляемой мощности, л/(с/кВт) . . . . .	До 2500

Основными тенденциями развития ТМН являются [159]: дальнейшее развитие и совершенствование ТМН с шарико-подшипниковыми опорами ротора с целью создания наиболее дешевых и надежных в эксплуатации промышленных конструкций ТМН модульного типа, способных работать при любой пространственной ориентации;

дальнейшее повышение быстроты действия ТМН в результате применения высокопрочных материалов для изготовления ротора и увеличения его окружной скорости, использования высокооборотных шарикоподшипников, применения комбинированных опор ротора, в которых помимо шарикоподшипника одновременно применяется подшипник скольжения или же магнитная опора;

повышение долговечности и надежности работы ТМН за счет использования консистентной смазки шарикоподшипников с максимальным количеством смазывающего вещества, существенно снижающим газовыделение и обеспечивающим возможность работы ТМН при любой пространственной ориентации;

расширение диапазона рабочих давлений ТМН в сторону наибольшего впускного давления и увеличение допустимого выпускного давления в результате применения высокопрочных материалов для изготовления роторных лопаток, использование двигателей, не снижающих скорость вращения при увеличении впускного давления, использования комбинированных конструкций ТМН с установкой на одном валу турбинной и молекулярной ступеней;

уменьшение времени запуска ТМН и устранение возможности проникновения углеводородов из форвакуумного насоса в откачиваемый объем за счет автоматизации ТМН при высоких давлениях одновременно с запуском форвакуумного насоса и обеспечения напуска инертного газа в область выпускных ступеней ТМН при его остановке;

создание наряду с насосами общего назначения также специализированных насосов для откачки агрессивных и коррозионных газов.

## 8.8. КРИОНАСОСЫ

Стремление по возможности уменьшить вероятность загрязнения элементов ИС углеводородами заставляет в ряде случаев заменять паромасляные диффузионные насосы крионасосами, которые обладают наиболее широким диапазоном рабочих давлений по сравнению со всеми другими видами вакуумных насосов, поскольку могут запускаться начиная с давления откачиваемого газа в тройной точке, когда обеспечивается превращение газа в твердую фазу, минуя жидкое состояние. Так, при условии обеспечения требуемой температуры криопанели можно откачивать газы с давления  $O_2$  — 146,  $H_2O$  — 560,  $H_2$  —  $7,2 \cdot 10^3$ ,  $N_2$  —  $1,2 \cdot 10^4$ ,  $Ar$  —  $1,5 \cdot 10^4$  Па. По сравнению с другими видами откачных средств крионасосы имеют наиболее низкие энергетические затраты на единицу быстроты действия вплоть до давления 100—1000 Па (при больших давлениях из-за увеличения энергозатрат применение крионасосов становится нецелесообразным). Характерно, что в области низкого и среднего вакуума (1000—10 Па) удельный расход энергии для водородного крионасоса сравним с энергозатратами механических форвакуумных насосов. Кроме того, крионасос заливного типа является единственным откачным средством, у которого в области среднего вакуума быстрота действия возрастает в 2—2,5 раза в результате увеличения скорости падающих на криопанель молекул вследствие их взаимного столкновения. Эта особенность крионасоса может быть полезно использована для обеспечения откачки значительных газовых потоков.

Для достижения эффективной откачки низкиокпящих газов ( $He$ ,  $H$ ,  $Ne$ ) крионасосы снабжают двумя криопанелями: внешней (первая ступень) с температурой 70—80 К, предназначенной для откачки высококипящих газов (в основном  $H_2O$ ,  $CO$  и углеводородов) и внутренней (вторая ступень) с температурой 20 К, основное назначение которой — откачка низкиокпящих газов. Кроме того, входной фланец насоса закрывают азотной ловушкой жалюзийного типа, предназначенной для откачки водяных паров. Экономически более целесообразно охлаждать криопанель второй ступени до 20 К, поскольку при этом стоимость охлаждения примерно в 10 раз дешевле, чем при охлаждении до 4,2 К. Однако при 20 К водород не конденсируется и для его откачки приходится активировать криопанель или применять дополнительный геттерно-ионный насос. Для эффективной работы крионасоса очень важно соотношение мощностей хладопроизводительности обеих ступеней откачки. Например, если мощность первой ступени недостаточна для быстрой откачки высококипящих газов, то они конденсируются на второй ступени, что снижает эффективность откачки низкиокпящих газов. Но если мощность первой ступени чрезмерно велика, то снижается экономичность насоса. Для современных крионасосов, используе-



мых для процессов ВПТ, хладопроизводительность первой ступени 50 Вт, а второй ступени 10 Вт.

Скорость откачки насоса зависит от количества газа, сконденсированного на криопанели. Поскольку теплопроводность слоя сконденсированного газа низка, то с увеличением толщины этого слоя возрастает температура поверхности адсорбента, что приводит к увеличению равновесного давления сконденсированного газа над криопанелью и, как следствие, к снижению скорости откачки. Когда на криопанели сконденсирован лишь тонкий слой газа (температура поверхности слоя низка), крионасос не проявляет селективности. При толстом слое конденсата насос откачивает преимущественно газы с более высокой температурой кипения. При этом получается, что сконденсированный на криопанели слой газа представляет собой своеобразный «слоеный пирог»: нижний слой состоит из смеси многих компонентов, а верхний — преимущественно из  $H_2O$ . Из опыта эксплуатации известно, что при осаждении на криоповерхностях первой ступени слоя газов толщиной до 5 мм крионасос еще работает без сильного снижения скорости откачки. При толщине слоя 10 мм насос уже нуждается в регенерации. Однако при высоких давлениях легкоконденсирующихся газов (например, водяных паров) крионасос может работать до образования и более толстых слоев. Следует отметить, что температура замерзания подавляющего большинства хладонов лежит в диапазоне 170—80 К, в связи с чем они конденсируются на криопанели первой ступени, а поскольку многие процессы ВПТ проводятся при давлении 10—10<sup>3</sup> Па, то криоконденсат имеет рыхлую структуру и насос может эффективно работать даже при значительной толщине слоя криоконденсата. Этому способствует также то обстоятельство, что коэффициент захвата (отношение числа молекул, захваченных криопанелью, к общему числу падающих на нее молекул) для хладонов  $CF_2Cl_2$ ,  $CHCl_2$ ,  $CHCl_3$  и др. даже при температуре криопанели около 80 К достаточно высок (0,77—1,0).

Откачка газов с помощью криопанели второй ступени имеет свои специфические особенности. Во-первых, если на криопанели осаждается только низкокипящий газ, то коэффициент прилипания его молекул уменьшается пропорционально толщине слоя криоосадка. Однако этот коэффициент уменьшается значительно сильнее, если на криопанели конденсируется хотя бы небольшое количество высококипящего газа. Во-вторых, при повышении температуры криопанели всего на 1—2 К (что наблюдается при большой нагрузке на первую ступень) скорость откачки низкокипящих газов падает даже в том случае, когда еще не достигнуто полное насыщение поверхности криопанели. В-третьих, параллельно с адсорбцией молекул низкокипящих газов наблюдается замуровывание их слоями высококипящих газов (так называемый криозахват), которое происходит при

одновременной откачке нескольких газов (например, водорода и аргона). Перечисленные факторы затрудняют нахождение какой-либо адекватной зависимости сорбционной емкости криопанели второй ступени для низкокипящих газов от времени работы насоса.

Регенерацию крионасоса осуществляют путем его постепенного разогрева под откачкой механическим насосом с масляным уплотнением. В криоосадке обычно присутствует значительное количество паров воды, поэтому, чтобы не допустить насыщение ими ловушки на механическом насосе, откачку следует вести через перепускной клапан. При работе с крионасосами необходимо соблюдать правила техники безопасности. Поскольку на криопанелях крионасоса накапливается значительное количество сконденсированных газов, быстрый его нагрев, который возможен, например, при неожиданном отключении или выходе из строя криогенератора, может вызвать аварию. Так, если насос объемом около 10 л (распространенный вариант), на криопанелях которого сконденсировано  $5 \cdot 10^5$  см<sup>3</sup> газа, быстро нагреть, то давление в нем может достигнуть  $5 \cdot 10^6$  Па, и он может взорваться. Чтобы предупредить взрыв, крионасос обычно снабжают предохранительным клапаном. В ряде случаев, когда в рабочую смесь вводится водород, при регенерации может образоваться гремучая смесь. Во избежание взрыва к крионасосу или к коммутациям во время удаления конденсата нельзя подсоединять какие-либо высокотемпературные датчики. При проведении процесса осаждения конденсация на криопанелях большого количества токсичных веществ (HCl, HBr, HF, Cl<sub>2</sub>, AsCl<sub>3</sub>, AsF<sub>5</sub>, BF<sub>3</sub>, SiF<sub>4</sub> и др.) требует особенно внимательного соблюдения мер предосторожности при регенерации крионасосов.

Т а б л и ц а 8.8. Параметры отечественных криосорбционных насосов

Параметр	010ВК-2000-011	010С-5000-003
Предельное остаточное давление, Па	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Быстрота действия по воздуху, л/с	2000	5000
Диапазон рабочих давлений, Па	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 20^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-1}$
Наибольшее давление запуска, Па	4	1
Максимальная потребляемая мощность, кВт	2,2	2,2
Условный проход входного фланца, мм	250	400
Габаритные размеры, мм	600×450×690	710×580×895
Масса, кг	130	190
Уплотнение входного фланца	Резиновое	Металлическое

На основе отечественного криогенератора, работающего по циклу Стирлинга, сконструированы криосорбционные насосы 010ВК-2000-011 и 010С-5000-003 (табл. 8.8) [1].

Существенный интерес представляет возможность использования полностью безмасляной комбинированной откачной системы, включающей [160]:

безмасляный поршневой механический насос 010П-12-001 с быстротой действия 12 л/с и предельным вакуумом 5 Па, предназначенный для удаления из реактора основной массы воздуха;

конденсационный крионасос на базе ГХМ с циклом Стирлинга, обеспечивающий температуру криопанели 25 К и предназначенный для предварительной высоковакуумной откачки реактора и для работы в области среднего вакуума;

вспомогательный титановый геттерный распылительный насос магнетронного типа, предназначенный для откачки водорода, выделяющегося в процессе осаждения пленок, а также предварительной высоковакуумной откачки реакционной камеры.

С помощью этой откачной системы был получен предельный вакуум  $5 \cdot 10^{-5}$  Па и обеспечена возможность работы в области среднего вакуума (выше 1 Па) без повышения давления из-за накопления водорода [160]. Однако надо иметь в виду, что ГХМ имеет быстро изнашивающиеся части и длительного опыта промышленной эксплуатации крионасосов с ГХМ для реализации технологических процессов еще не имеется. Кроме того, при изготовлении крионасосов используется медь, медные сплавы, а также припой на основе меди, олова и свинца. Стойкость этих материалов в условиях длительного воздействия на них агрессивных газов также требует детального исследования.

Помимо безмасляных поршневых насосов в последние годы появились многоступенчатые роторные прямозубые насосы. В основе их конструкции — ряд вращающихся навстречу друг другу пар роторов, каждый из которых имеет один или несколько «зубьев» различных профилей на общем валу. Для того чтобы роторы не имели контакта и чтобы между ними и корпусом поддерживался гарантированный зазор, предусмотрена синхронность вращения, обеспечивающая передачу крутящего момента от ведущего ротора к ведомому при определенном соотношении фаз вращения роторов. Прямозубый насос обычно работает в комбинации с двухроторным насосом. Подобного рода безмасляный агрегат обеспечивает в диапазоне давлений  $10^2$ — $10^3$  Па быстроту действия до 50 л/с и предельный вакуум около 1 Па [161]. Кроме того, для откачки агрессивных газов, вызывающих коррозию, созданы специальные конструкции жидкостных насосов кольцевого типа. Опытные образцы этих насосов имеют быстроту действия 3 л/с и обеспечивают предельный вакуум до 10 Па [162].

### 8.9. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ГАЗОВОГО ПОТОКА

Промышленное внедрение процессов осаждения пленок с применением НГП требует наличия универсальных, простых, дешевых и надежных средств производственного контроля давления и потока газа. Используемые для этой цели приборы должны надежно работать в широком диапазоне измеряемых величин, иметь малую инерционность, минимальную погрешность и независимость показаний от воздействия химически активных и высокоэнергетических частиц. Автоматизация производства СБИС требует выхода информации на внешнее устройство для совместной работы с микропроцессором или с микроЭВМ в реальном масштабе времени при использовании дисплея.

Необходимость измерения широкого диапазона давлений (от  $10^{-5}$  Па в случае автономных ионных источников до  $10^4$  Па при осаждении пленок из газовой фазы) и газовых потоков (от  $1 \text{ см}^3/\text{мин}$  при реактивном распылении до  $1000 \text{ см}^3/\text{мин}$  при осаждении пленок из газовой фазы) с одновременным удовлетворением перечисленных ранее требований показывает, что для этой цели можно применять ограниченный ассортимент приборов.

Для измерения давлений в диапазоне  $10^{-5}$ — $10^2$  Па чаще всего пользуются электронными ионизационными и магнитными электроразрядными вакуумметрами. Однако следует иметь в виду, что, хотя эти приборы безынерционны, их показания могут изменяться в несколько раз в зависимости от состава газовой среды (часто точно не известной), а погрешность при измерении давления одного и того же газа может достигать  $\pm 50\%$ . Для измерения давлений в диапазоне  $10$ — $5 \cdot 10^3$  Па чаще всего применяют тепловые вакуумметры, показания которых также сильно зависят от состава газовой среды, а погрешность измерения достигает  $\pm 60\%$ . Кроме того, инерционность этих приборов на-

Таблица 8.9.

Тип механизма	Диапазон измеряемых давлений, Па	Статическая чувствительность по току к давлению, мкА/Па	Ток накала, мА (при $U = 6,3 \text{ В}$ )	Анодное напряжение $U$ , В	Ток каж-дого диода $I_a$ , А	Внутреннее сопротивление $R$ , кОм
6МДХ1Б	$0-0,5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-3}$	140	10—15	3,5—10	2
6МДХ2Б	$0-9,8 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-3}$	140	10—15	3,5—10	2
6МДХ3Б	$0-9,8 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{-3}$	140	10—15	1,5—10	2
6МДХ4С	$1,33-1,33 \cdot 10^3$	2,25	470	30	10—15	2
6МДХ5С	$13,3-1,33 \cdot 10^4$	0,75	470	30	10—15	2
6МДХ11С	$6,7 \cdot 10^3-1,4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-2}$	350	25	5—20	2
6МДХ12С	$6,6 \cdot 10^{-2}-133,3$	17,3	470	30	10—20	1,5

столько велика, что они непригодны в системах автоматики, когда необходим быстрый «опрос» показаний отдельных приборов.

В системах автоматики нужны безынерционные приборы, показания которых не зависят от состава газовой среды, а погрешность не превышает  $\pm 10\%$ . К числу таких приборов относятся деформационные вакуумметры мембранного типа, например механотроны (табл. 8.9) [163], а также прибор ПДД-1, который измеряет давление в диапазоне  $10^{-1}$ — $10^3$  Па с относительной погрешностью  $\pm 5\%$  [164].

В зарубежной практике для измерения давления широко используются мембранно-емкостные преобразователи (баротроны), чувствительным элементом которых является металлическая мембрана, натянутая в радиальном направлении. Разность давлений между наружной и внутренней поверхностями мембраны вызывает ее прогиб и изменение емкости между нею и соседними электродами. Рабочий диапазон  $10^{-4}$ — $10^4$  Па обычно разбит на ряд поддиапазонов, охватывающих 3—5 порядков значения давления. Погрешность прибора составляет (0,01—0,001) % верхнего предела измерений, постоянная времени 2—100 мс. Блок вакуумметра может быть объединен с аналоговым или цифровым устройством выдачи результатов измерений и с системой многоканальной блокировки для автоматического контроля [165].

Кроме давления определяющее влияние на процессы осаждения пленок оказывает газовый поток. В Международной системе единиц (СИ) газовые потоки измеряются в Вт (или  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ ). Однако на практике газовые потоки часто еще измеряют в более привычных внесистемных единицах л·мм рт. ст./с и  $\text{см}^3/\text{мин}$  (кубические сантиметры, приведенные к атмосферному давлению) (табл. 8.10) [1].

#### Параметры механотронов

Нестабильность выходного сигнала во времени, Па/ч	Чувствительность к изменению температуры окружающей среды, Па/°С	Нелинейность выходной характеристики, %	Рекомендуемое значение анодной нагрузки, кОм	Габаритные размеры, мм		Масса, г
				Диаметр	Длина	
(2—6) · 10 <sup>2</sup>	30—100	2—3	4—6	17,5	46	12
(1—3) · 10 <sup>3</sup>	1 · 10 <sup>2</sup> —1 · 10 <sup>3</sup>	2—3	4—6	17,5	50	12
(1—3) · 10 <sup>3</sup>	3 · 10 <sup>2</sup> —1 · 10 <sup>3</sup>	2—3	4—6	17,5	46	12
0,13	4 · 10 <sup>-2</sup>	1—2	4—6	40	118	110
0,6—1,2	1,3 · 10 <sup>-1</sup>	1—2	4—6	33	95	80
13,3	40	2—3	4—6	33	88	50
0,133	6,6 · 10 <sup>-2</sup>	1—2	4—6	56	135	180

Таблица 8.10. Соотношения между единицами расхода газа

Единица	Вт (или $\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$ )	л мм рт. ст./с	см <sup>3</sup> ат./мин
м <sup>3</sup> ·Па·с (или Вт)	1	7,5	600
л·мм рт. ст.·с	$1,33 \cdot 10^{-1}$	1	80
см <sup>3</sup> ·ат./мин	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	1

В зарубежной практике для измерения и регулирования газового потока наиболее широко используют терморезисторные датчики. Датчик представляет собой тонкую U-образную трубку, подключенную параллельно к газопроводу, по которому проходит основной поток газа. В середине U-образной трубки размещен нагреватель, а по ее краям — терморезисторы (рис. 8.6,а). При отсутствии газового потока вдоль U-образной трубки возникает симметричный профиль температуры. Но когда по трубке проходит газ, температура в начале трубки понижается, а в конце повышается, в результате чего имеет место асимметричный профиль температуры (рис. 8.6,б) [166].

Терморезисторы 1 и 4 из медной проволоки, намотанные на тонкостенную никелевую трубку, через которую протекает газ, являются чувствительными элементами датчика. Они включены в два плеча мостовой схемы. При отсутствии газового потока мост сбалансирован и выходной сигнал усилителя равен нулю. При наличии газового потока терморезистор 1 более интенсивно охлаждается проходящим газом, чем терморезистор 4. Изменение температуры терморезисторов вызывает линейное изменение их сопротивления и, следовательно, разбаланс моста, в результате чего на выходе усилителя появляется сигнал, пропор-

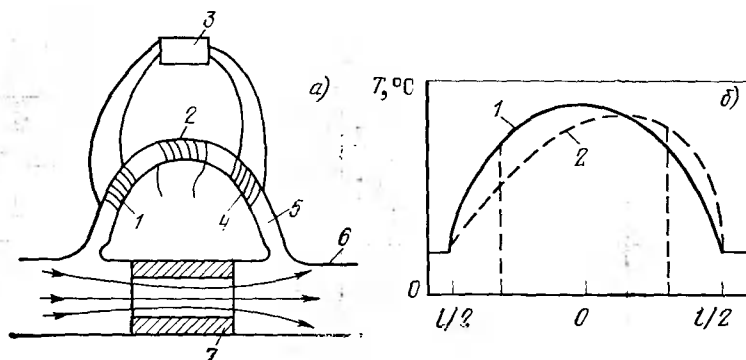


Рис. 8.6. Терморезисторный датчик расхода газа (а) (1—резистор; 2—нагреватель; 3—измерительный прибор; 4—резистор; 5—никелевая трубка; 6—отводная магистраль; 7—градуировочная втулка) и профиль температуры по длине никелевой трубки при отсутствии (1) и наличии (2) газового потока (б)

циональный расход газа. Для расширения диапазона измеряемого газового потока через никелевую трубку пропускают лишь небольшую часть газа, а основной поток подают через отводную магистраль, проводимость которой можно регулировать заменой калибровочной втулки, что позволяет в широких пределах варьировать диапазон измеряемого газового потока. Так, электронные автоматические устройства серии АФС, отградуированные по конкретным, наиболее часто используемым газам, позволяют измерять потоки от 10 до 600 см<sup>3</sup>/мин с погрешностью  $\pm 1\%$  полной шкалы [167].

В последние годы появились мембранные вакуумметры со стрелочным цифровым отсчетом с аналоговым выходом 0—10 В, обеспечивающие высокую точность измерения. Например, фирма Balzers выпускает цифровые пьезорезистивные вакуумметры с кварцевой мембраной, на которую нанесен резистивный слой, модели APG-010 (с одним датчиком) и APG-100 (с четырьмя датчиками) на диапазон измерений 10<sup>5</sup>—10<sup>2</sup> Па. Фирма Leybold — Heraeus (ФРГ) выпускает на тот же диапазон цифровой вакуумметр membranovac IVS с погрешностью измерений  $\pm 0,5\%$ . С помощью этих приборов можно измерять давление коррозионно-активных газов; их можно встраивать в АСУТП.

Фирма MKS Instruments Inc. (США) выпускает мембранно-емкостные вакуумметры типа Baratron, обеспечивающие измерение с помощью нескольких датчиков — преобразователей давления в диапазоне 10<sup>6</sup>—10<sup>-3</sup> Па. Вакуумметры имеют цифровой отсчет, аналоговый выход 0—10 В и с их помощью можно измерять давление коррозионно-активных газов с погрешностью 0,1%. Помимо вакуумметров фирмы MKS и Datametrics выпускают мембранно-емкостные потокомеры с цифровым отсчетом расхода газа и аналоговым выходом 0—10 В. Мембранно-емкостные вакуумметры и потокомеры позволяют работать с агрессивными средами и осуществляют полный контроль газовой среды в автоматизированных системах для осаждения и травления пленок с управлением от микропроцессоров и ЭВМ [165].

Внедрение в производство ИС технологических процессов, протекающих в диапазоне низкого и среднего вакуума, и необходимость автоматизации этих процессов с использованием ЭВМ предъявляют новые требования к тепловым вакуумметрам: возможность измерения давления агрессивных газов, повышение точности измерений, работа в системах, управляемых от ЭВМ, расширение диапазона измеряемых давлений. В соответствии с этими требованиями фирмы Edwards (Великобритания) и Leybold — Heraeus (ФРГ) выпускают тепловые вакуумметры в коррозионно-стойком исполнении, пригодные для работы с агрессивными газами (с платиновой или золоченой вольфрамовой нитью), работающие в диапазоне давлений 10<sup>5</sup>—5·10<sup>-2</sup> Па [165].

## 8.10. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

В основе подхода к построению конкретной высоконадежной системы для создания и поддержания вакуума в процессах, где используются химически активные вещества, а откачиваемые продукты содержат коррозионные, взрывоопасные, пирофорные и токсичные газы, а также абразивные частицы, лежит совместный учет воздействия этих агрессивных веществ на элементы вакуумной системы, окружающую среду и обслуживающий персонал.

Для обеспечения процессов, которые проводятся в диапазоне давлений 50—500 Па, практически все фирмы-изготовители вакуумного оборудования выпускают интегральные откачные средства в виде комбинации ДРН с пластинчато-роторным или плунжерным насосом [156].

ДРН может иметь либо постоянную, либо переменную скорость вращения роторов. В первом случае рабочее давление в реакторе задают изменением или пропускной способности откачивающей линии (установка дроссельного клапана между камерой и насосом), или газовой нагрузки ДРН за счет подачи балластного газа в реактор и байпасную линию. Во втором случае расход газа остается постоянным, а давление в реакторе регулируется изменением скорости вращения ДРН, т. е. скорости откачки насоса. Варьируя пропускную способность откачивающей линии, можно непосредственно регулировать нужный физический параметр. Однако при этом в вакуумной системе должен быть дополнительный клапан (дроссель), весьма чувствительный к пылесодержащим откачиваемым газам. При изменении газовой нагрузки ДРН в линию всасывания через клапан, управляемый датчиком давления, подают балластный газ (азот), поток которого может быть определен из соотношения

$$q = Sp - Q(S/U + 1), \quad (8.12)$$

где  $S$  — скорость откачки насоса;  $U$  — пропускная способность линии от камеры до насоса;  $Q$  — поток технологического газа;  $p$  — давление в камере.

В ДРН скорость вращения роторов устанавливают с помощью электронных регуляторов, что обеспечивает обратную связь между ней и любым рабочим параметром. Приводом служит двигатель постоянного тока; датчик давления — мембранный или термоэлектрический. Система не чувствительна к присутствию пыли и позволяет автоматически оптимизировать потребление электроэнергии. В некоторых откачных агрегатах на основе комбинации ДРН — пластинчато-роторный насос имеется гидрокинетический привод, что дает возможность подстраивать скорость вращения ротора к конкретной газовой нагрузке при периодическом ее изменении.



Сетчатый экран во входном патрубке насоса защищают входными фильтрами, что, однако, не исключает его ежедневной очистки.

Системы фильтрации рабочей жидкости насосов позволяют поддерживать длительное время их вакуумно-технические параметры на необходимом уровне, а другое вспомогательное оборудование — минимизировать воздействие агрессивных откачиваемых веществ на конструкционные материалы насосов.

Для расширения рабочего интервала вакуумной системы, повышения надежности и срока службы технологической установки, а также обеспечения защиты окружающей среды и безопасности обслуживающего персонала используют различные дополнительные устройства: сепараторы, адсорбционные ловушки и масляные фильтры.

Сепараторы отделяют тот или иной компонент, содержащийся в газовом потоке. Сюда относят конденсационные сепараторы, фильтры масляного тумана, устройства возврата масла, пылевые фильтры и кристаллизационные холодильники. В адсорбционных ловушках для улавливания агрессивных веществ служат адсорбенты (активированный уголь,  $Al_2O_3$  и др.), а также охлаждение жидкими азотом и углекислотой. Масляные фильтры предназначены для механической и химической очистки рабочих жидкостей. Адсорбционные ловушки, конденсационные сепараторы, пылевые фильтры и кристаллизационные холодильники устанавливают в вакуумном тракте перед насосом (на линии всасывания), а фильтры масляного тумана, устройства возврата масла и масляные фильтры — после насоса (в линии нагнетания), т. е. по месту размещения относительно вакуумного насоса дополнительные устройства можно разделить на входные и выходные.

Наибольшее распространение получили всевозможные фильтры, в том числе масляные фильтрующие станции.

Входные пылевые фильтры выполняют из картона, нержавеющей стали, меди, стекловолокна, нейлона, полипропилена, фторопласта и поливинилхлорида. В зависимости от количества и размера пылеобразных частиц в откачиваемом газе применяют входные пылевые фильтры двух основных типов. Фильтрующие элементы небольшой емкости достаточно тонкой очистки изготавливают из плиссированного материала (нейлона), при этом очищаемый газ движется по извилинам внутри элемента, и пыль осаждается на его фибрах. Фильтры такого типа фирмы Edwards имеют обозначение ITF, а фирмы Balzers — STR, STZ. Последние задерживают пыль с частицами размером 1,0 и 2,5 мкм соответственно и являются двухступенчатыми, причем вторая ступень фильтра заполнена материалом, смоченным маслом (как правило, тем же, которым заправлен вакуумный насос).

Таблица 8.11. Эффективность входной химической ловушки при улавливании различных соединений в смеси с сухим азотом при потоках  $25 \text{ см}^3/\text{с}$  и давлении  $100 \text{ Па}$  (по данным фирмы Edwards)

Откачиваемая жидкость	Отношение массы откачиваемой жидкости к откачиваемой смеси	Количество уловленной жидкости, %
Четыреххлористый углерод	0,7	80
Трихлорэтан	0,7	60
Этилацетат	0,5	60
Ацетон	0,7	35
Уксусная кислота	0,4	35

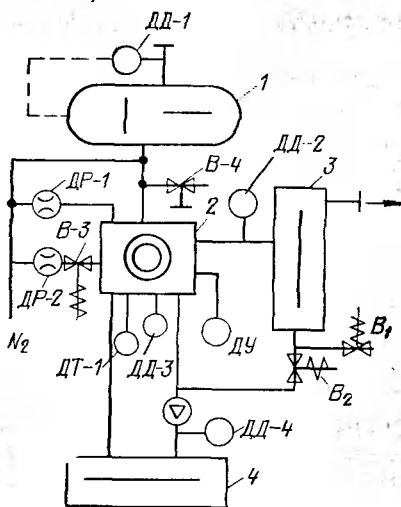
В процессах, где откачиваемый газ содержит значительное количество пыли (химическое осаждение из паров при пониженном давлении, выращивание кристаллов), используют фильтры большой емкости, фильтрующий элемент которых выполнен из вязаной металлической сетки (как правило, из нержавеющей стали). Для увеличения адгезии пыли фильтры часто смачивают маслом. Проводимость фильтров указанного типа не играет особой роли, а срок службы практически неограничен, так как их можно очищать в обычных бытовых моющих средствах или растворителях. При откачке газов с незначительным содержанием паров эффективны соответствующие газобалластные устройства.

В адсорбционных ловушках наиболее часто применяют активированный уголь — наилучший адсорбент хлорсодержащих соединений. Его сорбционная способность зависит от типа улавливаемого соединения (табл. 8.11) [156] и способа активирования. Так, специалистами фирмы Edwards установлено, что эффективно прокаливание при температуре  $570 \text{ К}$  в течение  $1 \text{ ч}$ , а более длительная обработка приводит к соответствующему увеличению количества адсорбированного пара. Например, непрокаленные образцы адсорбировали только  $7\%$  трихлорэтана угля, прокаленные при  $570 \text{ К}$  в течение  $2 \text{ ч}$  —  $30\%$ , а в течение  $24 \text{ ч}$  при той же температуре —  $40\%$ . Дальнейшее увеличение времени прокаливании приводит к насыщению адсорбционной способности при данном давлении, поэтому оно должно выбираться на основе экономической целесообразности. Следует отметить, что режимы регенерации активированного угля часто неприемлемы в условиях промышленного производства, когда используются большие объемы (десятки кубических сантиметров) сорбента.

Одной из важнейших характеристик фильтров является их пропускная способность, которая зависит от давления. Например, пылевые фильтры ITF уменьшают скорость откачки насоса приблизительно на  $10\%$  при давлении  $100 \text{ Па}$  и на  $25\%$  —

Рис. 8.7. Принципиальная схема откачного агрегата, снабженного различными датчиками:

1 — ДРН; 2 — пластинчато-роторный насос; 3 — маслоотделитель; 4 — фильтр; ДД — датчик давления; ДТ — датчик температуры; ДУ — датчик уровня масла; ДР — датчик расхода газа; В — вентиль



при давлении 10 Па. Пропускная способность пылевых фильтров фирмы Balzers в зависимости от модели составляет от 7 до 750 дм<sup>3</sup>/с при 100 Па.

В некоторых случаях для защиты форвакуумных насосов от агрессивных газов и продуктов их взаимодействия используют вымораживающие азотные ловушки. Азотные ловушки наиболее эффективны для улавливания хлорсодержащих газов (таких, как C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>, CCl<sub>4</sub>, SiCl<sub>4</sub>, AlCl<sub>3</sub> и др.), однако они практически почти не задерживают такие агрессивные газы и пары, как Cl<sub>2</sub> и HCl, поскольку для их конденсации необходимы более низкие температуры.

Рациональная эксплуатация вакуумного оборудования требует оптимизации режима его работы. Введение в состав технологической установки микроЭВМ позволяет управлять ее работой, анализируя поступающие с различных датчиков сведения, отражающие как параметры технологического процесса (давление в реакционной камере, расход технологического газа, температуру подложек и т. д.), так и состояние органов, узлов и блоков установки, а также обрабатываемых подложек (состояние клапанов, наличие или отсутствие жидкости, местоположение и перемещение подложек и т. д.).

В средствах откачки датчики, как правило, контролируют ее скорость, рабочую температуру насоса и уровень рабочей жидкости в нем.

В откачном агрегате, состоящем из ДРН и пластинчато-роторного насоса с масляным уплотнением, датчик ДД-1, установленный на входе ДРН, дает информацию о давлении на входе ДРН, которая используется для создания средств защиты его от перегрузки и, кроме того, индуцирует остановку (рис. 8.7). Масляный манометр ДД-2 в выпускной магистрали пластинчато-роторного насоса сигнализирует о повышении давления из-за закупорки патрона маслоотделителя, а такой же манометр ДД-3 в системе смазки пластинчато-роторного насоса — о неис-

правности в работе насоса и отсутствии смазки. Датчик ДД-4 показывает изменение давления масла в наружном устройстве фильтрации (оно повышается при забивании фильтрующего элемента). Датчик температуры ДТ-1 фиксирует рабочую температуру насоса (ее повышение свидетельствует о возможности заклинивания). Датчик уровня масла в насосе ДУ-1 сигнализирует о его утечке. Следует отметить, что схема, приведенная на рис. 8.7, позволяет автоматически возвращать масло, накапливающееся в маслоотделителе, в систему смазки. Для этого линия сброса маслоотделителя подключена к линии всасывания масляного насоса; имеющийся в схеме электромагнитный клапан периодически открывается по команде таймера, что сводит расход масла к минимуму. Ротаметры ДР-1, ДР-2 контролируют состояние газобалластной системы И/ИЛИ пузырькового устройства насоса. В распределительной газовой системе иногда дополнительно устанавливают манометры для фиксации давления сухого азота. Непрерывная подача его в линию, соединяющую выхлоп ДРН с входом пластинчато-роторного насоса, обеспечивает снижение обратного потока масла из последнего. Кроме перечисленных датчиков используют также индикаторы скорости вращения роторов ДРН.

#### 8.11. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ

Рабочие газы занимают одно из первых мест среди потенциально опасных химических веществ и материалов, используемых в производстве СБИС. По виду основной опасности газы можно разделить на шесть категорий: коррозионные, огнеопасные, окислители, инертные (обладающие удушающими свойствами за счет замещения кислорода), пирофорные (способные самовоспламениться при температуре выше 54°C) и токсичные (ядовитые) [1].

К сожалению, по-видимому, не существует такого газа, которому свойственна только одна из основных опасностей. Водород, например, чаще всего характеризуется как огнеопасный и взрывоопасный газ. Однако водород является также удушающим газом, поскольку в замкнутом пространстве он может замещать кислород.

Наибольшую угрозу представляют газы, которые могут самовоспламеняться или окисляться, поскольку они могут вызвать взрывы и пожары с большими человеческими жертвами. При этом следует иметь в виду, что даже те газы, которые при транспортировке не являются огнеопасными, при наличии утечки в производственном помещении могут вызвать сильный взрыв. Например, аммиак горит в воздухе при концентрациях от 16 до 25%, в то время как при транспортировке он не огнеопасен. Окислители или газы, насыщенные кислородом, могут явиться

причиной многих пожаров при их соединениях с горючими смесями. При этом часто остается без внимания возможность окислителя в обогащенной форме изменять условия горения смеси, с которой он входит в контакт.

Влияние второстепенных компонентов необходимо рассматривать с точки зрения их концентрации или процентного содержания в смеси. Так, газ, состоящий из 1%  $H_2$  и 99%  $N_2$ , не образует огнеопасной смеси. Однако если  $H_2$  составляет 5% объема смеси, а  $N_2$  — 95%, то образуется огнеопасная смесь. Кроме того, даже 1%-ная смесь  $H_2$  и  $N_2$  уже обладает удушающими свойствами.

Коррозионные газы вызывают серьезные, а иногда и смертельные ожоги при попадании на кожу даже за сравнительно короткий промежуток времени. Например, безводный фтористый водород ( $HF$ ) может вызвать смертельный исход при ожоге лица, когда обожжено всего 2,5% поверхности тела [1]. Следует отметить, что некоторые газы, используемые при осаждении из газовой фазы, хотя и не содержат  $HF$ , могут образовывать его в результате химических реакций.

Высокотоксичные газы, такие, как арсин, воздействуют на организм как яды гемолитического действия (вызывают замещение кислорода в крови), другие, например фосфин, воздействуют на систему дыхания. Следует отметить, что фторуглероды, считавшиеся ранее нетоксичными, также могут оказывать токсическое воздействие. Целый ряд газов обладают одновременно токсическими и коррозионными свойствами; в первую очередь к ним относятся хлор и его соединения ( $Cl_2$ ,  $HCl$ ,  $CHCl_3$ ,  $C_2ClF_5$ ,  $BCl_3$ ,  $CClF_3$  и др.). Следует по возможности избегать применения  $CCl_4$  из-за его канцерогенных свойств (способности вызывать раковые заболевания). Предпочтение поэтому отдается  $BCl_3$ ,  $SiCl_4$  и  $Cl_2$ . В хлорсодержащих газах, которые недостаточно хорошо очищены, может присутствовать и значительное число высокотоксичных примесей. Так, в  $BCl_3$  со степенью очистки 99,999% содержится  $10^{-4}\%$  фосгена ( $COCl_2$ ). Чаще всего на практике используют  $BCl_3$  со степенью очистки 99,9%, в котором содержится  $1,5 \cdot 10^{-2}\%$  фосгена.

Фосген может появиться также в результате пиролиза хлористых углеводородов в присутствии некоторых металлов, взаимодействия четыреххлористого углерода в присутствии некоторых металлов; взаимодействия  $CCl_4$  с гидратированным силикагелем при температуре 373—573 К или же как результат термического разложения  $CCl_4$  в присутствии различных оксидов металлов. Высокие концентрации этого удушливого слезоточивого газа вызывают сильное раздражение легких. Поскольку фосген характеризуется низкой скоростью гидролиза, то его разъедающее действие может дать замедленные отеки легких. Обычно считается, что максимальная концентрация фосгена

Таблица 8.12. Воздействие токсичных газов, паров и жидкостей на организм человека

Соединение, газ	Химическая формула	Вид воздействия										Примечание	Допустимая концентрация, г/10 <sup>6</sup>					
		Раздражающее и разъедающее				Удушасщее			Отравляющее									
		Кожа	Глаза и верхние дыхательные пути	Мелкие бронхи	Легочные альвеолы	Кислородное голодание	Окисленне гемоглобина	Кровь, плазма (гемолиз)	Печень	Нейроны головного мозга	Сердце			Почки	Желудок	Кости	Зубы	
Закись азота	NO	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Быстро окисляется на воздухе. Образуется метгемоглобин крови	25
Диоксид азота	NO <sub>2</sub>	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Образуется метгемоглобин крови	5
Аммиак	NH <sub>3</sub>	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50
Хлор	Cl <sub>2</sub>	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Хлористый водород	HCl	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
Бромистый водород	HBr	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Фтористый водород	HF	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Перекись водорода	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Сернистый водород	H <sub>2</sub> S	-	+	+	+	+	+	Паралич дыхания	+	+	+	+	+	+	+	+	Остеосклероз	10
Азот	N <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Оксид азота	N <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Аргон	Ar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гелий	He	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Водород	H <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Взрывоопасный Затруднение	5000



Соединение, газ	Химическая формула	Вид воздействия										Примечание	Допустимая концентрация $1 \cdot 10^{-6}$				
		Раздражающее и разъедающее			Удушьящее			Отравляющее									
		Кожа	Глаза и верхние дыхательные пути	Мелкие бронхи	Легочные альвеолы	Кислородное голодание	Окисление гемоглобина	Кровь плазма (гемоліз)	Печень	Нейроны головного мозга	Сердце			Почки	Желудок	Кости	Зубы
Арсин	$AsH_3$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Гангрена легких	0,05
Треххлористый мышьяк	$AsCl_3$	+	+	+	+	Отек гортанословых щелей	+	+	+	+	+	+	+	+	+	При гидролизе образуются $As_2O_3$ и $HCl$ . Канцерогенное	0,2 мг. м <sup>3</sup>
Трифтористый мышьяк	$AsF_3$	+	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	При гидролизе образуются $As_2O_3$ и $HF$ . Канцерогенное	—
Пятифтористый мышьяк	$AsF_5$	+	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	При гидролизе образуются $HF$ и $As_2O_3$ . Канцерогенное	—
Диборан	$B_2H_6$	—	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Взрывоопасен при контакте с четыреххлористым углекислым газом и хлором	0,1
Треххлористый бор	$BCl_3$	—	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	При гидролизе образуются $HCl$	—





Соединение, газ	Химическая формула	Вид воздействия								Примечание	Допустимая концентрация, 1·10 <sup>-3</sup>							
		Раздражающее и разъедающее				Удушающее						Отравляющее						
		Кожа	Глаза и верхние дыхательные пути	Мелкие бронхи	Легочные альвеолы	Кислородное голодание	Окисление гемоглобина	Кровь, плазма (гемолиз)	Печень	Нейроны головного мозга	Сердце	Почки	Желудок	Кости	Зубы			
Гексафторид молибдена	MoF <sub>6</sub>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	При гидролизе образуется HF	-
Тетрафторид титана	TiF <sub>4</sub>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	На воздухе с водой образуется HF	-
Тетрахлорид титана	TiCl <sub>4</sub>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	При гидролизе образуется HCl	-
Арсенид галлия	GaAs	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Рак легких при длительном воздействии. Поражение нервной системы	-

для закрытых помещений в случае длительного пребывания в них людей (8 ч в сутки) не должна превышать 0,1 на миллион.

Следует также учитывать, что если в некоторых случаях при взаимодействии с рабочей жидкостью насосов происходит нейтрализация опасных откачиваемых газов, то в других они или сохраняют свои опасные свойства, или образуют новые вредные соединения. Кроме того, такие газы, как гидриды, могут многократно переходить в течение технологического процесса из одного агрегатного состояния в другое.

Помимо фосгена при проведении ряда технологических процессов могут образовываться соединения, оказывающие отравляющее, удушающее и раздражающее действие на организм человека (например, фторфосген  $\text{COF}_2$ , арсин  $\text{AsH}_3$ , треххлористый мышьяк  $\text{AsCl}_3$ , пятифтористый мышьяк  $\text{AsF}_5$ , трехфтористый бор  $\text{BF}_3$ , четыреххлористый кремний  $\text{SiCl}_4$ , пятифтористый вольфрам  $\text{WF}_5$ , шестифтористый молибден  $\text{MoF}_6$ , фтористый водород  $\text{HF}$ , окись углерода  $\text{CO}$ , трехфтористый азот  $\text{NF}_3$ , окись азота  $\text{NO}$ , сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  и др.) (табл. 8.12) [156].

В результате химических реакций помимо самих исходных газов, паров и жидкостей могут образовываться оксиды, галлоиды, гидриды, гидроксиды, а также металлоорганические соединения, многие из которых обладают взрывоопасностью, агрессивностью и токсичностью. Наиболее важны два мероприятия: 1) защита от вредных веществ, отделяющихся от внутренних стенок реактора, а также от пыли и токсичных частиц, образующихся при напуске воздуха во время загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий; 2) меры предосторожности, необходимые при монтаже и регламентной чистке, в том числе при очистке деталей внутрикамерной оснастки различными кислотами.

Большинство токсичных веществ попадает в организм человека через дыхательные пути или проникает через кожу, хотя последнее менее характерно для производства СБИС. Мельчайшие частицы пыли могут легко попасть в организм человека. При этом наиболее крупные частицы прилипают к слизистой оболочке, проникают в трахею и бронхи. Эти частицы могут удаляться при кашле, однако значительная часть заглатывается со слюной и попадает в систему органов пищеварения. Пары многих веществ, состоящие из мелкодисперсных частиц размером около 0,3 мкм, оказывают очень сильное воздействие на дыхательную систему. Соединение мышьяка, например, треххлористый мышьяк  $\text{AsCl}_3$ , являющийся маслянистой жидкостью с температурой кипения  $130,4^\circ\text{C}$ , оказывает при испарении воздействие на глаза и дыхательную систему, а при попадании на кожу  $\text{AsCl}_3$  может проникнуть в кровь. Самый токсичный из всех соединений бора — гидрид бора, воздействующий на органы дыхания. Диборан  $\text{B}_2\text{H}_6$  оказывает сильное воздействие на

легкие, пентаборан  $B_5H_9$  и декаборан  $B_{10}H_{14}$  — на центральную нервную систему. Кроме того, декаборан вызывает отравление, проникая в кровь через кожу.

Для безопасности работы с газами очень важно, чтобы производственный персонал был осведомлен об их свойствах: воспламеняемости, летучести, токсичности и степени их воздействия на человека. Например, такой сильно отравляющий газ, как арсин  $AsH_3$ , сохраняет свою токсичность даже после перехода в окисные соединения. Более того, необходимо соблюдать осторожность при замене масла и чистке вакуумных насосов, поскольку некоторые газы и продукты их разложения сохраняют свою токсичность даже после попадания в насосное масло. Таким образом, вредность вещества зависит от его концентрации и свойств, независимо от того, кристалл ли это, твердый материал, пыль, дым, газ или жидкость.

Такие высокотоксичные газы, как арсин, фосфин, диборан и тетрафторид кремния, должны храниться отдельно с одновременным принятием мер безопасности для обслуживающего персонала. В предназначенных для этой цели газовых комнатах должны соблюдаться все меры пожаро- и взрывоопасности (вентиляция, предотвращение возможности случайного повреждения баллонов, использование специальных устройств для регулирования давления в баллонах и скорости истечения газа). В некоторых случаях рекомендуется применять дождевальные установки для снижения температуры баллонов на случай загорания внутри или снаружи газовой комнаты. Специальные вентили позволяют автоматически перекрывать выпуск газа из баллона при возникновении опасной ситуации. Новый тип вентили позволяет с помощью пневматического привода автоматически перекрывать поток газа из баллона без непосредственного контакта оператора с газовыми баллонами.

В вакуумных технологических процессах возможно загрязнение среды в результате негерметичности отдельных элементов технологического оборудования, в том числе утечки из рабочей камеры, а также систем газообеспечения, отвода продуктов и выхлопа или при их вскрытии в моменты загрузки — выгрузки, ремонта или технического обслуживания. Операции, связанные с заменой смазки и фильтрующих элементов, наиболее вредны для здоровья персонала, поскольку самые токсичные и опасные вещества накапливаются в вакуумной рабочей жидкости и в адсорбентах, входящих в состав масляных фильтров и сорбционных ловушек, а также в пылевых фильтрах. Загрязнение окружающей среды из-за утечки в вакуумной системе технологической установки наименее вероятно, поскольку выброс продуктов в этом случае возможен только в элементах, находящихся под давлением выше атмосферного. При соблюдении необходимых мер герметизации и вентиляции такая ситуация полностью ис-

ключается. Откачиваемые вакуумной системой соединения перед выбросом в атмосферу должны соответствующим образом обрабатываться (нейтрализоваться промывкой в жидкостях или термически разлагаться на безвредные вещества). Жидкостную обработку (бикарбонатом натрия или поташем) осуществляют в так называемых газопромывочных колоннах, обычно встречаемыми потоками. Для повышения их эффективности дополнительно устанавливают адсорбционные колонны с активированным углем. Термическое разложение или управляемое горение дает хорошие результаты при нейтрализации силана, дихлорсилана, диборана, фосфина. В используемом для этого устройстве газы подаются через систему, предотвращающую обратное распространение пламени, смешиваются с кислородом и азотом в смесительной камере, а затем поступают на нагревательные элементы, где окисляются. Продукты горения, разбавленные азотом, выбрасываются через газовую трубу Вентури и направляются либо в дымовую трубу, либо в газопромыватель.

Существенное снижение степени воздействия продуктов реакций на обслуживающий персонал и окружающую среду может быть достигнуто в результате повышения уровня автоматизации оборудования и перехода в дальнейшем к гибкому автоматизированному безлюдному производству.

## Глава 9

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

#### 9.1. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Состояние и тенденции развития интегральной электроники показывают, что благодаря простоте и освоенности технологии, высокой надежности и высокому уровню интеграции, обеспечивающему высокую функциональную производительность микросхем, кремний на ближайшие 20 лет сохранит свою лидирующую роль в качестве основного материала для изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС). Полупроводниковые СБИС ЗУ благодаря высокой плотности записи информации, незначительной потребляемой мощности и малого времени обращения доминируют среди всех видов СБИС. Ожидается, что к 2000 г. объемы выпуска СБИС ЗУ превысит 76% общего объема выпуска ИС, а их информационная емкость достигнет 64 Мбит.

За последние 15 лет плотность ИС ЗУ (которые являются основным видом ИС) увеличилась примерно в тысячу раз, а их быстродействие возросло в 10 раз. Уже в 1987 г. был освоен промышленный выпуск ДОЗУ емкостью 1 Мбит. Кроме того, в начале 1987 г. на Международной конференции по твердотельным ИС (ISSCC) в Нью-Йорке три ведущие фирмы NEC и Toshiba (Япония) и Texas Instruments (США) продемонстрировали свои ДОЗУ емкостью 4 Мбит. На той же конференции фирма NTT (Япония) представила прототип первого в мире ДОЗУ с объемом памяти 16 Мбит. Это ДОЗУ способно хранить в своей памяти 1 млн. иероглифов или 2 млн. алфавитных знаков [168].

В ближайшие 10 лет наибольшими потребителями полупроводниковых ЗУ будут персональные, большие и суперЭВМ. В 1995 г. для создания автоматизированного рабочего места потребуются ЗУ с объемом памяти 4 Гбайта, для больших ЭВМ — 16 Гбайт, а для суперЭВМ — 64 Гбайта.

Магистральным направлением повышения эффективности полупроводниковых ЗУ является интеграция на одном кристалле средств хранения и обработки информации с реализацией широкого разнообразия логических функций. В ближайшие годы следует ожидать применения методов трехмерной интеграции, а также интеграции на одной пластине. Таким образом, резерв повышения степени интеграции полупроводниковых ЗУ достаточно велик и вполне вероятно, что интенсивное развитие полупроводниковых ЗУ, которое наблюдалось за последние 15 лет, сохранится до конца текущего столетия.

Ведущие фирмы Японии и США уже приступили к разработке динамических ЗУ с произвольной выборкой (ДОЗУ ПВ) емкостью 16 и 64 Мбит. При изготовлении ЗУ с мегабитовой емкостью предусматривается увеличение числа функциональных слоев с одновременным уменьшением их толщины, а также частичное использование трехмерной интеграции, при которой часть элементов выполняется в рекристаллизованных слоях ранее нанесенного поликремния или формированием многослойных структур в канавках различного профиля. Трехмерная интеграция открывает заманчивую перспективу значительного повышения быстродействия и компактности ЗУ, и если она будет реализована, то начнется новая эра в микроэлектронике, подобно той, которая имела место при переходе от дискретной к интегральной электронике [169].

Развитие ИС ЗУ сопровождается непрерывным увеличением числа используемых слоев (до 15), числа шаблонов (до 20), уменьшением глубины  $p-n$ -переходов (до 0,1 мкм), ширины линий (до 0,3 мкм) и толщины подзатворного диэлектрика (до 10 нм). Уменьшение толщины подзатворного диэлектрика позволит снизить напряжение питания, которое в настоящее время

мя составляет 5 В, что, в свою очередь, позволит уменьшить произведение быстродействия на мощность до нескольких фемтаджоулей, задержку на клапан — до десятков пикосекунд. Полагают, что к 2010 г. объем мегабайта памяти снизится до  $10^{-4}$  л, что вплотную приблизится к объему памяти человеческого мозга.

Анализ традиционных путей развития интегральной электроники показывает, что уже достигнут уровень столь высокой интеграции, что приходится считаться с рядом физических и технологических ограничений при его дальнейшем повышении. К этим ограничениям следует отнести:

усложнение и удорожание технологических процессов и оборудования при уменьшении технологических размеров за счет ужесточения требований к чистоте технологических сред и реактивов и к точности совмещения при резко возросшем числе совмещаемых элементов;

существенное снижение выхода годных ИС с дальнейшим уменьшением размеров элементов и увеличением площади кристалла в результате повышения вероятности появления на кристалле дефектов и загрязнений, размеры которых близки к размерам элементов;

значительное повышение площади, занятой межсоединениями, которая в ряде случаев может превысить активную (полезную) площадь кристалла;

значительное увеличение числа уровней металлизации с непропорциональным ростом числа ячеек на кристалле (так, при двухуровневой металлизации число ячеек возрастает в 1,3 раза, а при десятиуровневой — только в 2,7 раза);

повышение роли контрольно-измерительных операций в производстве СБИС и возможность возникновения парадоксальной ситуации, при которой стоимость контроля параметров СБИС станет выше стоимости их изготовления. Это заставляет, с одной стороны, совершенствовать существующие и изыскивать новые, более эффективные средства контроля на основе современных высокоавтоматизированных измерительно-вычислительных комплексов и, с другой стороны, стабилизировать технологию на таком уровне, чтобы появилась возможность исключить наиболее трудоемкие виды контроля;

необходимость отказа от старых методов визуального контроля, базирующихся на оптической микроскопии, и ориентация на растровую электронную микроскопию (РЭМ), которая обеспечивает разрешение 5 нм, позволяя изучать форму, измерять размеры элементов СБИС и их взаимное расположение. Кроме того, РЭМ обеспечивает неразрушающий контроль, так как органически вписывается в установки и линии непрерывного действия.

До сих пор развитие и совершенствование ИС происходило в соответствии с принципом пропорциональной миниатюризации или масштабирования и сочеталось с одновременным увеличением размера кристалла ИС. При этом рабочие напряжения, токи, емкости и задержки активных элементов ИС уменьшались, а сопротивление межсоединений увеличивалось пропорционально линейным размерам ИС, в то время как потребляемая мощность снижалась пропорционально квадрату линейных размеров.

Сопоставление темпов изменения минимальных размеров элементов (проектных или топологических норм) и степени интеграции показывает, что последняя возростала значительно быстрее. Это объясняется тем, что одновременно с уменьшением линейных размеров оптимизировались вся геометрия активных элементов ИС, их внутренняя изоляция и схемная организация.

Уменьшение размеров элементов продолжает оставаться глобальной тенденцией развития микроэлектроники, поскольку считается, что при этом улучшаются все характеристики ИС. Однако эта закономерность справедлива до определенных геометрических размеров, меньше которых параметры и характеристики различных типов приборов могут претерпевать качественные изменения, и не исключено, что при этом некоторые приборы станут неработоспособными или же технологически нереализуемыми. Как биполярная (БТ), так и полевая (ПТ) транзисторные структуры при уменьшении ширины базы и длины канала соответственно вырождаются в некоторые предельные структуры, в которых нарушается процесс нормального функционирования.

Основными тенденциями развития производства ИС до конца текущего столетия являются:

структурный сдвиг в сторону КМОП-технологии, которая в 90-х годах займет лидирующее положение среди всех других видов технологии изготовления ИС [170, 171];

дальнейшее повышение плотности размещения элементов на кристалле, в том числе за счет использования трехмерной интеграции, а также интеграции на одном кристалле средств обработки и хранения информации [169];

увеличение использования заказных, полузаказных и специализированных ИС, повышение их сложности и расширение номенклатуры с одновременным ускорением фактора морального старения [140, 141];

увеличение объема выпуска базовых матричных кристаллов (БМК), а также заказных фотошаблонов для создания межсоединений. Применение БМК позволит приблизить темпы роста степени интеграции элементов СБИС к предельно достижимой [140, 141];



внедрение методов физико-технологического моделирования всех основных производственных операций с построением двумерных и в дальнейшем трехмерных моделей технологических процессов [172, 173];

переход к процессам индивидуальной (или мелкогрупповой) обработки кремниевых пластин большого диаметра (до 200 мм) [168];

широкое внедрение комплексных автоматизированных систем, снабженных программными и аппаратными средствами, способными обеспечить управление всеми этапами производства ИС [174].

## 9.2. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СРЕДАМ, ХИМИКАТАМ И МАТЕРИАЛАМ

Повышение уровня интеграции и, как следствие, прецизионности обработки ИС предъявляет очень жесткие требования к чистоте и обеспыленности производственных помещений, степени чистоты химикатов, технологических сред и материалов. Микрочастицы вызывают до 80% всех дефектов, возникающих в процессе производства БИС и СБИС. Так, 60%-ный выход годных ИС при производстве ДОЗУ ПВ с объемом памяти 64 Кбит и проектными нормами 3 мкм может быть обеспечен только в том случае, если плотность дефектов менее  $0,5 \text{ см}^{-2}$  для каждого критического слоя. Однако при изготовлении ДОЗУ ПВ с проектными нормами 1 мкм при указанной плотности дефектов процент выхода практически будет близок к нулю и для того, чтобы он достиг 10%, плотность дефектов должна быть уменьшена примерно в 100 раз.

Высокая чувствительность СБИС к загрязнениям определяется, во-первых, физическими процессами, связанными с движением носителей заряда в полупроводниковом материале, содержащем не более  $10^{-7}\%$  посторонних веществ порядка  $10^{-4}$ — $10^{-6}\%$  атомов легирующей примеси. Во-вторых, чувствительность СБИС к загрязнениям объясняется микронными размерами элементов с плотностью их размещения более  $10^4 \text{ мм}^{-2}$  и, в-третьих, наличием тонких слоев и поверхностей раздела фаз с повышенной энергией концентрирования примесей из среды [175, 176].

Контроль степени чистоты технологических сред и материалов — одна из важнейших проблем, без решения которой не может быть обеспечен требуемый выход ИС. Установлено, что около 67% отказов ИС вызывают загрязнения, вносимые в пластины из технологических сред, около 22% — дефекты кремния и около 11% — дефекты оксидной пленки. При этом по мере повышения степени интеграции и приближения к субмикронным размерам элементов ИС отрицательная роль загрязнений

Т а б л и ц а 9.1. Предельно допустимые размеры и концентрации микрочастиц в деионизованной воде

Параметр	Объем памяти, Кбит/кристалл		
	16	256	1000
Диаметр частиц, мкм	0,2	0,1	0,05
ПДК микрочастиц, см <sup>-3</sup>	200—300	20—150	20
ПДК микроорганизмов, см <sup>-3</sup>	1	0,002—0,2	0,01

Т а б л и ц а 9.2. Предельно допустимые загрязнения для мишеней из молибдена, част./млн

Вид загрязнения	Обычная мишень	Мишень высокой чистоты
Щелочные металлы:		
Na	10	0,01
K	10	0,03
Радиоактивные элементы U	0,7	0,001
Тяжелые металлы:		
Fe	50	0,01
Ni	15	0,05
Cr	25	0,01
Степень чистоты, %	99,9	99,999

существенно возрастает. Отсюда очевидна необходимость наличия эффективной системы контроля степени чистоты технологических сред и материалов, однако при создании подобного рода системы возникает ряд трудностей, связанных прежде всего с беспрецедентно низкой (по сравнению с другими производствами) предельно допустимой концентрацией (ПДК) вредных загрязнений и наличием большого разнообразия потенциально вредных как по химической природе, так и по физическим свойствам веществ. Практически почти любое вещество, не относящееся к основным рабочим компонентам данной среды, можно рассматривать как вредную примесь. Отсюда чрезвычайно жесткие требования к системам контроля, которые должны обеспечивать очень высокую чистоту, обнаруживая загрязнения самой разной природы. Наиболее жесткие требования предъявляются к степени чистоты деионизованной воды и воздушной среды из-за их наиболее длительного контакта с ИС в процессе ее производства.

Критический размер частицы, которая даже при однократном контакте с поверхностью пластины необратимо адсорбируется ею, не должен превышать 0,1 минимального линейного размера элементов ИС (для ДОЗУ ПВ емкостью 1 Мбит размер частицы не должен превышать 0,1 мкм). Из жидких сред наиболее жесткие требования к микрочастицам (как и по другим видам загрязнений) предъявляются к деионизованной воде [176, 177],

причем эти требования ужесточаются по мере повышения степени интеграции (табл. 9.1) [175].

Загрязнение жидких и газообразных технологических сред, химикатов и материалов оценивается числом частиц загрязняющего материала на миллион частиц основного вещества [178].

Предельно допустимые загрязнения для газов, част./млн, используемых в производстве СБИС:

<i>Силан</i>		<i>Арсин</i>	
SiH <sub>4</sub>	99,99 %	AsH <sub>3</sub>	99,999 %
H <sub>2</sub> +He	<60	O <sub>2</sub>	<1
N <sub>2</sub>	<1	N <sub>2</sub>	<1
CH <sub>4</sub>	<2	CO	<1
CO	<0,1	CO <sub>2</sub>	<1
CO <sub>2</sub>	<1	CH <sub>4</sub>	<1
Хлоросиланы	<1	H <sub>2</sub> O	<2
		H <sub>2</sub> S	<0,05
		PH <sub>3</sub>	<1
<i>Хлористый водород</i>		<i>Фосфин</i>	
HCl	99,999 %	PH <sub>3</sub>	99,999 %
CO <sub>2</sub>	<5	O <sub>2</sub>	<1
N <sub>2</sub>	<2	N <sub>2</sub>	<1
O <sub>2</sub>	<1	CO	<1
CH <sub>4</sub>	<1	CO <sub>2</sub>	<1
H <sub>2</sub> O	<1	CH <sub>4</sub>	<1
		H <sub>2</sub> O	<2
		AsH <sub>3</sub>	<1

Еще более жесткие требования предъявляются к степени чистоты деионизованной воды. При ее использовании в производстве СБИС уровень частиц кремния должен быть ниже 10, а частиц углерода органического происхождения ниже 15 частиц на миллиард частиц воды, что может быть достигнуто путем обработки воды от источника УФ-излучения с длиной волны  $\lambda = 185$  нм [177].

Существенно ужесточаются требования к степени чистоты материала для мишеней (табл. 9.2) [179].

Получение элементов малых размеров и обеспечение точности их изготовления предъявляют высокие требования к чистоте материала мишеней. Так, если при изготовлении ДОЗУ емкостью 256 Кбит можно использовать материал мишеней с чистотой 99,999%, то для ДОЗУ емкостью 1 и 4 Мбит требуется чистота материала 99,9999%. Поскольку столь высокую степень чистоты практически невозможно получить для мишеней многокомпонентного состава, пленки сложных материалов (силициды и др.) чаще всего осаждают путем одновременного распыления двух мишеней, обеспечивая точное поддержание требуемых компонентов. Для устранения в пленках разрывов и пустот материал мишени должен иметь 100%-ную плотность. Для устраи-

Таблица 9.3. Динамика загрязнения от различных источников (по годам), %

Источник частиц	1980 г.	1985 г.	1990 г.
Окружающая среда	40	20	10
Оборудование	10	30	40
Материалы	10	20	40
Обслуживающий персонал	40	30	10

нения в пленках триггерных дефектов от  $\alpha$ -частиц в материале мишени не должны присутствовать радиоактивные загрязнения.

Характерно, что при переходе от производства БИС к СБИС существенно изменяется основной источник загрязнений. Как видно из табл. 9.3 [180], если при производстве БИС основным источником загрязняющих частиц были окружающая среда и обслуживающий персонал, то при изготовлении СБИС источниками загрязнений становятся оборудование и материалы.

Чтобы обеспечить производство СБИС с субмикронными размерами элементов, оператор, как основной источник биологических загрязнений, должен быть устранен от соприкосновения с пластинами в процессе их обработки. Однако при этом все же приходится удалять загрязнения в виде частиц металла и пластмасс, вносимые самим оборудованием и прежде всего его трущимися деталями и узлами. Поэтому одной из основных и первоочередных проблем, которую необходимо решить при создании заводов для промышленного выпуска СБИС нового поколения (в первую очередь — ДОЗУ с объемом памяти 4 и 16 Мбит), является снижение количества загрязняющих частиц, которые могут попасть на пластину в процессе ее обработки на установке, при ее транспортировке между установками и при межоперационном хранении. Решение этой проблемы ведется в двух направлениях: путем повышения класса чистоты производственных помещений и путем снижения количества загрязнений, вносимых на пластину каждой установкой.

Повышение чистоты производственных помещений будет происходить в результате перехода от класса 100 к классу 10 и классу 1. Предполагается, что чистые помещения класса 1 будут содержать в одном кубическом футе (27 л) воздуха не более 1 пылинки размером 0,2 мкм и на стенах длиной 10 футов (3 м) будет находиться не более 10 пылинок. Чистота зоны оценивается классом 1 в том случае, если каждая стадия загрузки вносит не более двух частиц, а общее количество не превышает 13 частиц. Ключом к достижению чистоты класса 1 является обеспечение такой аэродинамической конструкции чистого помещения, в котором отсутствуют горизонтальные поверхно-

сти для оседания пыли, а форма стен обеспечивает плавное движение воздуха в зоне незащищенных пластин.

Основными источниками загрязнений в помещении являются технологическое оборудование и находящиеся около него операторы. Использование чистых комнат и специальных комбинезонов для операторов — это, по существу, полумеры, которые хотя и позволяют снизить загрязненность производственных помещений, но одновременно резко удорожают производство и ограничивают функциональные возможности человека, заставляя его работать в комбинезоне, т. е. в условиях искусственного климата. При этом имеет место парадоксальная ситуация, при которой для обработки пластин, объем которых составляет всего сотни кубических сантиметров, приходится строить помещения объемом несколько тысяч кубометров, обеспечивая в них обеспыленность и условия вакуумной гигиены, в которых не нуждается ни оборудование, ни тем более обслуживающий персонал.

Наиболее реальный выход из создавшейся ситуации — переход к стандартным механическим интерфейсам (СМИФ), при котором кассеты с пластинами хранятся и переносятся в небольших герметичных пыленепроницаемых коробках, а оборудование каждого вида имеет герметичный кожух, внутри которого обеспечиваются самые жесткие требования, предъявляемые к чистым комнатам. Каждая коробка и каждый кожух имеют идентичную стандартную «дверь». При совмещении двери пыленепроницаемой коробки с дверью кожуха обе двери одновременно открываются и пластины с помощью робота-манипулятора поступают на ту или иную технологическую операцию. При использовании СМИФ число загрязняющих частиц на пластине уменьшается на порядок по сравнению с уровнем, достигнутым в обычном чистом помещении. При этом снижаются требования, предъявляемые к степени чистоты помещения, в котором находятся операторы, примерно в 50 раз сокращается объем требуемого обеспыленного воздуха и в несколько раз сокращается скорость воздухообмена, поскольку основной источник пыли — оператор — в этом случае не находится в обеспыленном объеме.

В качестве параметра, гарантирующего снижение количества загрязнений, вносимых оборудованием на пластину, ведущие фирмы США указывают количество частиц, которое может попасть на пластину в процессе ее обработки на данной установке. Для снижения количества загрязняющих частиц предлагается:

использование конструкционных и технологических материалов высокой степени чистоты, не вызывающих в процессе эксплуатации образование волокон, крошек, пыли и пр.;

замена пар трения парами качения;

отделение трущихся и перемещающихся узлов от зоны нахождения пластин с помощью специальных уплотнений;

использование для загрузки и выгрузки пластин вместо конвейеров, воздушных треков, устройств с контактом по кромке специальных роботов, которые берут и кладут пластину в требуемом месте;

размещение пластин в процессе их обработки в вертикальной плоскости;

конструирование рабочих камер с малым количеством поверхностей и узлов, способных накапливать загрязняющие частицы;

согласование коэффициентов термического расширения материалов, используемых в рабочих камерах, поверхности которых экспонируются на незащищенную пластину;

пересмотр методов перемещения пластин в рабочих камерах (отказ от конвейеров, воздушных подушек и др.);

усовершенствование конструкций мишеней, изменение их формы и способов их крепления в катодном узле;

использование новых способов перемещения пластин в вакууме, не вызывающих появления металлической пыли;

упрощение всех механизмов, устранение трущихся частей, вибраций и ударов;

применение новых материалов и покрытий в рабочих и вспомогательных камерах;

использование роботов для загрузки и выгрузки пластин;

встраивание части установки в чистую комнату с минимальными размерами занимаемой площади.

### 9.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Освоение массового производства кремниевых СБИС произвело так называемую информационную революцию, не уступающую по своему значению индустриальной революции [172]. Информационная революция существенно отличается от последней использованием интенсивно развивающейся компьютерной технологии, в отличие от ранее используемой технологии, которая была направлена в основном на механическое взаимодействие с окружающей средой. Поскольку ограничения схемно- и системно-технического проектирования, существенно влияющие на основы кремниевой технологии, все больше определяются межсоединениями, комплект оборудования для компьютерной кремниевой технологии непосредственно зависит от достижений в создании металлизации СБИС. Проблемы межсоединений в последние годы настолько обострились, что современные и тем более перспективные сверхбыстродействующие СБИС и УБИС следует рассматривать уже не как совокупность активных элементов, взаимодействующих через межсоединения, а скорее как

созданную с помощью компьютерной кремниевой технологии систему сигнальных проводников, возбуждаемую активными элементами. Однако по-прежнему в силе остается тот непреложный факт, что активный элемент является основной составной частью СБИС и УБИС. Именно эта ключевая особенность выделяет кремниевую компьютерную технологию из всех других индустриальных технологий. Теснейшая и по существу неразрывная взаимосвязь между активным элементом — транзисторной структурой и технологией его изготовления является основой всех новых прогрессивных разработок СБИС и УБИС с субмикронными размерами, ориентированных на достижение предельно возможного сверхбыстродействия и степени интеграции элементно-технологической и конструктивной базы высокопроизводительных супер-ЭВМ.

Появление первых кремниевых СБИС и УБИС (логических и памяти), возросшая сложность их разработки потребовали по существу коренного пересмотра всей структуры комплексного бездефектного автоматизированного проектирования как самих СБИС и УБИС, так и устройств на их основе. Введенные в последние годы в практику разработки и производства современных и перспективных СБИС и УБИС программы физико-технологического моделирования всех основных операций производства при их умелом и эффективном использовании позволяют существенно сократить время и стоимость разработки любого нового технологического процесса.

Несмотря на то что с момента появления первой инженерной программы моделирования технологических операций БИС прошло немногим более 10 лет, эта область моделирования развивалась настолько стремительно, что уже сегодня можно говорить о поколениях программ математического моделирования технологических процессов. В первом поколении программ основное внимание уделялось моделированию имплантации, диффузии и окисления, как правило, в одномерном приближении. Остальные операции либо моделировались крайне упрощенно, либо вообще не моделировались. Возможности этих программ отражали состояние технологии БИС конца 70-х годов, для которых параметры приборов определялись в основном распределением примесей в глубь структуры, глубины залегания переходов были 1,5—0,5 мкм, толщины термически выращенных оксидов составляли 0,5—0,1 мкм, а процессы формирования поверхностных конфигураций являлись не столь критичными. Однако уже на этой стадии была наглядно показана несомненная польза от применения разработанных программ и достигнута приемлемая точность расчетов по предложенным моделям.

Стремительный прогресс в кремниевой технологии в течение последнего десятилетия инициировал дальнейшее развитие и совершенствование технологического моделирования и появление

второго поколения программ, для которых характерны следующие возможности:

моделирование процессов обработки многослойных структур (Si, поли-Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, W, Mo, Al, силициды, полициды и др.);

двумерное моделирование практически всех операций полного технологического цикла изготовления СБИС (окисления, диффузии, имплантации, эпитаксии, литографии, травления и осаждения пленок);

более точное моделирование процесса ионной имплантации; сокращение времени расчетов на ЭВМ в результате применения сложных численных методов;

широкое сервисное обслуживание, модульный принцип построения, удобный входной язык, не требующий специальной подготовки оператора, возможность использования программ на различных типах ЭВМ [172].

Все эти особенности программ второго поколения обусловлены современным состоянием технологии СБИС, которая характеризуется прежде всего предельным уменьшением всех размеров приборных структур, использованием эксимерных лазеров, рентгеновских и электронных лучей для литографии, широким применением многослойных структур, низкотемпературного отжига, а также вакуумно-плазменных методов осаждения и травления. При проведении этих процессов резко возрастает роль двумерности распределения профиля примеси, а также процессов формирования поверхностных конфигураций, которые сильно влияют на параметры и характеристики создаваемых приборов. Сложность и многогранность задач двумерного многоэтапного моделирования заставляет уделять значительное внимание вычислительным аспектам, в то время как необходимость постоянного использования программ разработчиками новых приборов требует повышения сервисных возможностей, коммуникабельности программного обеспечения (легкости общения пользователя с ЭВМ).

В начале 90-х годов можно ожидать появления программ с некоторыми признаками третьего поколения, которые будут отражать дальнейшие тенденции в развитии технологии СБИС и УБИС. Основные черты программ третьего поколения трудно предугадать, но несомненно, что кроме всего прочего они будут характеризоваться использованием неравновесных моделей для расчета распределения примесей при быстропотекающем термическом лазерном отжиге, учетом точечных дефектов как основного кинетического механизма миграции примесей, еще более сложным и точным моделированием процессов литографии, а также кинетики осаждения и травления пленок.

В зарождающихся программах третьего поколения следует ожидать построения двумерных и в дальнейшем — трехмерных



моделей технологических процессов с одновременным совершенствованием моделей кинетических механизмов, происходящих в тонких и сверхтонких слоях, увязанных со спецификой топологии реальных приборных структур.

Для успешной реализации физико-технологического моделирования необходимо наличие ряда факторов, важнейшими из которых являются:

возможность широкого использования сложной современной аналитической аппаратуры, позволяющей измерять различные структурные и электрофизические параметры используемых материалов, поскольку при моделировании технологических процессов без надежно работающей метрики принципиально невозможно создание новых, а также модификация и совершенствование существующих моделей;

возможность изготовления в реальные сроки различного рода тестовых структур и проведения технологических экспериментов и недопустимость разрыва между уровнями моделирования (или автоматизированного проектирования) элементарно-технологической базы и ее опытного, а в дальнейшем промышленного производства;

возможность работы на ЭВМ с объемом памяти 1 Мбайт и быстродействием более 10 млн операций в 1 с, поскольку задачи двух- и трехмерного технологического и особенно физико-топологического моделирования настолько сложны и трудоемки, что их решение возможно только с использованием высокопроизводительных ЭВМ. Достаточно сказать, что по оценкам специалистов требования трехмерного численного моделирования субмикронных тонкослойных сильнолегированных структур требуют ресурсов, которые сравнимы с ресурсами, необходимыми при решении задач при проектировании авиалайнеров и точного прогнозирования погоды [172].

Успешное использование методов физико-технологического моделирования возможно лишь при высокой общей культуре производства, получении воспроизводимых, стабильных характеристик транзисторных структур и всей СБИС с минимальным разбросом. Эта проблема теснейшим образом связана с задачей увеличения выхода годных СБИС и является одной из важнейших и первоочередных в современном электронном производстве.

#### 9.4. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИОННЫХ, ПЛАЗМЕННО-И ФОТОННО-СТИМУЛИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Развитие микроэлектроники сопровождается непрерывным изменением и совершенствованием как существующей технологии СБИС, так и появлением принципиально новых методов и

приемов их изготовления. Эти методы и приемы конкурируют между собой и с ранее существующими, а непрерывно ускоряющиеся темпы перемен повышают риск того, что родившаяся в лаборатории новая технология (а следовательно, и изготовленное для ее реализации оборудование) может морально устареть еще до того, как она будет внедрена в производство. Изменения в технологии, подобно цепной реакции, вызывают последовательную серию коренных изменений в конструировании оборудования. Эта специфика развития микроэлектроники придает огромную важность вопросам выбора и оптимального планирования новых прогрессивных технологических и конструкторских разработок, которые должны основываться на долгосрочной стратегии, поскольку тактика краткосрочного планирования без учета долгосрочной перспективы может привести к большим материальным потерям и к снижению общего темпа развития микроэлектроники [3].

Планируемое на начало 90-х годов производство 16 Мбит ДОЗУ ПВ заставляет целый ряд фирм, а по их заданию — университеты США, Японии и Великобритании вести интенсивный поиск принципиально новых технологических методов и приемов изготовления СБИС, причем все большее внимание уделяется использованию лазерной технологии. Характерно, что если еще сравнительно недавно лазеры в технологии ИС применялись в основном на операции отжига и подгонки компонентов ИС, то по прогнозам в ближайшие годы они будут использоваться для маркировки и очистки подложек, локальной эпитаксии, графоэпитаксии, отжига дислокаций несоответствия, отжига дефектов поликремния, геттерирования, управления профилем распределения примесей, локального легирования, локального нанесения, экспонирования и удаления фоторезиста, рекристаллизации кремния на диэлектрике, осаждения пленок металлов, силицидов, полупроводников и диэлектриков пиролизом и фотолизом, устранения дефектов ЗУ, лазерного травления микроструктур и, наконец, для реализации процессов безмасочной микролитографии.

Обработка поверхности металлов, сплавов, силицидов, полупроводников и диэлектриков с помощью широкого пучка ионов имеет большую перспективу при изготовлении СБИС с субмикронными размерами элементов. Эта технология может использоваться для:

воспроизведения с высокой точностью топологии элементов ИС при проведении операций нанесения и травления микроструктур;

модификации электрофизических свойств поверхности полупроводникового материала;

получения требуемого поверхностного сопротивления.

Одним из основных достоинств метода ионно-лучевой обра-

ботки является возможность строгого контроля и независимого изменения различных параметров процесса в ходе его проведения. Более низкое давление газов в рабочей камере по сравнению с осаждением из газовой фазы при пониженном давлении уменьшает диффузию реакционных газов и интенсивность процесса обратного осаждения распыленного материала, что обеспечивает высокую чистоту процесса. Низкая температура процессов, проводимых с помощью ионных источников, существенно расширяет возможности их использования в производстве ИС.

В настоящее время имеется большое разнообразие АИИ с широким пучком, однако наиболее перспективны АИИ, работающие при повышенной плотности ионного тока и низкой энергии ионов (200—500 эВ в общем случае и 50—200 эВ при прецизионной ионной бомбардировке с целью изменения свойств поверхности и ионном травлении), что позволяет обеспечить высокую скорость обработки в сочетании с минимальными радиационными дефектами.

Общий недостаток подавляющего большинства промышленных АИИ (с аксиальным полем или же мультипольного типа) состоит в сложности их технического обслуживания, поскольку для очистки поверхности анода и близлежащих областей требуются полная разборка и последующая юстировка всей конструкции. Поэтому предпочтение следует отдавать недавно созданным конструкциям АИИ, выполненным в виде съемных модулей. Не менее существенным недостатком АИИ является разориентация электродов в пространстве, которая увеличивается в процессе эксплуатации. Это вызывает искажение траектории движения ионного пучка и снижает максимальный допустимый ионный ток, а в конечном итоге ухудшает качество получаемых слоев. Обнаружение разориентации ионно-оптической системы обычно производят с помощью специальных диагностических тестов, и только сравнительно недавно появились новые конструкции АИИ, в которых предусмотрена автоматическая взаимная ориентация ионно-оптической системы при сборке источника, что существенно облегчает обслуживание установки. Для увеличения срока службы АИИ применяют полые катоды, подачу ВЧ-напряжения для возбуждения плазмы, а также нанесение изолирующего слоя на поверхность анода.

По мнению специалистов, несмотря на перспективность для получения тонких пленок стимулированного плазмой и лазерным излучением осаждения из паровой и газовой фаз, металлизация СВИС (в том числе ДОЗУ ПВ емкостью 4 Мбит) будет выполняться распылением, для чего прежде всего будут применять МРС. Это объясняется тем, что по сравнению с другими методами осаждения процесс распыления проводится в более чистой среде при более низкой температуре и обеспечивает бо-

лее высокую скорость осаждения. Современные конструкции МРС обеспечивают планаризацию ступенек и контактных отверстий без снижения скорости осаждения Al и его сплавов. В то же время из-за сложности процесса получения пленок Al путем осаждения из газовой фазы в промышленных масштабах еще не освоено.

Современная промышленная установка на основе МРС позволяет обрабатывать пластины диаметром до 200 мм, обеспечивает высокую скорость осаждения (1 мкм/мин) при однородности толщины слоев  $\pm 3\%$ , проста и надежна в эксплуатации, позволяет располагать пластины в вертикальном, горизонтальном или наклонном положениях, обеспечивает возможность размещения установки в чистых комнатах класса 100 или 10. На установке помимо Al и его сплавов при использовании нескольких мишеней можно осаждать запорные слои (Ti/W, TiN, Ti/WN<sub>x</sub>), контакты к кремниевым затворам (Ta, Mo, Ti, Pt, W), обеспечивать осаждение Au, Ag, Ni и других материалов. Кроме того, на установке может быть обеспечено реактивное распыление для получения нитридов, карбидов, оксидов и других диэлектрических слоев. В качестве откачных средств для реакционной камеры применяют крионасосы, а для откачки шлюзовых камер — турбомолекулярные насосы.

КПД материала мишени в случае двух близко расположенных друг от друга вращающихся катодов цилиндрической формы, снабженных водоохлаждаемыми матрицами постоянных магнитов, можно довести до 90% (вместо 25—30% для планарного МРС). Цилиндрическая конструкция МРС обеспечивает при той же мощности разряда примерно на 30% большую скорость осаждения, и при этом температура пластин, расположенных на расстоянии 50 мм от мишени, не превышает 40 °C.

В связи с тенденцией к выполнению межсоединений на основе тугоплавких металлов освоен промышленный выпуск мишеней из Mo и W с концентрацией примесей менее  $4 \cdot 10^{-4}\%$ , мишеней из Ta, Nb, Ti и Al и его сплавов с концентрацией примесей менее  $10^{-3}\%$  при плотности 95—97% и содержанием  $\alpha$ -излучателей в этих материалах менее  $10^{-7}\%$ . Подобного рода материалы пригодны для изготовления ДОЗУ с объемом памяти 1 Мбит. Однако при переходе к промышленному производству ДОЗУ с объемом памяти 4 Мбит потребуются еще более чистые материалы и еще более совершенные установки на основе МРС.

Ионные пучки в настоящее время наиболее широко используются для процессов ионно-лучевого и реактивного ионно-лучевого травления широкого круга материалов, а также для ионной имплантации. Реально просматривается также возможность применения ионных пучков для реализации процесса литогра-

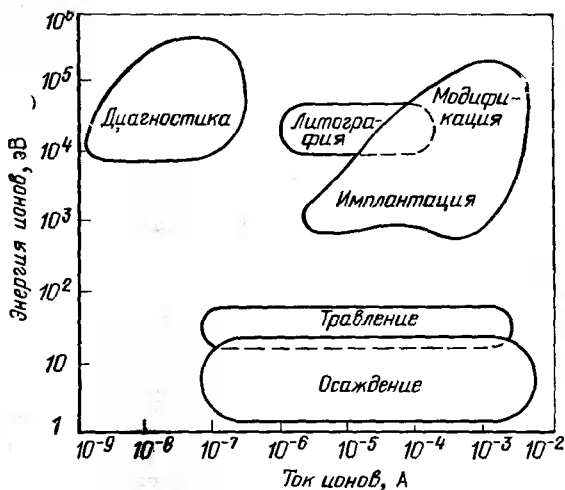


Рис. 9.1. Значения энергии ионов и ионных токов, применяемых в технологии производства СБИС

фии в производстве СБИС с субмикронными размерами элементов (рис. 9.1).

Ионно-лучевая литография имеет три основных разновидности:

- литография фокусированным ионным лучом (ФИЛЛ);
- масочная ионно-лучевая литография (МИЛЛ);
- ионно-проекционная литография (ИПЛ).

ФИЛЛ аналогична фотолитографическому процессу со сканированием электронного луча. Однако даже при высоких плотностях тока (до  $1 \text{ А/см}^2$ ) ФИЛЛ обладает низкой производительностью. Высокая плотность мощности ионного луча (для экспонирования одного элемента рисунка минимальных размеров требуется не менее 1000 ионов) исключает применение чувствительных резистов с целью увеличения скорости экспонирования. Реализация МИЛЛ для изготовления СБИС требует субмикронных масок, которые в процессе экспонирования быстро разогреваются, что вызывает неизбежный уход размеров. ИПЛ, где ионы выступают в качестве носителей информации, может быть реализована в мультиплицирующих системах при экспонировании с уменьшением. ИПЛ сочетает субмикронное разрешение с большой глубиной фокуса (более 100 мкм). Благодаря шаблонам, которые содержат информацию о конфигурации создаваемых структур, ИПЛ позволяет существенно уменьшить время экспонирования кристалла по сравнению с другими методами. Кроме того, ИПЛ позволяет получить нанометровое разрешение при использовании низкочувствительных резистов.

На основе процессов, стимулируемых ионами, электронами и фотонами, при индивидуальной обработке пластин может быть обеспечено существенное (в 2 раза и более) сокращение продолжительности технологического цикла при сохранении субмикронных размеров получаемых элементов, в том числе в некоторых случаях без защитных масок.

Процессы, использующие атомные пучки, кластеры, ионы, электроны, рентгеновское и УФ-излучение, — низкотемпературные, однородные по своей физико-химической основе, способные обеспечить локальность способа подвода энергии к обрабатываемым структурам и селективность ее активирующего воздействия. УФ-лазеры с перестраиваемой длиной волны позволяют разрывать строго определенные связи, необходимые для активации того или иного процесса; извлекаемые же из плазмы ионы, свободные атомы и радикалы оказывают непосредственное воздействие на отдельные атомы и молекулы обрабатываемой структуры. Общность физико-химического механизма этих процессов открывает широкие возможности для их последующей интеграции на основе унифицированных модулей для индивидуальной обработки пластин, что, в принципе, позволяет в перспективе решить комплексную проблему создания безлюдного гибкого автоматизированного производства СБИС с субмикронными размерами элементов.

#### 9.5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГИБКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА СБИС

Под технологическим процессом изготовления СБИС понимается последовательность операций над входной структурой, приводящих к получению требуемых функциональных (эксплуатационных) характеристик. При этом на входные (на каждую операцию свои) параметры структуры и на операционные параметры каждой обработки (операции) накладываются ограничения или допуски, которые обеспечивают получение выходных характеристик структуры, а в конечном счете, и функциональных характеристик микросхемы в требуемом диапазоне с высокой вероятностью (с высоким коэффициентом выхода годных). Естественно, что по мере повышения степени интеграции микросхем, сложности и точности их функциональных характеристик допуски на входные параметры структур и операционные параметры каждой обработки уменьшаются, т. е. ужесточаются требования к точности проведения технологических операций.

Точность измерения и поддержания операционных параметров в заданных допусках зависит от возможностей технологического оборудования, предназначенного для реализации конкретной операции. Поэтому повышению степени интеграции и сложности микросхем должно предшествовать совершенствова-

ние технологического оборудования. В системах вакуумно-плазменного распыления и травления это достигается вначале с помощью повышения точности датчиков и систем измерения и поддержания операционных параметров; затем за счет жесткой специализации оборудования, включающей выбор конструкции, геометрии и материалов покрытия реакционной камеры, типа вакуумной системы и средств контроля момента окончания процесса; и наконец, разбиением операций на несколько стадий и создание специализированных однокамерных или многокамерных полифункциональных систем, например гибкой магнетронной системы, позволяющей проводить различные процессы (например, ионное травление и осаждение пленок путем распыления конкретных материалов в любой последовательности).

Из-за постоянного стремления к снижению стоимости ИС наблюдается тенденция к увеличению диаметра кремниевых пластин. Ожидается, что многие изготовители от обработки пластин диаметром 100 мм сразу же перейдут к обработке пластин диаметром 150 мм. При этом площадь пластин увеличится в 2,25 раза при непропорциональном росте их стоимости.

Увеличение размера пластин, повышение степени интеграции микросхем, а следовательно, и стоимости пластин, с одной стороны, и необходимость повышения эффективности использования энергии, материалов, реагентов — с другой, диктуют необходимость перехода от групповой обработки пластин к индивидуальной. При этом частичное снижение производительности операций компенсируется увеличением выхода годных структур за счет повышения точности обработки и контроля.

Однако не следует забывать, что переход к индивидуальной обработке пластин требует более высоких начальных капиталовложений и расходов на эксплуатацию оборудования, которое работает в более интенсивном режиме и требует более высокой надежности на единицу продукции. Кроме того, при этом увеличивается интенсивность теплового и радиационного воздействия на обрабатываемые пластины (например, при высокоинтенсивном магнетронном методе осаждения и травления материалов).

На сегодняшний день наиболее реальная область индивидуальной обработки — группа завершающих операций многослойной металлизации и вакуумно-плазменного травления микроструктур. При индивидуальной транспортировке пластин интенсивность работы механизмов резко возрастает, а периодическая чистка транспортных каналов неизбежна. Поэтому жесткие транспортные системы между модулями с использованием вакуума, несмотря на принципиальную возможность обеспечения высокой чистоты, очень сложны, малонадежны в эксплуатации и могут стать аккумуляторами пыли. По-видимому, наиболее подходящими транспортными средствами являются сейчас робот и закрытая система с ламинарным потоком газа, сопрягаемая с

вакуумными шлюзами. Существенные трудности возникают также в унификации устройств загрузки-выгрузки и объединения в линию установок, значительно различающихся по производительности. Надежность и гибкость связи между установками приобретает в этом случае первоочередное значение.

В настоящее время достигнуты столь малые размеры элементов СБИС, что дальнейшее снижение себестоимости изделий может быть достигнуто только автоматизацией производства. Даже при изготовлении ЗУПВ емкостью 64 и 256 Кбит замена обычной производственной линии автоматической снижает производственные затраты в 4—5 раз. Что касается экономичного крупномасштабного производства ЗУПВ емкостью 1 и 4 Мбит, то оно вообще невозможно без автоматизации производственных процессов. Поэтому в последние годы четко просматривается тенденция постепенной замены полуавтоматических линий для изготовления СБИС полностью автоматизированными промышленными предприятиями на основе комплексных автоматизированных систем управления, выполняющих функции распределения, контроля, управления, сбора и интерпретации данных о производственном процессе и объединяющих все технологическое оборудование глобальной информационной сетью. Эта тенденция связана с увеличением сложности производства СБИС, уменьшением времени жизни изделий (что требует быстрого освоения выпуска новых видов изделий с минимальными затратами) и увеличением размеров пластин (что затрудняет их транспортировку с помощью уже имеющихся средств).

По мнению специалистов фирмы Intel (США), для реализации комплексной полностью автоматизированной системы управления производством СБИС необходимо объединить следующие четыре ее основных компонента.

автоматизированное оборудование кассетной обработки пластин на отдельных технологических участках (фотолитографии, нанесения пленок, плазменного травления, ионной имплантации, диффузии и т. п.);

автоматизированные средства планирования (для устранения возможных перегрузок и достижения ритмичной работы);

средства анализа результатов отдельных этапов и технологического процесса в целом для корректировки и изменения параметров или прекращения процесса в случае выявления неразрешимых проблем;

полностью автоматизированные системы переноса пластин между отдельными технологическими участками.

В связи с переходом на обработку пластин кремния диаметром 150 мм специалисты фирмы Intel (США) предложили четыре уровня степени автоматизации технологического процесса: перенос кассет; обработка (оператор загружает кассеты и устанавливает параметры технологического процесса); контроль



и выбор режимов операций (оператор загружает пластины, управляет работой, включая выбор режима ЭВМ); полный цикл обработки и контроля (включая перенос кассет и отдельных пластин, а также выбор режимов и последовательности операций). Важной частью автоматизации является исключение операции манипулирования, поскольку масса пластины велика (25 пластин диаметром 150 мм в кассете весят около 2 кг). При ручном манипулировании точность установки пластины в лодочку снижается, при этом как на лодочке, так и на самой пластине появляются сколы. При ручном и автоматизированном переносе пластин на одной и той же операции плотность вносимых дефектов равна соответственно 0,15 и 0,08 см<sup>-2</sup>. Если в технологическом процессе предусмотрено шесть этапов переноса, то плотность вносимых дефектов при автоматизированном переносе уменьшается на 0,42 см<sup>-2</sup>, в результате чего число годных кристаллов на пластине увеличивается примерно на 2%.

Реализуются два варианта автоматического переноса пластин от одного рабочего места к другому: 1) транспортер с дорожками, по которым перемещаются пластины (в кассетах или без них) в потоке фильтруемого воздуха; 2) робот, обеспечивающий подъем, передачу и опускание пластин на рабочих участках. Этот вариант предпочтительнее, поскольку позволяет свободно перемещать установки на рабочих участках.

Специалисты фирмы Toshiba (Япония) делят комплексную систему управления производством на три подсистемы:

автоматизированное оборудование для выполнения основных технологических операций, работающее в покассетном режиме обработки под управлением микроЭВМ;

локальные совместно работающие установки, выполняющие основные операции, снабженные автоматическими средствами манипулирования и переноса пластин и имеющие локальные сети данных для управления технологическим процессом и прохождением партий обрабатываемых пластин;

объединенное с помощью специальных транспортных средств автоматизированное оборудование с использованием робототехнических устройств для переноса пластин. На этом уровне одновременно предусматриваются визуальная проверка изготавливаемых изделий и создание единой информационной сети для управления технологическим процессом и производством.

Опыт фирмы Toshiba показал, что автоматизированные средства могут заменить многих операторов, но не инженеров по эксплуатации и ремонту оборудования, которые могут вносить значительные загрязнения при проведении отладочных и ремонтных работ. Поэтому оборудование комплексных автоматизированных систем должно характеризоваться высокой надежностью и малым временем обслуживания.

Несмотря на некоторое различие в подходе к архитектуре комплексной автоматизированной системы управления производством СБИС, основным фактором, сдерживающим развитие робототехнических гибких автоматизированных систем, в обоих случаях является отсутствие средств контроля и измерения, работающих в реальном масштабе времени. Поэтому целесообразно сперва научиться хорошо управлять технологическими процессами, а затем уже объединять отдельные «островки» в единую систему.

Наиболее высокая степень автоматизации достигнута на всех этапах операции фотолитографии (очистка пластин, нанесение фоторезиста, сушка, совмещение, экспонирование, задубливание, повторная сушка). Каждый модуль автоматизированного технологического участка фотолитографии оснащен отдельным контроллером, который передает информацию главной ЭВМ. Автоматизированы и оснащены контроллерами операции сухого плазменного травления и нанесения пленок путем ионного распыления материала мишени. Что касается операции диффузии, то из-за сложности манипулирования пластинами автоматизация этой операции пока полностью не завершена.

Еще сравнительно недавно считалось, что для загрузки пластин пригодны конвейеры, воздушные подушки или шаговые балки. Однако теперь пришли к выводу, что наиболее целесообразно применять микросеверные роботы, системы перемещения кассет по специальным направляющим приспособлениям в «чистых туннелях», а также автоматизированно управляемые транспортные механизмы. Наиболее перспективен принцип использования шин для управления движением транспортных средств с встроенной робототехнической рукой. Ведущим изготовителем подобного рода систем является фирма Veeco (США), выпускающая три типа транспортных средств: без робототехнической руки и с рукой, перемещающейся в четырех и семи плоскостях. Эти транспортные средства рассчитаны на работу в чистых комнатах, движутся по полосам, покрытым люминофорной краской, или по ленте, проложенной на полу; сигналы управления передаются по ИК-линиям связи.

Однако разработка только автоматизированного оборудования и средств переноса пластин недостаточна для создания комплексной полностью автоматизированной системы управления производством. Все автоматизированные «островковые» системы непрерывно генерируют огромное количество данных, и поэтому необходимы программные средства, которые могли бы выделить основные данные из этого потока информации. Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется разработке программных и аппаратных средств систем распознавания, контроля, управления, сбора и интерпретации данных, объединяющих с помощью глобальной сети связи все технологическое

и вспомогательное оборудование, необходимое для производства СБИС. Применение первой модели этой системы на 12 заводах фирмы Fairchild (США) позволило увеличить выход годных изделий на 5—7%; уменьшить производственный цикл на 23%, а количество изделий на доработку, на 30%.

С учетом долгосрочной перспективы в основу создаваемых гибких автоматизированных линий по производству СБИС кладутся следующие принципы [181, 182]:

использование на каждой операции однотипных унифицированных модулей с собственной откачной системой, снабженных различными функциональными узлами для выполнения технологической операции, которые могут быть соединены друг с другом в единый замкнутый технологический объем;

последовательная индивидуальная обработка пластин преимущественно с вертикальным расположением их в рабочих камерах с применением автоматических манипуляторов и перегрузчиков, полностью исключаящих контакт оператора с пластинами в процессе их обработки;

снижение температурного порога проведения технологических процессов в результате использования нетермических методов активации и интенсификации с обеспечением высокой локальности и селективности воздействия энергии на всех операциях обработки создаваемых структур;

сокращение общего числа технологических операций совмещением ряда рабочих операций и исключением подавляющего числа вспомогательных операций;

повышение чистоты рабочих и транспортных зон, унификация технологических сред и обеспечение их контроля;

полное устранение возможности влияния субъективных факторов на ход технологического процесса в результате использования микропроцессоров при проведении отдельных операций и централизованного управления всем ходом технологического процесса от ЭВМ;

внедрение АСУ на базе микроЭВМ для обеспечения управления процессом загрузки и выгрузки пластин, их перемещения, последовательности проведения операций, поддержания стабильных параметров процесса;

постепенная замена полуавтоматических линий полностью автоматизированными предприятиями на основе комплексных систем управления, выполняющих функции распределения, контроля, управления, сбора и интерпретации данных о производственном процессе и объединяющих все технологическое оборудование с помощью глобальной информационной сети.

Создание подобного рода полностью автоматизированных предприятий, снабженных программными и аппаратными средствами, является магистральным направлением дальнейшего развития массового производства СБИС и УБИС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Данилин Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок. М.: Энергия, 1967.
3. Данилин Б. С. Вакуумная техника в производстве интегральных схем. М.: Энергия, 1972.
4. Данилин Б. С. Получение тонкопленочных элементов микросхем. М.: Энергия, 1977.
5. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982.
6. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Ионное травление микроструктур. М.: Советское радио, 1979.
7. Киреев В. Ю., Данилин Б. С., Кузнецов В. И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. М.: Радио и связь, 1983.
8. Данилин Б. С. Вакуумные технологические процессы и оборудование микроэлектроники. М.: Машиностроение, 1987.
9. Данилин Б. С. Вакуумные методы получения тонкопленочных элементов интегральных схем (состояние и перспективы развития)// Электронная техника. Сер. 3. 1972. Вып. 3. С. 75—82.
10. Васенков А. А., Данилин Б. С. Электронные и ионные процессы в производстве интегральных схем// Электронная промышленность. 1973. Вып. 3. С. 62—65.
11. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы в производстве интегральных микросхем// Электроника (Итоги науки и техники). М.: ВИНТИ, 1987. Т. 19. С. 121—151.
12. Данилин Б. С. Элионка — технологическая база микроэлектроники// Микроэлектроника: Сб. статей/ Под ред. А. А. Васенкова. М.: Сов. радио, 1975. Вып. 8. С. 90—101.
13. Данилин Б. С., Долинский В. А. Вопросы обеспечения равномерной толщины пленок при осаждении их на большие поверхности// Зарубежная электронная техника. 1971. Вып. 7. С. 3—24.
14. Данилин Б. С., Долинский В. А., Шинкаренко Ю. Л. Получение тонкопленочных слоев равномерной толщины на подложках сложного профиля// Там же. 1973. Вып. 3. С. 20—42.
15. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Получение пленок равномерной толщины при ионном распылении// Там же. 1972. Вып. 23. С. 36—56.
16. Данилин Б. С., Логунов В. И. Высокочастотное ионное распыление// Там же. 1971. Вып. 3. С. 3—24.
17. Данилин Б. С., Матузенко В. П. Получение пленок методом ионного покрытия// Зарубежная радиоэлектроника. 1978. № 2. С. 37—55.
18. Оборудование полунепрерывного и непрерывного действия для вакуумного нанесения тонкопленочных элементов интегральных схем/ Б. С. Данилин, В. В. Однококов, В. А. Пупко, Г. П. Тюфаева// Зарубежная электронная техника. 1975. № 2. С. 35—55.
19. Данилин Б. С., Минайчев В. Е., Сырчин В. К. Магнетронные системы ионного распыления// Электронная промышленность. 1976. Вып. 5. С. 42—46.
20. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы// Приборы и техника эксперимента. 1978. № 4. С. 7—18.

21. Данилин Б. С. Магнетронные распылительные системы// Зарубежная радиоэлектроника. 1978. № 4. С. 87—105.
22. Данилин Б. С. Магнетронное распыление — универсальный метод получения тонкопленочных структур// Электронная техника. Сер. 6. 1983. Вып. 6 (179). С. 65—73.
23. Данилин Б. С. Нанесение тонких пленок в производстве интегральных микросхем (современное состояние и перспектива)// Электроника (Итоги науки и техники). М.: ВИНТИ, 1984. Т. 16. С. 145—179.
24. Waits R. Planar magnetron sputtering// J. Vacuum Sci. Technol. 1978. Vol. 15, N 2. P. 179—187.
25. Прицкевич Р. Н., Обухов В. Е., Тоцицкий Э. И. Ионно-кластерный и автоэмиссионный методы получения пленок// Зарубежная электронная техника. 1982. Вып. 8. С. 3—26.
26. Васильев В. Ю., Сухов М. С. Аппаратура и методика осаждения слоев при пониженном давлении// Обзоры по электронной технике. Сер. 7. 1985. Ч. I. Вып. 3 (1087). С. 46; Ч. II. Вып. 4 (1088). С. 52.
27. Electron-cyclotron-resonans microwave plasma system for thin-film deposition/ S. R. Meija, R. D. McLeod, K. C. Kao, H. C. Card// Rev. Sci. Instrum. 1986. Vol. 57, N 3. P. 493—497.
28. Данилин Б. С. Применение лазеров в технологии интегральных микросхем// Электроника (Итоги науки и техники). М.: ВИНТИ, 1988. Т. 20. С. 128—164.
29. Данилин Б. С. Вакуумно-технические проблемы изготовления сверхбольших интегральных схем// Там же. М.: ВИНТИ, 1986. Т. 18. С. 133—183.
30. Overview of semiconductor industry// Semicond. Intern. 1986. Vol. 9, N 1. P. 84.
31. Denshi gijutsy. 1986. Vol. 28, N 9. P. 17—28.
32. Fab and foundry in year 2000// Solid State Technol. 1986. Vol. 29, N 81. P. 82.
33. Hatchenson Don G. Equipment chages seen for the factory of the future// Semicond. Intern. 1986. Vol. 9, N 1. P. 45—49.
34. Rosser P., Tomkins G. Silicides for VLSI interconnects// Vacuum. 1985. Vol. 35, N 10/11. P. 419—434.
35. Pauleau Y. Interconnected materials for VLSI circuits. Part I. Materials for gate electrodes. Part II. Metal to Silicon contact// Solid State Technol. 1987. Vol. 30, N 2. P. 61—67; N. 4. P. 155—162.
36. Файзулаев Б. Н. Функциональное быстроедействие интегральных схем// Микроэлектроника. 1988. Т. 17, № 2. С. 83—87.
37. Kirschman K. K. Cold electronics: an overview// Cryogenics. 1985. Vol. 25, N 3. P. 115—122.
38. Kwon O. K., Langley B. W., Pease R. F. Superconductors as very high speed system level interconnects// IEEE electron device letters. 1987. Vol. EDL-8, N 12. P. 582—585.
39. Получение пленок хрома методом ионно-плазменного распыления при производстве фотошаблонов/ Г. И. Сапегин, И. Н. Рубцов, А. А. Серюгин, И. С. Мартынов// Электронная техника. Сер. 2. 1981. Вып. 5 (148). С. 60—64.
40. Schiller S., Heising V., Goedicke. Ion Deposition techniques for industrial applications// Proc. 7th Intern. Vacuum Congress. Vienna. 1977. P. 1545—1552.
41. Зигмунд П. Распыление ионной бомбардировкой, общие теоретические представления// Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Сб. статей/ Под ред. Р. Бериша: Пер. с англ./ Под ред. В. А. Молчанова. Вып. 1. Физическое распыление одноэлементных твердых тел. М.: Мир, 1984; Вып. 2. Распыление сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности. М.: Мир, 1986.
42. Габович М. Д., Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1986.

43. Василюс И. П., Праниявичус Л. И. Активирующее действие ионного облучения на процесс распыления твердых тел// Поверхность. 1986. № 6. С. 149—154.
44. Юдин В. В. Коэффициент распыления изотропных мишеней// Электронная техника. Сер. 2. 1984. Вып. 6 (172). С. 3—16.
45. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Неволин В. К. Выбор оптимального давления рабочего газа и межэлектродного расстояния в диодных системах ионного распыления и травления// Там же. Сер. 3. 1976. Вып. 2. С. 37—42.
46. Плешивцев Н. В. Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968.
47. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Получение максимальной площади с заданной равномерностью пленок в системах с автономными ионными источниками// Электронная техника. Сер. 3. 1973. Вып. 1. С. 89—94.
48. Thornton J., Lamb J. Substrate heating rates for planar and cylindrical post magnetron sputtering sources// Thin Solid Films. 1984. Vol. 119, N 1. P. 87—95.
49. Somenfi R. The thermalization of energetic atoms during the sputtering process// J. Vacuum Sci. Technol. 1984. Vol. A2, N 6. P. 1284—1291.
50. Данилин Б. С., Махов В. И., Тябликов А. В. Интегральные структуры на тугоплавких сверхпроводниках// Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 29. С. 196—236.
51. Maniv S., Westwood W. Effect of H<sub>2</sub> on argon discharge for planar magnetron sputtering// J. Vacuum Sci. Technol. 1980. Vol. 17, N 1. P. 403—406.
52. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Сырчин В. К. Энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов и систем для его реализации// Физика и химия обработки материалов. 1979. № 2. С. 52—56.
53. Данилин Б. С., Логунов В. И., Качурин Ю. Е. Использование измерителей ВЧ-мощности, применяемых в технике коротковолновой связи, для контроля процесса ВЧ-ионного травления// Электронная техника. Сер. 3. 1973. Вып. 2. С. 82—84.
54. Данилин Б. С., Сырчин В. К., Неволин В. К. Исследование разряда в магнетронных системах ионного распыления// Там же. Сер. 3. 1977. Вып. 3. С. 37—44.
55. Данилин Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование магнетронной системы ионного распыления материалов// Физика и химия обработки материалов. 1978. Вып. 2. С. 33—39.
56. Westwood W., Maniv S., Scanlon P. The current-voltage characteristics of magnetron sputtering system// J. Appl. Phys. 1983. Vol. 59, N 12. P. 6841—6848.
57. Корчагина М. Н., Савенков Н. В., Корчагин Б. В. Математическое моделирование рабочих характеристик магнетронных систем ионного распыления// Электронная техника. Сер. 1. 1986. Вып. 1 (385). С. 62—63.
58. Swann S. Spatial distribution of sputtered atoms from magnetron source// Vacuum Sci. Technol. 1987. Vol. A5, N 4. P. 1750—1754.
59. Современные магнетронные распылительные устройства/ В. А. Лабуннов, Н. И. Данилович, А. С. Уксусов, В. Е. Минайчев// Зарубежная электронная техника. 1982. Вып. 10. С. 3—62.
60. Planar magnetron sputtering cathode with deposition rate distribution controllability/ K. Abe, T. Kabagashi, T. Kamel e. a.// Thin Solid Films. 1982. Vol. 96, N 2. P. 225—233.
61. Electronics. 1987. Vol. 60. N 1. P. 72; EDN. 1986. Vol. 31, N 18. P. 11; Technol. Japan. 1986. Vol. 19, N 8. P. 81; IEEE Trans. on Magnetics. 1986. Vol. MAG-22, N 6. P. 1849.
62. Лихтман А. Е., Сейдман Л. А. Распылительные магнетронные источники для действующего вакуумно-напылительного оборудования// Электронная промышленность. 1980. Вып. 5(89). С. 55—56.
63. Принципы построения источников питания распылительных систем на основе параметрических источников тока/ И. В. Волков, В. Н. Губаревич, В. П. Кабан и др.// Тезисы докладов 4-й Научно-технической конференции

«Вакуумные покрытия—87», Рига. ЛатНИИТИ, 8—10 октября, 1987. Ч. 1. С. 88—92.

64. **Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы/** Б. С. Данилин, М. В. Какурин, В. Е. Минайчев, В. В. Одинокоев, В. К. Сырчин// *Электронная техника*. Сер. 3. 1978. Вып. 2(74). С. 84—87.

65. **Магнетронное распыление магнитных материалов/** В. Е. Минайчев, В. В. Одинокоев, Д. Д. Сливаков, Г. П. Тюфаева// *Обзоры по электронной технике*. Сер. 7. М.: ЦНИИ «Электроника», 1985. Вып. 14 (1138).

66. **Hughes G., Ridge C. New sputtering techniques for semiconductor metallization//** *Vacuum*. 1984. Vol. 34, N 3—4. P. 365—369.

67. **Шнек В. М., Решетников А. М. Влияние параметров ВЧ-магнетронного распыления на пористость и электрофизические свойства диэлектрических пленок на основе многокомпонентного стекла//** *Электронная техника*. Сер. 1. 1985. Вып. 12 (384). С. 51—54.

68. **Оптимизация параметров напылительной установки с планетарным вращением подложек/** А. С. Валеев, Б. С. Данилин, В. А. Долинский, Ю. Л. Шинкаренко// *Там же*. Сер. 3. 1973. Вып. 2(42). С. 67—75.

69. **Данилин Б. С., Долинский В. А., Шинкаренко Ю. Л. Получение тонкопленочных слоев равномерной толщины на подложках сложного профиля//** *Там же*. 1973. Вып. 6(46). С. 94—101.

70. **Расчет равномерности осаждения конденсата на подложках сложного профиля в планетарных системах с плоскими и сферическими подложкодержателями/** А. С. Валеев, Б. С. Данилин, В. А. Долинский, В. К. Сырчин// *Там же*. 1974. Вып. 7(47). С. 101—107.

71. **Критерии оценки внутрикамерных устройств высоковакуумных установок для осаждения тонких пленок на рельефные подложки/** А. С. Валеев, А. А. Ванди, Б. С. Данилин и др.// *Там же*. 1974. Вып. 6. С. 96—99.

72. **Исследование структуры и равномерности осаждения алюминиевых пленок на рельефные подложки в планетарных системах/** Ч. В. Волк, М. А. Гузовская, Б. С. Данилин и др.// *Там же*. 1977. Вып. 3. С. 102—107.

73. **Нанесение алюминиевых пленок на рельефные подложки в магнетронной системе распыления/** Б. С. Данилин, В. Е. Минайчев, В. В. Одинокоев, В. К. Сырчин// *Там же*. 1976. Вып. 5 (65). С. 127—128.

74. **Экспериментальное исследование пленок алюминия, осажденных в магнетронной системе ионного распыления/** А. Ф. Андрушко, Б. С. Данилин, В. Е. Минайчев, В. П. Мотузенко, В. К. Сырчин// *Там же*. 1978. Вып. 3 (75). С. 93—96.

75. **Некоторые технологические особенности создания металлизации на рельефных подложках/** Б. С. Данилин, В. Ф. Заболотнов, В. Ш. Иванов, В. П. Мотузенко, А. Б. Невский// *Там же*. 1980. Вып. 3 (87). С. 73—76.

76. **Данилин Б. С., Сырчин В. К., Тимофеев П. А. Исследование равномерности нанесения тонкопленочных слоев в магнетронных системах ионного распыления материалов//** *Там же*. 1978. Вып. 1 (73). С. 26—32.

77. **Данилин Б. С., Сырчин В. К., Тимофеев П. А. Исследование равномерности нанесения тонкопленочных слоев в магнетронных системах ионного распыления материалов//** *Физика и химия обработки материалов*. 1979. № 3. С. 108—112.

78. **Hieronimi R., Sirovich V., Class W. Analysis of substrate heat fluxes encountered during aluminum magnetron sputter deposition//** *Thin Solid Films*. 1982. Vol. 96, N 2. P. 241—247.

79. **Сейдман Л. А. Снижение температуры подложек при магнетронном распылении//** *Электронная техника*. Сер. 2. 1981. Вып. 5(48). С. 75—76.

80. **Минайчев В. Е., Одинокоев В. В., Какурин М. В. О нагреве подложек в планарных магнетронных распылительных системах//** *Там же*. Сер. 3. 1980. Вып. 6 (90). С. 79—81.

81. **Turner F., Harra D. Advances in cassette-to-cassette sputter coating systems//** *Solid State Technol.* 1983. Vol. 26, N 7. P. 115—123.

82. Noroki T., Hairukawa Y. Step coverage of Al films prepared by DC magnetron sputtering using the dual-structure target// J. Vacuum Society of Japan. 1985. Vol. 28, N 5. P. 421—423.

83. Hafa T., Ohsabo K., Hada T. e. a. Characteristics of compressed magnetic field (CMF) magnetron sputtering using magnetic targets// Electronic and Commun. in Japan. 1986. Vol. 69, N 8. P. 103—112.

84. Affinito J., Parsons R. Mechanisms of voltage controlled reactive planar magnetron sputtering of Al in Ar/N<sub>2</sub> and Ar/O atmospheres// J. Vacuum Sci. Technol. 1984. Vol. A2, N 3. P. 1275—1284.

85. Сейдман Л. А. Получение пленок нитрида кремния реактивным распылением на постоянном токе// Электронная промышленность. 1984. Вып. 4 (132). С. 15—20.

86. Сейдман Л. А. Механизм роста пленок нитрида кремния при реактивном магнетронном распылении// Электронная техника. Сер. 2. 1985. Вып. 5 (178). С. 44—47.

87. Сейдман Л. А. Получение пленок нитрида титана реактивным магнетронным распылением// Там же. 1985. Вып. 2 (175). С. 69—75.

88. Features of an in-situ measurements on adsorbing TiO<sub>2</sub> films produced by reactive d—c magnetron-plasmatron sputtering/ S. Schiller, G. Beister, S. Schneider, W. Sieber// Thin Solid Films. 1980. Vol. 72, N 6. P. 475—483.

89. Врублевский Э. М., Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Измерение датчиками на основе термосопротивлений расхода газов, использующихся в процессах вакуумного плазменного травления// Электронная техника. Сер. 3. 1983. Вып. 2 (104). С. 106—107.

90. Кузнецов В. И., Немилов Н. Ф., Шемякин В. Е. Эксплуатация вакуумного оборудования. М.: Энергия, 1978.

91. Сейдман Л. А., Смирнова Н. А. Контроль газовых условий в вакуумных установках// Электронная техника. Сер. 2. 1985. Вып. 2 (175). С. 108—110.

92. Данилин Б. С., Логунов В. И. Согласование генератора с системой высокочастотного ионного распыления// Там же. Сер. 3. 1971. Вып. 2 (34). С. 121—125.

93. Логунов В. И., Зарянкин Н. М. Распределение потенциала между элементами системы ВЧ-ионного распыления// Зарубежная электронная техника. 1974. Вып. 4 (70). С. 38—50.

94. Данилин Б. С., Логунов В. И. О стабилизации процесса высокочастотного распыления// Электронная техника. Сер. 3. 1973. Вып. 3. С. 84—85.

95. Данилин Б. С., Логунов В. И. Расчет необходимой стабильности магнитного поля и давления рабочего газа в дуговой системе высокочастотного ионного распыления// Там же. Сер. 3. 1972. Вып. 2. С. 26—30.

96. Данилин Б. С., Зарянкин Н. М., Логунов В. И. Исследование параметров и характеристик ВЧ-цилиндрической разрядной системы магнетронного типа// Там же. 1981. Вып. 4 (94). С. 58—65.

97. Зарянкин Н. М., Логунов В. И. Исследование некоторых особенностей цилиндрических высокочастотных магнетронных систем// Там же. 1980. Вып. 4 (88). С. 33—38.

98. Matsuoko M., Hoshi Y., Naoe M. RF and DC discharge characteristics for opposed — targets sputtering// J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60, N 6. P. 2096—2102.

99. Hazuki J., Moriya T. A damage-free perfect planarisation method using bias-sputtered SiO<sub>2</sub>// IEEE Trans. on Electron. Devices. 1987. Vol. ED-34, N 3. P. 628—632.

100. Сравнительный анализ методов получения пленок нитрида ниобия/ А. Т. Григорьев, Б. С. Данилин, В. И. Махов и др.// Электронная техника. Сер. 6. 1982. Вып. 10 (171). С. 14—16.

101. Осаждение пьезоэлектрических пленок оксида цинка в магнетронной системе ионного распыления/ Б. С. Данилин, Б. Ф. Мочалов, Н. Н. Стрельцова и др.// Там же. Сер. 3. 1980. Вып. 3 (87). С. 62—65.



102. **Взаимосвязь** электрофизических свойств пленок с их составом/ Б. С. Данилини, Е. Н. Лубини, Б. Ф. Мочалов и др.// Там же. 1980. Вып. 5(89). С. 78—81.
103. **Одинокое В. В.** Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании. М.: Высшая школа, 1981.
104. **Hirobe K., Azuma H.** Redation of radiation damage on silicon substate in magnetron reactive ion etching// J. Electrochem. Soc. 1986. Vol. 132, N 4. P. 939—942.
105. **Nauro O., Yosuhio H.** Reactive etching of SiO<sub>2</sub> and poly-Si employing C<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, SiF<sub>4</sub> and BF<sub>3</sub> gases// Jap. J. Appl. Phys. 1982. Part 1, N 5. P. 696—701.
106. **Lin I., Hinson D. C., Class W. H.** Low-energy high flux reactive ion etching by rf magnetron plasma// Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 44, N 2. P. 85—187.
107. **Lory E. R.** Magnetic field enhanced reactive ion etching// Solid State Technol. 1984. Vol. 27, N 11. P. 117—121.
108. **Okano H., Horiike Y., Yamazaki T.** Etching characteristics of n<sup>+</sup> poly Si and Al employing a magnetron plasma// Japan. J. Appl. Phys. 1984. Vol. 23, N 5. P. 482—486.
109. **Controlini R. J., D'Asaro L. A.** High rate masked etching of GaAs by magnetron ion etching// J. Vacuum Sci. Technol. 1986. Vol. B4, N 5. P. 706—713.
110. **Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Назаров Д. А.** Реактивное ионное травление. Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ «Электроника», 1984. Сер.3. Вып. 1 (1010).
111. **Морозов А. И.** Плазменные ускорители: Сб. статей/ Под ред. Л. А. Арцимовича, С. Д. Гришина, Г. Л. Грозовского и др. М.: Машиностроение, 1973. С. 5—15; **Гришин С. Д., Ерофеев В. С., Жаринов А. В.** Ускорители с замкнутым холловским дрейфом// Там же. С. 54—60.
112. **Плазменные ускорители типа УЗДП с плоским пучком ионов/ Е. Е. Беркалов, А. Н. Веселовзоров, Г. Н. Илюхина, И. Б. Покровский// Тр. V Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям и ионным индекторам: Тезисы докладов. М.: Наука, 1982. С. 53—54.**
113. **Лабунов В. А., Данилович Н. И., Громов В. В.** Многопучковые ионные источники для систем ионного травления// Зарубежная электронная техника. 1982. Вып. 5(251). С. 82—120.
114. **Лабунов В. А., Рейссе Г.** Ионно-лучевые источники для обработки поверхности твердых тел и получения тонких пленок// Там же. Вып. 1 (247). С. 3—42.
115. **Rovel P. J., Evans A. C.** Ion beam etching using saddle field sources// Thin Solid Films. 1981. Vol. 86, N 2. P. 117—123.
116. **Ким В., Киреев В. Ю., Назаров Д. А.** Ионно-лучевое и реактивное ионно-лучевое травление материалов ионами низких энергий// Электронная техника. Сер. 3. 1983. Вып. 3 (105). С. 69—73.
117. **Особенности работы ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения на активных газах/ Б. А. Беспалов, В. В. Егоров, В. Ким и др.// Там же. 1984. Вып. 5(111). С. 59—66.**
118. **Исследование поверхности кремния после ионно-химического травления/ Е. А. Алейников, Р. В. Резвый, М. С. Синарев// Там же. Сер. 2. 1981. Вып. 8 (151). С. 61—65.**
119. **Ионно-химическое травление: количественный состав и кристаллическая структура поверхностных слоев полупроводников/ Ю. А. Матвеев, М. Л. Мкртичян, Т. Н. Тригубович, С. М. Щербина// Там же. 1982. Вып. 5 (156). С. 59—65.**
120. **Majevic V. I.** Hollow cathode magnetron discharge// Phys. Lett. 1982. Vol. A92, N 9. P. 39—40.
121. **Lin I., Ming-Shing Wu.** Hollow oval magnetron for large — area low — energy ions// J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60, N 6. P. 1949—1951.

122. Hara T., Hamagaki M., Sanda A. New high current low energy ion Source// Japan. J. Appl. Phys. 1986. Vol. 25, N 3. P. 1253—1255.
123. Данилин А. Б., Киреев В. Ю., Ястребов В. Г. Оптимизация параметров системы планетарного вращения подложек при травлении их трубчатим потоком ионов// Электронная техника. Сер. 3. 1980. Вып. 6 (90). С. 87—93.
124. Harper J. M. Ion beam techniques in thin film deposition// Solid State Technol. 1987. Vol. 30, N 4. P. 129—134.
125. Greene J. E. Low energy ion bombardment during film deposition from the vapor phase: effects on microstructure and microchemistry// Ibid. 1987. Vol. 30, N 4. P. 115—122.
126. Саенко В. А. Устройства термоионного осаждения// Приборы и техника эксперимента. 1985. № 5. С. 9—21.
127. Minowa Y., Yamanishi K., Tsukamoto K. SiO<sub>2</sub> films deposited on Si by an ionized cluster beam// J. Vacuum Sci. Technol. 1983. Vol. B1, N 4. P. 1148—1151.
128. Yamada I., Nagai I., Hozie M. Preparation of doped amorphous silicon films by ionized cluster beam deposition// J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54, N 3. P. 1583—1587.
129. Yamada I., Takagi T. Metallization by ionized-cluster beam deposition// IEEE Trans. on electron devices. 1987. Vol. ED-34, N 5. P. 1018—1025.
130. Yamada I., Takagi T. Current status of ionized-cluster beam technique: a low energy ion beam deposition// Nucl. Instrum. and Method Phys. Res. 1987. Vol. B21, N 2—4. P. 120—123.
131. Leahy M., Kaganowicz G. Magnetically entranced plasma deposition and etching// Solid State Technol. 1987. Vol. 30, N 4. P. 99—104.
132. Coburn J. W. Pattern transfer// Ibid. 1986. Vol. 29, N 4. P. 117—122.
133. Toshiro O., Chaihara T., Seitaro M. Electron ciclotron resonance plasma deposition technique using raw material supply by sputtering// Japan. J. Appl. Phys. 1984. Vol. 23, N 8. P. 534—536.
134. Roppel T., Reinhard D., Asmussen I. Low temperature oxidation of silicon using a microwave plasma disk source// J. Vacuum Sci. Technol. 1986. Vol. 4, N 1. P. 295—298.
135. Fu C., Mikkelsen J., Schiff J. Microwave plasma oxidation silicon// J. Electronic Materials. 1985. Vol. 14, N 6. P. 685—705.
136. Catherine Y. Plasma chemical vapour deposition processes// Proc. of the III Intern. Plasma Chemistry Conf. 1979.
137. Donahue T. J., Reif R. PECVD of silicon epitaxial layers// Semiconductor International. 1985. Vol. 9, N 8. P. 142—146.
138. Kato I., Wakane S., Hara S. Microwave plasma CVD system to fabricate  $\alpha$ -Si thin films out of plasma// Japan. J. Appl. Phys. 1983. Vol. 22. P. L40—L42.
139. Голиков Ю. А., Смирнова Т. П., Соловьев А. П. Плазмохимические методы синтеза диэлектрических слоев в полупроводниковой технологии// Обзор по электронной технике. Сер. 3. М.: ЦНИИ «Электроника», 1986. Вып. 5 (1233).
140. Greiner J. A five year wafer fabrication equipment forecast: restrained optimism prevails// Solid State Technol. 1987. Vol. 30, N 8. P. 34—37.
141. Salzer J. M., Rorecast 87: wafer fabrication trends// Semiconductor International. 1987. Vol. 10, N 1. P. 44—47.
142. Rossi R. C., Schugraf K. K. Photochemical CVD for VLSI fabrication// SPIE. Laser assisted deposition, etching and doping. 1984. Vol. 459. P. 90—93.
143. Басов Ю. Г., Ермаков Н. И., Пашков А. С. Серийные эксимерные лазеры// Зарубежная электронная техника. 1985. Вып. 5 (288). С. 45—66.
144. Znotins T. A. Excimer lasers: an emerging technology in semiconductor processing// Solid State Technol. 1986. Vol. 29, N 9. P. 99—104.
145. West G. A., Beeson R. W., Gupta A. Laser-induced chemical vapour deposition of titanium silicide films// J. Vacuum Sci. Technol. 1985. Vol. A3, N 6. P. 2278—2282.

146. Inove T., Kanagai M., Takahashi K. Photo-chemical vapour deposition of undoped and n-type amorphous silicon films produced from silane// *Appl. Phys. Lett.* 1983. Vol. 43, N 8. P. 774—776.

147. Берегов М. Е., Кислов Н. А. Корректировка топологии фотошаблона методом локального лазерно-химического осаждения// *Электронная промышленность.* 1987. Вып. 4 (162). С. 26—27.

148. Готра З. П., Лукьянов С. А., Смеркло Л. М. Лазерно-стимулированное травление в технологии ИС// *Зарубежная электронная техника.* 1986. Вып. 6 (301). С. 3—55.

149. Radiation damage evolution in excimer laser beam irradiation and reactive ion etching/ M. Sekine, H. Okano, K. Yamabe, H. Hayasaka, Y. Horiike// *Japan. J. Appl. Phys.* 1986. Vol. 25, N 7. P. 1111—1114.

150. Laser-induced growth for high resolution// *Semicond. Intern.* 1987. Vol. 10, N 1. N. 17.

151. Etchings chips with lasers// *High Technology.* 1986. Vol. 6, N 5. P. 67—68.

152. McMenamin J. Laser technology in photolithography// *Solid State Technol.* 1987. Vol. 30, N 8. P. 59—61.

153. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. О рациональном использовании откачных средств для высоковакуумных установок осаждения тонких пленок// *Электронная техника.* Сер. 3. 1973. Вып. 2. С. 76—80.

154. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. О рациональном использовании откачных средств для установок ионного распыления и травления материалов// *Там же.* 1973. Вып. 3. С. 90—97.

155. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Вакуумно-технологические проблемы ионно-ионно-химического и плазмохимического травления микроструктур// *Обзоры по электронной технике.* Сер. 3. М.: ЦНИИ «Электроника», 1984. Вып. 5 (1050).

156. Вакуумные системы откачки агрессивных газов в технологии микроэлектроники/ В. А. Лабунев, Г. И. Мельянец, В. И. Грайко, С. С. Сухорук// *Зарубежная электронная техника.* 1987. № 6 (313). С. 3—54.

157. Sarkazy R., Gatti H. Semiconductor vacuum processing: protection of mechanical pumping system// *Solid State Technol.* 1986. Vol. 29, N 9. P. 143—149.

158. Вакуумная техника: Справочник/ Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова и др./ Под ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1985.

159. Цейтлин А. Б. Современное состояние и перспективы развития вакуумной техники. Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1986.

160. Балакин Н. С., Минайчев В. Е. Безмасляная криооткачивающая система для установки магнетронного распыления// *Электронная промышленность.* 1983. Вып. 5. С. 50—52.

161. Wycliffe H. Mechanical high-vacuum pumps with an oil-free swept volume// *J. Vacuum Sci. Technol.* 1987. Vol. A5, N 4. P. 2608—2611.

162. Cole M. A new type of vacuum pump for corrosive gases and vapours// *Ibid.* P. 2620—2623.

163. Берлин Г. С. *Механотроны.* М.: Радио и связь, 1984.

164. Григорьев А. М. Вакуумметрические приборы для современных вакуумных технологических процессов// *Электронная промышленность.* 1984. Вып. 7 (135). С. 7—13.

165. Цейтлин А. Б. Современное состояние и перспективы развития техники вакууметрии и течеискания. Обзорная информация. Сер. ХМ-6. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1987.

166. Sullivan J., Jacobs R. Flow measurement and control in vacuum systems for microelectronic processing// *Solid State Technol.* 1986. Vol. 29, N 10. P. 113—118.

167. ASM electronic mass flow meters and controllers. Catalog company Advanced Semiconductor materials International (USA).
168. Robertson S. A 16 Megabit memory chip from Japan// Science. 1987. Vol. 235, N 4794. P. 1324—1325.
169. 3-dimensional LSI formation technology// Techno Japan. 1986. Vol. 19, N 12. P. 44—45.
170. Holton W. C., Cavin R. K. A perspective on CMOS Technology trends// Proc. IEEE. 1986. Vol. 47, N 12. P. 1646—1668.
171. Brown D. M., Ghezzi M., Pimbley J. M. Trends in advanced process technology — submicrometer CMOS device design and process requirements// Ibid. P. 1679—1702.
172. Бубеников А. Н., Садовников А. Д. Физико-техническое моделирование субмикронных элементов кремниевых ССБИС// Зарубежная радиозлектроника. 1987. Ч. I, вып. 3. С. 3—21; Ч. II, вып. 4. С. 3—28.
173. Berg S., Blom O., Larsson T., Nender C. Modeling of reactive sputtering of compound materials// J. Vacuum Sci. Technol. 1987. Vol. A5, N 2. P. 202—207.
174. Parker R., Fuhs C. An advanced control system for semiconductor processing equipment// Ibid. 1986. Vol. B4, N 6. P. 1364—1368.
175. Требования к анализу и контролю технологических сред при производстве ИЭТ/ Ю. М. Абраменко, В. С. Банников, С. М. Безручко и др.// Электронная промышленность. 1986. Вып. 7 (155). С. 35—41.
176. Дьяков Ю. Н., Лукичев А. В., Тимофеев Б. С. Современные требования к технологическим средам и химикатам, используемым для микроэлектроники// Там же. 1986. Вып. 7(155). С. 3—10.
177. McConnelee P. A., Poirier S. J., Honselka R. Water Quality improvements and VLSI defect density// Semicond. Intern. 1986. Vol. 9, N 8. P. 82—85.
178. New matheson ULSI purity gases// Solid State Technol. 1987. Vol. 30, N 2. P. 25—26.
179. Oikawa H., Amazawa T. Highly reliable Mo gate and interconnection technology// Proc. 3rd Intern. Sympos. on VLSI Science and Technol. 1985. P. 131—145.
180. Hammes D. C. Microcontamination reduction in PE CVD Systems. Part 1// Semicond. Intern. 1987. Vol. 10, N 6. P. 90—97.
181. Dutton R. W., Pinto M. R. The use of computer aids in IC technology evolution// Proc. of the IEEE. 1986. Vol. 74, N 12. P. 1775—1793.
182. Lang D., Denning P. CAM system requirements for ASIC Manufacturing// Solid State Technol. 1986. Vol. 29, N 5. P. 157—161.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Наиболее часто используемые сокращения . . . . .	6
<b>Глава 1. Тонкие пленки в производстве СБИС . . . . .</b>	<b>7</b>
1.1. Роль тонкопленочной технологии в производстве СБИС . . . . .	7
1.2. Материалы для формирования затворов и межсоединений СБИС . . . . .	12
1.3. Пути решения проблемы межсоединений . . . . .	15
1.4. Материалы для формирования изоляции СБИС . . . . .	29
1.5. Материалы для изготовления фотошаблонов . . . . .	31
1.6. Термовакuumный метод осаждения пленок . . . . .	32
1.7. Ионно-плазменный метод осаждения пленок . . . . .	34
1.8. Возбуждаемое плазмой и лазерным излучением осаждение пленок из паровой и газовой фаз при понижении давления . . . . .	37
<b>Глава 2. Основные факторы, определяющие процессы ионного распыления . . . . .</b>	<b>39</b>
2.1. Распыление мишени . . . . .	39
2.2. Перенос распыленного материала от мишени к поверхности конденсации . . . . .	48
2.3. Формирование пленки на приемной поверхности . . . . .	52
2.4. Энергетическая эффективность процессов ионного распыления материалов . . . . .	59
<b>Глава 3. Осаждение пленок металлов и сплавов в магнетронных распылительных системах . . . . .</b>	<b>63</b>
3.1. Механизм разряда, параметры и характеристики МРС . . . . .	63
3.2. Конструкции катодных узлов . . . . .	70
3.3. Магнитные системы . . . . .	76
3.4. Системы электропитания . . . . .	81
3.5. Повышение эффективности использования материала мишени . . . . .	85
3.6. Распыление из жидкой фазы . . . . .	89
3.7. Системы распыления магнитных материалов . . . . .	92
3.8. Влияние параметров осаждения на свойства пленок . . . . .	97
3.9. Повышение равномерности нанесения пленок . . . . .	105
3.10. Спичжение потока высокоэнергетических электронов . . . . .	111
3.11. Компоновка установок для металлизации интегральных схем . . . . .	114
<b>Глава 4. Осаждение пленок диэлектриков в магнетронных распылительных системах и размерное травление микроструктур . . . . .</b>	<b>121</b>
4.1. Механизм разряда в химически активной среде, параметры и характеристики разряда . . . . .	121
4.2. Поддержание требуемого состава рабочего газа . . . . .	125
4.3. Измерение газового потока и давления при реактивном распылении . . . . .	127

4.4. Использование токов высокой частоты . . . . .	129
4.5. Согласование и стабилизация ВЧ-мощности . . . . .	139
4.6. Применение реактивного распыления . . . . .	140
4.7. Автоматизация процессов осаждения пленок с помощью MPC . . . . .	143
4.8. Магнетронные системы для размерного травления микроструктур . . . . .	144
4.9. Современное состояние и тенденции развития магнетронных распылительных систем . . . . .	150
<b>Глава 5. Осаждение и травление пленок с помощью автономных ионных источников . . . . .</b>	<b>156</b>
5.1. Механизм ионно-лучевого распыления, виды и конструкции автономных ионных источников . . . . .	156
5.2. Многолучевые ионные источники . . . . .	159
5.3. Ионные источники на основе плазменных ускорителей . . . . .	175
5.4. Применение автономных ионных источников . . . . .	180
<b>Глава 6. Осаждение пленок термоионным, ионно-кластерным и электронно-циклотронным методами . . . . .</b>	<b>182</b>
6.1. Термоионное осаждение пленок . . . . .	182
6.2. Термоионные устройства . . . . .	183
6.3. Лазерные устройства . . . . .	192
6.4. Свойства и области применения термоионных конденсатов . . . . .	194
6.5. Ионно-кластерное осаждение пленок . . . . .	195
6.6. Осаждение и травление пленок с помощью плазмы, создаваемой электронно-циклотронным резонансом . . . . .	200
<b>Глава 7. Осаждение пленок из газовой фазы при пониженном давлении с плазменной и фотонной стимуляцией процесса . . . . .</b>	<b>205</b>
7.1. Требования к многослойным контактно-металлизационным системам и возможные пути их реализации . . . . .	205
7.2. Сопоставление параметров процесса и свойств пленок, осаждаемых из газовой фазы различными методами . . . . .	207
7.3. Типичные конструкции реакторов и установок . . . . .	210
7.4. Типичные реакции и основные газы, используемые при осаждении пленок . . . . .	214
7.5. Стимуляция процесса осаждения пленок с помощью СВЧ . . . . .	217
7.6. Фотоиная стимуляция процессов осаждения и травления материалов . . . . .	219
<b>Глава 8. Обеспечение вакуумно-технических параметров в установках для осаждения тонких пленок . . . . .</b>	<b>236</b>
8.1. Специфические особенности вакуумных технологических процессов производства интегральных схем . . . . .	236
8.2. Требования к откачным средствам . . . . .	241
8.3. Рабочие жидкости вакуумных насосов . . . . .	243
8.4. Механические насосы с масляным уплотнением и способы их защиты от агрессивных газов . . . . .	249
8.5. Двухроторные насосы без масляного уплотнения (насосы Рутса) . . . . .	262
8.6. Диффузионные паромасляные насосы . . . . .	264
8.7. Турбомолекулярные насосы . . . . .	266
8.8. Крионасосы . . . . .	272
8.9. Методы измерения давления и газового потока . . . . .	276
8.10. Основные принципы построения и эксплуатации вакуумных систем . . . . .	280
8.11. Обеспечение безопасных условий работы . . . . .	284

Глава 9. Перспективы развития технологии интегральных схем . . . . .	293
9.1. Основные тенденции дальнейшего развития технологии интегральных схем . . . . .	293
9.2. Требования к технологическим средам, химикатам и материалам . . . . .	297
9.3. Математическое моделирование технологических процессов . . . . .	302
9.4. Перспективы применения ионных, плазменно- и фотонно-стимулированных процессов в производстве интегральных схем . . . . .	305
9.5. Принципы построения гибкого автоматизированного производства СБИС . . . . .	310
Список литературы . . . . .	316