

Центральное правление
Научно-технического общества
приборостроительной промышленности
им. академика С.И. Вавилова

ЗАОЧНЫЙ ИНСТИТУТ

Курсы повышения квалификации ИТР
по вакуумному аппарато- и приборостроению

(II концентр)

Б.С. ДАНИЛИН

ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



Москва "Машиностроение" 1987

Редакционно-методический совет

В.П. Борисов, В.В. Голоскоков, Н.И. Гореликов,
В.С. Коган, В.В. Леонов, А.К. Ребров, Л.Н. Розанов,
В.Я. Плисковский, Л.Г. Садиков (ответственный за выпуск),
Г.Л. Саксаганский (председатель),
А.Б. Цейтлин

Рецензент д-р техн. наук В.Е. Минайчев

Научный редактор канд. техн. наук В.К. Сырчин

Данилин Б.С.

Вакуумные процессы и оборудование микроэлектроники. – М.: Машиностроение, 1987. 72 с.

В брошюре кратко рассмотрены вакуумные процессы в химически активной среде (плазмохимическое осаждение пленок при пониженном давлении и вакуумно-плазменное травление микроструктур). Дан анализ влияния различных факторов на параметры процессов осаждения и травления. Сформулированы требования к вакуумным насосам, используемым для откачки химически активных газов; рассмотрены и сопоставлены основные виды насосов.

Табл. 5, ил. 10, библи. 8 назв.

Выпущено по заказу Заочного института повышения квалификации ИТР ЦП НТО Приборпром им. академика С.И. Вавилова.

© Заочный институт повышения квалификации ИТР Центрального правления НТО приборостроительной промышленности им. академика С.И. Вавилова, 1987

Введение

В "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 этих технологий имеет первостепенное значение для развития микроэлектроники, которая, по существу, является катализатором научно-технического прогресса ряда отраслей народного хозяйства.

Анализ тенденций развития микроэлектроники показывает, что дальнейшее повышение показателей качества кремниевых интегральных схем (ИС) будет происходить главным образом за счет уменьшения в 3–4 раза размеров элементов, глубины переходов и толщины функциональных слоев. Современная микросхема представляет собой микрообъемы полупроводникового материала с различными типами проводимости, а также микрообъемы, состоящие из диэлектрических и проводящих материалов. Задача воспроизводимого интегрального создания таких микрообъемов с необходимыми электрофизическими свойствами и заданными геометрическими размерами уже в настоящее время является весьма сложной, поскольку размеры этих микрообъемов для серийных микросхем составляют в плоскости 2,0–3,0 мкм, а по вертикали 0,1–1,0 мкм с допуском на отклонение размеров не более $\pm 20\%$. По оценкам специалистов, в 1990 г. для серийных схем размеры этих микрообъемов составят в плоскости 0,5–0,8 мкм, а по вертикали 0,03–0,5 мкм с допуском на отклонение 10%.

*Материалы XXVII съезда Коммунистической партии Советского Союза. – М.: Политиздат, 1986, с. 280.

Столь существенное уменьшение размеров элементов ИС требует пересмотра всех основных технологических операций, прежде всего в направлении повышения прецизионности и стерильности обработки, снижения уровня теплового и радиационного воздействия, что приводит к использованию вакуумной технологии в широком диапазоне давлений от 10^3 до 10^{-4} Па. Расширение области применения вакуума в качестве универсальной рабочей среды, начиная от получения исходного материала – кремния и кончая сборочными операциями, вполне оправдано и закономерно, поскольку вакуумные (и, в первую очередь, вакуумно-плазменные) процессы обеспечивают как стерильность, так и прецизионность обработки.

Как известно, основные технологические процессы производства ИС осуществляются либо в высоком вакууме (выращивание монокристаллов кремния, осаждение тонких пленок, ионное легирование, электроно- и рентгенолитография и др.) при давлении 10^{-3} – 10^{-5} Па, либо в среде инертного газа (главным образом аргона) в области среднего вакуума при давлении 10^{-1} – 10 Па (осаждение тонких пленок ионным распылением). Вместе с тем в последние годы разработана большая группа процессов, проводимых в химически активной среде при давлении 10^{-1} – 10^3 Па (плазмохимическое осаждение пленок при пониженном давлении и вакуумно-плазменные процессы травления).

Все это и будет предметом нашего рассмотрения.

1. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

1.1. Основные принципы метода

Осаждение слоев из газовой фазы – это сложный процесс, включающий следующие стадии: перенос исходных реагентов в зону осаждения, превращение их 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 удаления их из рабочей зоны реактора. До середины 70-х годов для осаждения диэлектрических и полупроводниковых слоев из газовой фазы использовались в основном реакторы атмосферного давления (РАД). Однако повышение требований к качеству и равномерности слоев по толщине, увеличение диаметра обрабатываемых пластин, необходимость снижения расхода газоносителя, 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. 1 приведено сопоставление параметров процесса осаждения в РПД и РАД.

При осаждении из газовой фазы ключевым моментом, определяющим однородность получаемых слоев, является соотношение скоростей роста слоя на подложке и массопереноса реагентов или промежуточных продуктов реакции к подложке. Снижение общего давления p_0 в РПД вызывает резкое изменение условий массопереноса, поскольку при переходе от атмосферного давления к давлению ~ 100 Па коэффициент диффузии K_d возрастает примерно в 1000 раз ($K_d \sim 1/p_0$). При этом скорость роста слоя намного меньше скорости массопереноса, поэтому закономерности роста слоев будут определяться в первую очередь химической реакцией, а не процессом массопереноса.

Величина p_0 , соотношение парциальных давлений отдельных газовых реагентов p_i , величина общего газового потока Q_r , температура осаждения T влияют как на абсолютное значение скорости осаждения, так и на ее распределение по

Таблица 1

Сопоставление параметров процессов осаждения
в РПД и РАД

Параметр процесса	РПД	РАД
Давление, Па	10^2-10^3	10^5
Производительность, пластин/цикл	до 200	до 50
Снижение производительности при увеличении диаметра пластин	слабое	сильное
Равномерность температуры в рабочей зоне, К	1	5-10
Разброс слоев по толщине, ±%:		
по диаметру пластины	2	5-10
по партии пластин	3	10-15
Скорость осаждения кремния, нм/мин	5-20	20-100
Расход газа-носителя, м ³ /ч	0,05	1,5-5
Затраты на обработку одной пластины,	1	5-10

условная единица

длине рабочей зоны реактора. Следовательно, изменяя данные параметры процесса, а также скорости газового потока, можно осуществить выравнивание скорости осаждения слоя по длине рабочей зоны. Поскольку регулирование давлений в ряде случаев затруднено и не всегда целесообразно, а увеличение скорости газового потока ведет к перерасходу газа, то наиболее простым и часто используемым способом регулирования профилей осаждения является создание "температурного градиента" по длине рабочей зоны.

Недостатком пиролитического метода осаждения слоев является высокая температура процесса. Например, осаждение кремния в РПД обычно производится при температуре 1320-1470 К. Такая сравнительно высокая температура вызывает значительное перераспределение легирующей примеси вблизи границы раздела пленка-подложка, что ограничивает минимальную толщину и электропроводность слабо легированных пленок в том случае, если они осаждаются на подложку с сильно легированной приповерхностной областью. Чтобы уменьшить автолегирование пленок, осаждение крем-

ния должно проводиться при более низких температурах (1020-1070 К). Кроме того, высокая температура пластин, необходимая для реализации пиролитических реакций, не позволяет проводить осаждение пленок на ранее осажденные слои или пленочные структуры (например, Si_3N_4 на Al) в том случае, если последние могут расплавляться, испаряться, вступать в химическую реакцию или диффундировать в осаждаемую пленку.

Альтернативой высокотемпературным методам осаждения является активация процессов с помощью низкотемпературной газоразрядной плазмы (НГП), при которой снимаются температурные ограничения, что позволяет осаждать пленки на ранее созданные структуры и устранять возникновение внутренних напряжений в пленках при последующем охлаждении пластин. НГП - это слабоионизованный разреженный газ (давление 10^3-10 Па) со степенью ионизации $10^{-6}-10^{-4}$ (концентрация электронов $10^{15}-10^{18}$ м⁻³), в котором электроны имеют среднюю энергию 1-10 эВ (температура порядка 10^4-10^5 К), в то время как тяжелые газовые частицы (ионы, атомы, молекулы) имеют среднюю энергию на два порядка ниже (температура 300-500 К). Поскольку электроны обладают энергией, достаточной для возбуждения, диссоциации и ионизации атомов и молекул, то выход продуктов реакций в НГП значительно больше термодинамически равновесного, рассчитанного исходя из температуры газа, которая близка к температуре окружающей среды. Это позволяет более эффективно, с меньшими затратами энергии и реагентов проводить процессы осаждения пленок. НГП может генерироваться в разрядах постоянного электрического поля, а также разрядах низкочастотных (10^2-10^3 Гц), высокочастотных (10^5-10^8 Гц), сверхвысокочастотных (10^9-10^{11} Гц) и в электромагнитных полях оптического диапазона частот ($10^{13}-10^{15}$ Гц), возбуждаемых лазерным излучением.

Свойства пленок, получаемых в РПД при активации процесса осаждения с помощью НГП, помимо величины давлений, скорости газового потока и состава его компонентов зависят также от частоты и мощности приложенного напряжения, величины электрического потенциала смещения на подложках, расстояния между электродами. Такое большое число взаимосвязанных параметров требует использования для управления

процессом осаждения микропроцессора и ЭВМ для обеспечения воспроизводимости свойств получаемых тонкопленочных слоев. Таким образом, установка, использующая РПД, должна обеспечивать возможность регулирования и поддержания с требуемой точностью величины давления, скорости газового потока и состава его компонентов, частоты приложенного напряжения и мощности разряда, а также величины электрического потенциала смещения, поданного на подложки. Кроме того, должна быть обеспечена воспроизводимость и стабильность температурного градиента по длине рабочей зоны реактора.

Разработанный процесс осаждения слоев в РПД должен удовлетворять ряду требований, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Требования, предъявляемые к процессам осаждения слоев в РПД

Характер требований	Перечень требований
Технологические	Допустимая неравномерность слоев по толщине: пластины - $\pm 2\%$ рабочей зоны РПД . . . - $\pm 3\%$ Допустимое отклонение от свойств материала (концентрация фосфора в поликремнии, слоях фосфорно-силикатного стекла и др.) - $\pm 5-10\%$ Допустимая невоспроизводимость свойств от цикла к циклу. . - $\pm 5\%$ Допустимая плотность дефектов - 1,5 час-тип/см ² Длительность цикла. . . . - не более 2 ч Производительность - 100 пластин диаметром 150 мм за цикл

Характер требований	Перечень требований
Эксплуатационные	Простота конструкции, высокая надежность, удобство в обслуживании, автоматическое управление процессом с использованием дисплея Возможность проведения регламентной чистки и проверки узлов и деталей установки
Техники безопасности	Полное исключение возможности взрыва. Использование нетоксичных и в особо разрешенных случаях слаботоксичных веществ с утилизацией продуктов реакции, обеспечение безопасности при проведении регламентной чистки и проверки узлов и деталей установки
Экономические	Использование наиболее доступных, безопасных и недорогих реагентов, допускающих большой срок хранения

1.2. Получаемые материалы и используемые газы

Получение поликристаллического кремния осуществляется путем разложения летучих соединений, в качестве которых используются силан (SiH_4), тетрахлорид кремния (SiCl_4), тетрахлорсилан (SiHCl_3), дихлорсилан (SiH_2Cl_2) и дисилан (Si_2H_6). Для получения слоев легированного поликремния применяется смесь силана с фосфином (PH_3), арсином (AsH_3) и дибораном (B_2H_6). Легированный поликремний служит электропроводящим материалом для межсоединений. Введение малых количеств закиси азота в реакцию пиролиза силана при 900-920 К позволяет получить слои поликрем-

Таблица 3

Физико-химические свойства веществ, применяемых при

Название соединения	Химическая формула	Молекулярная масса	Состояние при нормальных условиях	T _{пл} , К
Дихлорсилан	SiH ₂ Cl	101,0	Г	151
Дисилан	Si ₂ H ₆	62,2	Г	141
Тетрахлорид кремния	SiCl ₄	169,9	Ж	205
Тетраэтоксилан	Si(OC ₂ H ₅) ₄	208,3	Ж	191
Диметилдихлорсилан	Si(CH ₃) ₂ Cl ₂	129,0	Ж	187
Фосфин	PH ₃	34,0	Г	139
Треххлористый фосфор	PCl ₃	137,3	Ж	183
Оксихлорид фосфора	POCl ₃	153,3	Ж	274,2
Триметилфосфат	(CH ₃ O) ₃ PO	140,1	Ж	-
Диборан	B ₂ H ₆	27,7	Г	108
Трипропилборат	(C ₃ H ₇ O) ₃ B	188,8	Ж	-
Аммиак	NH ₃	17,0	Г	195

осаждении слоев в РПД

T _{кип} , К	Плотность		Предельно-допустимая концентрация, мг/м ³	Воспламеняемость и взрывоопасность
	газ, г/дм ³	жидкость г/см ³ (при T, К)		
261,8	1,44	0,68(88)	1	Воспламеняется на воздухе при T=133 К
264,7	-	1,42(153)	5	Пределы взрываемости в смеси с воздухом 4,1-9,8%
258,7	2,30	0,91(298)	-	
330,6	2,16	1,48(293)	5	
439,5	-	0,99(298)	20	
343,3	-	1,06(293)	1	Воспламеняется при T=718 К; пределы взрываемости в смеси с воздухом 0,8-39%
185,6	1,53	0,75(183)	0,1	Воспламеняется в смеси с воздухом 0,5-100%, самовозгорается при T=233 К. Взрывоопасен
348,1	-	1,56(298)	1	
378,8	-	1,68(298)	0,05	Сильно токсичен
468	-	1,21(293)	-	
180,5	1,24	0,45(161)	0,1	Самовоспламеняется на воздухе при T=173 К
449	-	0,86(298)	-	
412	-	0,82(298)	-	
239,5	0,77	0,68(298)	-	Самовоспламеняется при T=923 К; взрывоопасен в смеси с воздухом 13-79%

Название соединения	Химическая формула	Молекулярная масса	Состояние при нормальных условиях*	T _{пл} , К
Арсин	AsH ₃	78,0	Г	156

*Г - газообразное, Ж - жидкое.

ния, легированного кислородом. Во избежание осаждения двуокиси кремния и углерода в качестве газа-носителя используется высокочистый водород, обеспечивающий восстановительную газовую среду, свободную от углеродов.

Эпитаксиальные слои кремния также получают в среде вышеперечисленных летучих соединений кремния. Эпитаксиальный слой легируют бором для получения проводимости Р-типа и фосфором для получения проводимости n-типа. В качестве легирующих добавок могут использоваться: бромид бора (BBr₃), хлорид бора (BCl₃), трехфтористый бор (BF₃), фосфин (PH₃), оксихлорид фосфора (POCl₃), пентафторид фосфора (PF₅), трехбромистый фосфор (PBr₃), треххлористый фосфор (PCl₃), трехфтористый фосфор (PF₃). Газом-носителем служит водород, обеспечивающий восстановительную газовую среду, а для продувки реактора используется азот. Поскольку примеси ухудшают кристаллическую структуру и проводимость кремниевых пластин, летучие соединения кремния, а также водород и азот должны быть высокой степени чистоты. Особенно недопустимо наличие влаги, которая вызывает окисление поверхности обрабатываемых пластин.

Нитрид кремния производится с помощью химического осаждения из газовой фазы. Источником получения кремния обычно является силан или дихлорсилан, а азота - аммиак.

T _{кип} , К	Плотность		Предельно-допустимая концентрация, мг/м ³	Воспламеняемость и взрывоопасность
	газ, г/дм ³	жидкость, г/см ³ (при T, К)		
184,5	1,98	1,23(184)	20	Образует взрывоопасные смеси с органическими веществами
210,5	2,70	1,64(209)	0,05	

Газом-носителем может быть азот или водород. Перечисленные газы не должны содержать кислород, поскольку он способствует образованию оксинитридов.

Для получения слоев окисла кремния и силикатных стекол используются реакции окисления кислородом при 620-720 К или же закисью азота при 870-1170 К. Широко применяется также реакция пиролиза тетраэтаксилана при 970-1020 К (продукты C₂H₄ и H₂O). В последнее время все большее значение приобретает осаждение пленок двуокиси кремния взаимодействием дихлорсилана с закисью азота при 1120-1190 К (продукты HCl и N₂). Кроме того, слои двуокиси кремния и стекло получают в результате реакций тетрахлорида кремния с водой, дихлорсилана с кислородом. Стекла получают также реакциями кремнийорганических соединений и легирующих примесей с кислородом при 920-1120 К.

Осаждение слоев металлов и силицидов производят из органических соединений металлов, пиролиз которых при температуре 520 К позволяет получать слои, хорошо покрывающие рельефные структуры интегральных схем. Для этой же цели используют фториды и хлориды металлов (молибдена, вольфрама и др.). Физико-химические свойства веществ, названных наиболее широкое применение при осаждении слоев в РПД, приведены в табл. 3.

1.3. Типы и конструкции реакторов и установок

На практике в большинстве случаев используется простейший реактор с односторонним вводом газа, представляющий собой цилиндрическую кварцевую (реже металлическую) трубу. В том случае, когда необходимо выравнивание скорости осаждения по длине рабочей зоны, применяются конструкции реакторов, изображенные на рис. 1. В реакторах триггерного типа (рис. 1, а) для этой цели производится периодическое переключение потока газа и откачки с одного конца реактора на другой, в результате чего реагенты пролетают рабочую зону в двух направлениях. В реакторе с распределен-

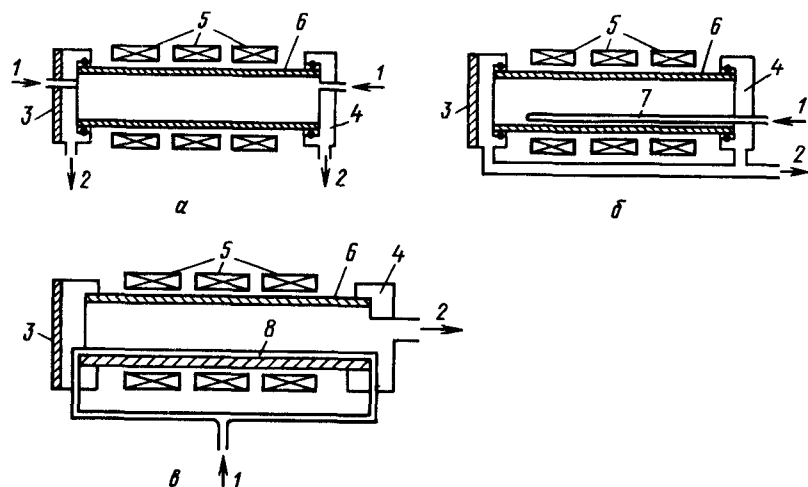


Рис. 1. Конструкции реакторов, использующие различные способы выравнивания скорости осаждения слоев по длине рабочей зоны:

а — триггерный реактор с двусторонней откачкой и переключением ввода газа; б — реактор с двусторонней откачкой и распределенным вводом газа с одной стороны реактора; в — реактор с односторонней откачкой и распределенным вводом газа с двух сторон реактора (1 — ввод газа; 2 — откачка; 3 — крышка; 4 — шлюз; 5 — трехзонный нагреватель; 6 — корпус реактора; 7 — трубка с отверстиями для распределенного ввода газа; 8 — трубка с прорезью для распределенного ввода газа)

ным вводом газа и двусторонней откачкой (см. рис. 1, б) встроены трубки из коррозионно-стойкой стали для подачи реагентов. В трубках имеется 8–10 отверстий. Диаметр отверстий 0,25 мм, расстояние между ними 75 мм. Двусторонняя откачка реактора устраняет эффект обеднения газовой смеси и способствует более равномерному распределению реагентов по длине рабочей зоны. В реакторе с двусторонней подачей газа (см. рис. 1, в) последняя осуществляется вертикально вверх через щель шириной 0,15–0,50 мм, причем длина щели несколько больше длины зоны осаждения. Двусторонняя подача газа устраняет перепад давлений по длине трубки, который имеет место при одностороннем вводе газа (см. рис. 1, б), что способствует выравниванию концентрации реагентов по рабочей зоне.

В тех случаях, когда требуется очень высокая равномерность осаждаемых слоев по толщине, пластины размещаются в перфорированном контейнере из коррозионно-стойкой стали, который устанавливается в рабочей зоне над отверстиями в газоподводящих трубках. Предложены самые различные конструкции контейнеров, все они выполняют одни и те же функции:

обеспечивают равномерную подачу газов к пластинам за счет диффузии потока, проходящего в зазоре между стенками реактора и контейнера;

обеспечивают строгую коаксиальность расположения пластин относительно оси реактора, исключая тем самым возможные нарушения геометрии реакционного объема;

существенно увеличивают производительность реактора без увеличения его габаритных размеров и энергозатрат, поскольку в результате более равномерного доступа реагентов к пластинам можно снизить расстояние между ними.

Несмотря на большое разнообразие установок, использующих РПД, и различную степень их сложности, принципиальные схемы установок в основном идентичны (рис. 2). Газовая система выполнена из коррозионно-стойкой стали и состоит из четырех отдельных газовых магистралей для рабочих и вспомогательных (для продувки реактора) газов. На каждой газовой магистрали установлены регулятор давления 1, измеритель расхода газа 2, игольчатый натекатель для напуска газа 3 и электромагнитный клапан 4. Смешивание

газов происходит в смесителе 5, откуда смесь поступает либо через ближайшую магистраль 6 для сброса и корректировки расхода газовых реагентов, либо через рабочую магистраль в шлюз 7 загрузки-выгрузки пластин, а из него в реактор 8. Реактор в виде кварцевой трубы диаметром до 150 мм закреплен с помощью водоохлаждаемых шлюзов 7 и 10 и нагревается электропечью 9. Шлюз 10 снабжен датчиком давления 11 и блоком из трех термопар 12, позволяю-

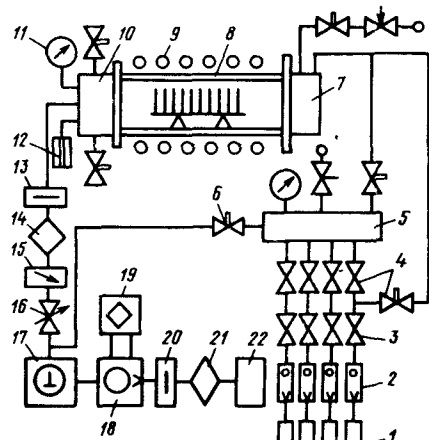
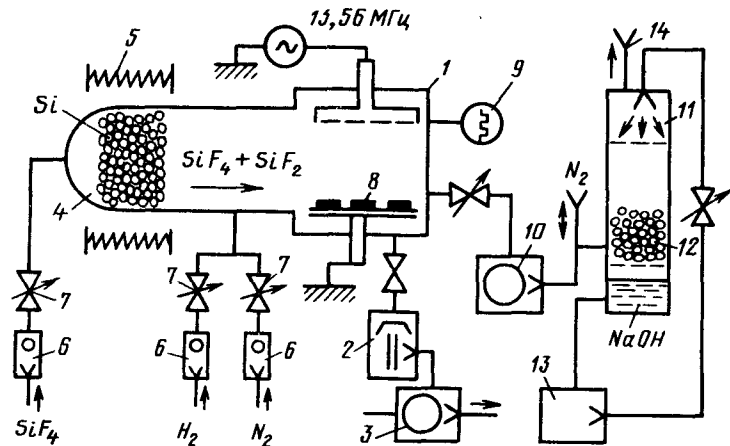


Рис. 2. Принципиальная схема установки для осаждения пленок из газовой фазы при пониженном давлении в реакторе цилиндрического типа

Рис. 3. Принципиальная схема установки для плазмохимического осаждения пленок из газовой фазы в планарном реакторе



ших измерять температуру в реакторе. Вакуумная система установки состоит из ловушки 13 и фильтра 14, с помощью которых предотвращается попадание продуктов реакции в насосы. Эффективная быстрота откачки изменяется с помощью регулятора 15, вакуумный вентиль 16 служит для отсоединения реактора от двухроторного насоса 17 в том случае, когда производятся сброс и корректировка расхода газовых реагентов через байпасную магистраль 6. Последовательно с двухроторным насосом 17 включен вращательный насос с масляным уплотнителем 18, снабженный наружным фильтром для очистки масла 19, что позволяет увеличить ресурс работы этого насоса. Система выброса снабжена маслоотражателем 20, фильтром 21 и поглотителем продуктов реакции 22.

На рис. 3 представлена принципиальная схема установки для плазмохимического осаждения пленок нитрида кремния в планарном реакторе. Предварительно рабочий объем реактора 1 с помощью диффузионного 2 и вращательного 3 насоса откачивается до давления 10^{-3} - 10^{-4} Па. На входе реактора в кварцевую трубу помещен контейнер 4, в который загружен кусковой кремний, нагреваемый с помощью электропечи 5 до температуры 1438 К. Основным рабочим газом является четырехфтористый кремний SiF_4 , подаваемый в реактор через отдельную газовую магистраль, снабженную измерителем расхода газа 6 и регулятором потока 7. Проходя через нагретый контейнер 4 с кремнием SiF_4 образует более активный газ SiF_2 по реакции $SiF_4 + Si \rightarrow 2SiF_2$. Одновременно непосредственно в рабочий объем реактора через отдельные газовые магистрали подаются водород и азот. Плазма между плоскими электродами реактора возбуждается от ВЧ генератора с частотой 13,56 МГц, плотность ВЧ мощности $\sim 0,64$ Вт/см², подложки 8 нагреты до температуры 653 К, давление газовой смеси, измеряемое датчиком 9, составляет 100 Па. Откачка рабочего объема реактора в процессе осаждения пленок Si_3N_4 производится вращательным насосом 10. Продукты реакции нейтрализуются с помощью специального устройства, снабженного контейнером 12 с пористой керамикой, в которую сверху с помощью перекачивающего насоса 13 подается NaOH (поз. 11). Выброс нейтрализованных продуктов реакции происходит через трубу 14, которая подключена к системе отсоса.

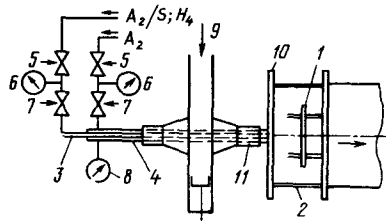


Рис. 4. Принципиальная схема установки для плазмохимического осаждения пленок из газовой фазы при активации процесса СВЧ энергией

На рис. 4 схематично изображена установка для осаждения тонких пленок аморфного кремния при активации процесса с помощью СВЧ НПП ($f = 2,45$ ГГц). Пластины, на которые осаждаются пленки аморфного кремния, размещаются на специальном держателе 1, помещаемом внутри цилиндрического стеклянного реактора 2. Подача реагентов в реактор осуществляется по двум коаксиальным трубкам. Через внутреннюю трубку 3 (из коррозионно-стойкой стали) диаметром 6 мм подается смесь 90% Ar + 10% SiH_4 . Через наружную кварцевую трубку 4 диаметром 25 мм подается чистый Ar. Каждый газопровод снабжен вентилем 5, измерителем потока 6 и регулируемым натекателем 7. Кроме того, на наружном газопроводе имеется теплоэлектрический манометр 8, с помощью которого измеряется давление. Энергия СВЧ поля подается через волновод 9, и с ее помощью возбуждается СВЧ разряд в кварцевой трубке с аргоном. Электромагнитное поле СВЧ разряда не проникает внутрь реактора, отделенного пластиной 10 из коррозионно-стойкой стали. Попадая в цилиндрическую полость 11 силан диффундирует в НПП аргона и под воздействием плазмы диссоциирует на молекулы SiH_x и атомы Si . Последние, попадая в рабочий объем реактора 2, осаждаются на закрепленные в держателе 1 пластины и образуют высококачественные пленки аморфного кремния. Продукты реакции удаляются за счет непрерывной откачки реактора. Рабочее давление в реакторе 40 Па, величина газового потока Ar и его смеси с SiH_4 70–80 см³/мин, СВЧ мощность 150 Вт. Температура пластин в процессе осаждения ~300 К, скорость осаждения достигает 40 м/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 устраняет

бомбардировку растущей пленки высокоэнергетическими частицами, а следовательно, радиационные нарушения, позволяя получать высококачественные пленки аморфного кремния с высокой равномерностью на пластинах диаметром 100 мм.

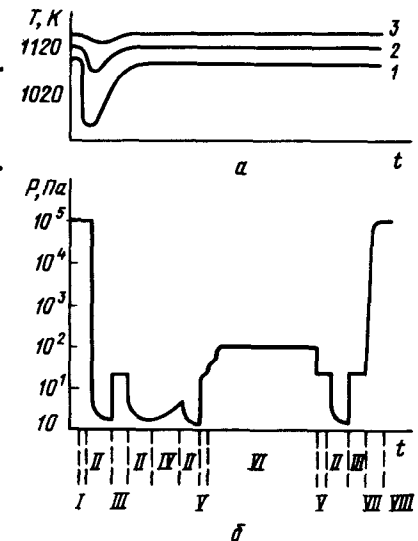
1.4. Влияние различных факторов на параметры процесса осаждения

Установки для осаждения слоев при пониженном давлении конструируются в основном на базе диффузионных печей. Стабильная и воспроизводимая скорость осаждения в значительной степени зависит от воспроизводимости температурного режима РПД, поскольку изменение температуры всего лишь на 1 К вызывает изменение скорости осаждения поликремния SiO_2 и Si_3N_4 на 1,5–2%. Как правило, измерение температуры в реакторах производится термомпарами при атмосферном давлении, в то время как при откачке реактора температура в нем может изменяться на 280–300 К. Кроме того, изменение температуры происходит также при загрузке партии пластин в лодочку, и для ее восстановления требуется 20–30 мин.

На рис. 5 представлены типичные циклограммы изменения

Рис. 5. Циклограммы изменения параметров в РПД цилиндрического типа:

а – температуры (1 – начало; 2 – середина; 3 – конец рабочей зоны); б – давления (I – загрузка пластин; II – откачка до предельного давления; III – продувка аргоном; IV – измерение натекания; V – напуск реагентов в байпасную линию; VI – переключение потока в реактор, корректировка давления и осаждение слоев; VII – разгерметизация реактора; VIII – выгрузка пластин)



температуры и давления. Общее давление в реакторе определяется по формуле

$$p_0 = Q_r \left(\frac{1}{S_n} + \frac{1}{U} \right),$$

где Q_r – газовый поток; S_n – быстрота действия насоса; U – проводимость вакуумной системы.

Поскольку p_0 – один из важнейших параметров процесса осаждения, то оно должно поддерживаться с точностью $\pm 5\%$ (а в перспективе – $\pm 2\%$).

На рис. 6 представлены схемы устройств регулирования рабочего давления. Изменение скорости вращения двигателя (а следовательно, величины S_n) применяется только для двухроторных насосов. Недостатками способа являются его инерционность, а также непригодность для получения $p_0 > 1300$ Па, равного входному давлению двухроторного насоса. Наиболее часто p_0 регулируется путем изменения величины U за счет использования дроссельной заслонки. Изменение величины вспомогательного потока азота, поступающего в вакуумную систему между реактором и насосом, при-

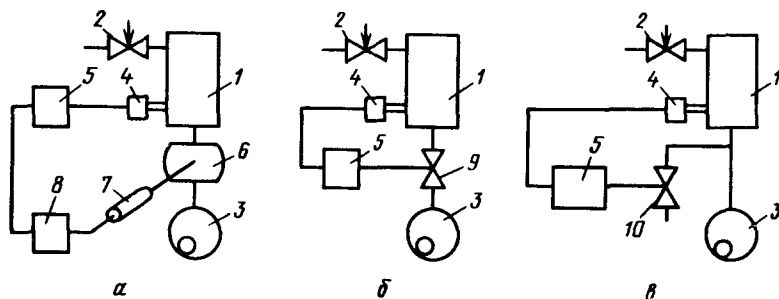


Рис. 6. Схема устройств регулирования рабочего давления: а – изменением скорости вращения двигателя; б – изменением проходного сечения соединительного вакуумпровода; в – изменением величины вспомогательного потока азота (1 – реактор; 2 – регулятор расхода газа; 3 – механический насос с масляным уплотнением; 4 – датчик давления; 5 – управляющее устройство; 6 – двухроторный насос; 7 – двигатель насоса; 8 – регулятор скорости вращения двигателя; 9 – дроссельная заслонка; 10 – натекатель для подачи азота в насос)

меняется реже, поскольку приводит к образованию побочных продуктов реакции. Так, например, в процессе осаждения Si_3N_4 из дихлорсилана при подаче N_2 одновременно образуется хлористый аммоний, который, попадая в насос, ухудшает его характеристики. Как отмечалось выше (см. разд. 1.1), при осаждении из газовой фазы ключевым моментом, определяющим однородность получаемых слоев, является соотношение скоростей роста слоя на подложке и массопереноса реагентов или промежуточных продуктов реакции к подложке. Выравнивание скорости осаждения по длине рабочей зоны можно осуществить изменением температуры в рабочей зоне, общего давления, парциального давления реагентов, а также скорости газового потока. Таким образом, установка, использующая РПД, должна обеспечивать:

- воспроизводимость и стабильность температурного градиента по длине рабочей зоны реактора;
- воспроизводимость и регулирование рабочего давления;
- воспроизводимость и регулирование скорости движения газа по реактору.

В случае взаимодействия газа с поверхностью твердого тела возможны две предельные области протекания процесса: кинетическая и диффузионная, что определяется толщиной пограничного диффузионного слоя δ вблизи поверхности твердого тела и соотношением коэффициента диффузии K_d и константы скорости химической реакции K .

При большой скорости химического процесса ($K \gg K_d$) в газовой фазе по направлению к поверхности раздела существует значительный градиент концентрации.

Поскольку в РПД коэффициент диффузии K_d примерно в 1000 раз больше, чем в РАД, а пограничный слой δ в 10 раз шире, то он чаще всего распространяется на все сечение реактора. Однако плотность его примерно в 1000 раз меньше, чем в РАД, в результате чего образуется однородная среда, в которой значительно улучшены условия массопереноса и практически отсутствует градиент концентрации реагентов в объеме. Понятие о пограничном слое в этом случае неприемлемо, поскольку он трансформируется в однородную среду по всему сечению реактора.

В процессе осаждения в РПД пластины в зоне осаждения располагаются 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, заключенном между стенками круглого кварцевого реактора и цилиндрической поверхностью образуемой партией загруженных пластин. Пограничный слой образуется 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.

Несмотря на то, что рабочее давление в РПД на 3–4 порядка ниже, чем в РАД, тем не менее скорость осаждения вполне достаточна для практического применения, что определяется высоким парциальным давлением реагентов.

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 будет наблюдаться уменьшение скорости осаждения V по длине реактора l , что особенно характерно для осаждения низкотемпературного окисла кремния и легированного фосфором поликремния (рис. 7, а). В этом случае необходимо компенсировать очень сильный спад скорости осаждения по длине реактора, для чего вводят температурный градиент по рабочей зоне, увеличивают скорость потока газовой сме-

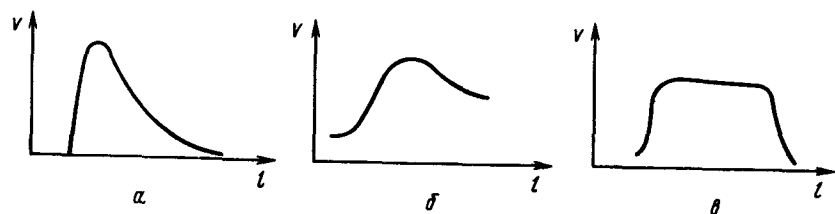


Рис. 7. Характер изменения профиля скорости осаждения слоев по длине рабочей зоны в цилиндрическом РПД с плоским температурным профилем и односторонним вводом газа для систем:

- а) $\text{SiH}_4\text{-O}_2$, $\text{SiH}_4\text{-NH}_3$, пиролиз $\text{SiH}_4\text{-PH}_2$, б) $\text{SiH}_4\text{-N}_2\text{O}$;
в) $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{-NH}_3$, $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{-N}_2\text{O}$, пиролиз SiH_4

си, производят разбавление смеси инертным газом для снижения парциального давления основных компонентов. В некоторых случаях для выравнивания скорости осаждения ввод газа делают распределенным по рабочей зоне. Профиль скорости осаждения (рис. 7, б) характерен тем, что на начальном участке реактора существует область низкой скорости осаждения, которая может быть отнесена к гетерогенной реакции осаждения слоя на поверхности пластин. После этого наблюдается быстрый рост, а затем медленный спад скорости осаждения, что, по-видимому, характеризует быстрое нарастание и последующее замедление реакций в газовой фазе. Подобный профиль скорости осаждения характерен для системы силан—закись азота. Выравнивание скорости осаждения в этом случае может быть достигнуто подбором оптимальной величины газового потока и введением небольшого градиента температуры (273–313 К) по длине реактора. В том случае, когда профиль скорости осаждения имеет вид, представленный на рис. 7, в, оптимизация процесса по длине реактора наиболее проста и может быть достигнута за счет изменения потока газа, общего давления газовой смеси и изменения температуры краев рабочей зоны.

2. ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ

2.1. Классификация процессов вакуумно-плазменного травления (ВПТ)

По физико-химическому механизму взаимодействия энергетических и химически активных частиц (ХАЧ) с поверхностными атомами или молекулами обрабатываемого материала процессы ВПТ можно разделить на три основных вида.

1. Ионное травление (ИТ), при котором для удаления поверхностных слоев материалов используется кинетическая энергия ионов инертных газов или газов, химически не реагирующих с обрабатываемым материалом. В зависимости от условий обработки и среды, в которую помещаются образцы, ИТ подразделяются на:

ионно-плазменное травление (ИПТ), при котором образцы

Параметры основных видов вакуумно-плазменного травления

Параметр	Ионное травление		Ионное химическое травление
	Ионно-плазменное травление	Ионно-лучевое травление	Реактивное ионно-плазменное травление
Давление рабочего газа, Па	1,0-10 (диодные системы) 0,1-1,0 (многоэлектродные системы и системы с магнитным полем)	10^{-3} - 10^{-2}	1,0-50 (диодные системы) 0,1-1,0 (многоэлектродные системы и системы с магнитным полем)
Расход рабочего газа при нормальном давлении, см ³ /мин	20-50	1,0-10	20-50
Механизм травления	Физическое распыление в условия плазмы	Физическое распыление в условиях вакуума	Физическое распыление и химические реакции в условиях плазмы
Частицы, воздействующие на обрабатываемую структуру в процессе травления, и диапазон их энергий	Ионы инертных газов (0,5-2,0) кэВ Электроны (0,5-2,0) кэВ Атомы инертных газов (0,05-0,1) эВ Атомы распыленного	Ионы инертных газов (0,5-2,0) кэВ Атомы инертных газов (0,05-0,1) эВ В некоторых случаях: электромагнитное излучение плазмы	Ионы химически активных газов (0,1-0,5) кэВ Молекулы химически активных газов (0,05-0,1) эВ Химически активные атомы и радикалы (0,05-0,1) эВ

Параметр	Плазмохимическое травление		
	Реактивное ионно-лучевое травление	Плазменное травление	Радикальное травление
Давление рабочего газа, Па	10^{-2} -0,5	50- 10^3 (объемные реакторы) 10 - 10^2 (планарные реакторы) 0,1-1,0 СВЧ системы	50 - 10^3 (объемные реакторы с перфорэкраном) 10 - 10^2 (системы с источниками радикалов)
Расход рабочего газа при нормальном давлении, см ³ /мин	1,0-20	50- 10^2	50- 10^2
Механизм травления	Физическое распыление и химические реакции в условиях вакуума	Стимулированные химические реакции в условиях плазмы	Химические реакции в условиях вакуума
Частицы, воздействующие на обрабатываемую структуру в процессе травления, и диапазон их энергий	Ионы химически активных газов (0,1-0,5) кэВ Молекулы химически активных газов (0,05-0,1) эВ В некоторых случаях: электромагнитное излучение плазмы	Ионы химически активных газов с энергией меньше 100 эВ Химически активные атомы и радикалы (0,05-0,1) эВ Электроны с энергией меньше 100 эВ Молекулы химически активных	Химически активные атомы и радикалы (0,05-0,1) эВ Молекулы химически активных газов (0,05-0,1) эВ В некоторых случаях: электромагнитное излучение плазмы (0,1-10) эВ

Параметр	Ионное травление		Ионное химическое
	Ионно-плазменное травление	Ионно-лучевое травление	Реактивное ионно-плазменное травление
<p>Характерные температуры подложки в процессе травления без принудительного охлаждения подложек-держателей, К</p> <p>Отрицательные воздействия процесса травления на обрабатываемые структуры</p>	<p>материала (0,05-5,0) эВ Электромагнитное излучение плазмы (0,1-10) эВ</p> <p>470-670</p>	<p>(0,1-10) эВ электроны компенсатора (0,1-100) эВ</p> <p>420-570</p>	<p>Электроны (0,1-0,5) кэВ Атомы и молекулы распыленного материала и его соединений (0,05-5,0) эВ Электромагнитное излучение плазмы (0,1-10) эВ</p> <p>420-520</p>
	<p>Создание структурных дефектов Пробой диэлектрических пленок Деградация параметров МДП-структур</p>	<p>Создание структурных дефектов. Деградация параметров МДП-структур Загрязнение поверхности распыленными материалами</p>	<p>Деградация параметров МДП-структур Загрязнение поверхности распыленными материалами электродов и их соединений</p>

Параметр	Ионное химическое травление	Плазмохимическое травление	
	Реактивное ионно-лучевое травление	Плазменное травление	Радикальное травление
<p>Характерные температуры подложки в процессе травления без принудительного охлаждения подложек-держателей, К</p> <p>Отрицательные воздействия процесса травления на обрабатываемые структуры</p>	<p>(0,1-10) эВ электроны компенсатора (0,1-100) эВ</p> <p>370-470</p>	<p>газов (0,05-0,1) эВ Электромагнитное излучение плазмы (0,1-10) эВ</p> <p>420-570</p>	<p>370-470 (объемные реакторы с перфорациями) 290-370 (системы с источниками радикалов)</p>
	<p>Деградация параметров МДП-структур Загрязнение поверхности распыленными материалами элементов ионного источника</p>	<p>Деградация параметров МДП-структур</p>	<p>Не наблюдается отрицательных воздействий</p>

Параметр	Ионное травление		Ионное химическое
	Ионно-плазменное травление	Ионно-лучевое травление	Реактивное ионно-плазменное травление
	Загрязнение поверхности распыленным материалом электродов Межпленочная диффузия материалов	элементов ионного источника	

кое травление	Плазмохимическое травление		
	Реактивное ионно-лучевое травление	Плазменное травление	Радикальное травление

Таблица 5

Рабочие газы, продукты диссоциации и соединения, обра-

Материал, подвергаемый травлению	Рабочий газ	Конструкционные материалы камеры
Алюминий	CCl_4 , BCl_4 , $SiCl_4$ и их смеси с азотом, кислородом и инертными газами	Коррозионно-стойкая сталь Окись алюминия Фторопласт-4 Кварц, стекло Химически стойкие эластомеры
Углерод (органические материалы)	O_2 , H_2 и их смеси с азотом и инертными газами	Кварц Окись алюминия Фторопласт-4 Химически стойкие эластомеры

зующиеся в процессах травления

Продукты диссоциации рабочего газа в плазме и их взаимных реакций	Продукты реакции с обрабатываемыми конструктивными материалами	Соединения, образующиеся в вакуумной системе при ее вскрытии на атмосферу
Cl , Cl_2 , $COCl_2$, $N(CCl_2)_n$, $SiCl_2$, O_3 , BCl_2O , B_2O_3 , O , SiO_2 , $SiCl_2O$, Cl , B , Si , C_2Cl_6	$AlCl_3$, Al_2Cl_6 , $SiCl_4$, $FeCl_2$, CO , CO_2 , H_2	HCl , CCl_4 , H_2O , BCl_3 , $SiCl_4$, H_2CO_3
O_1C_3 , H , H_2O , NH_3 , NO , NO_2 , N	CO , CO_2 , SH_4 , SiO_2 , COF_2 , CH_4 , AlH_3	H_2CO_3 , H_2 , O_3 , H_2O

Материал, подвергаемый травлению	Рабочий газ	Конструкционные материалы камеры
Кремний, нитрид кремния	CF_4 , SiF_4 , CF_6 , CF_3Cl , NF_3 и их смеси с кислородом и инертными газами	Алюминий Коррозионно-стойкая сталь Кварц Фторопласт-4 Химически стойкие эластомеры
Двуокись кремния	CHF_3 , C_3F_8 , $CF_4 + H_2$	Алюминий Окись алюминия Коррозионно-стойкая сталь Фторопласт-4 Химически стойкие эластомеры
Титан, вольфрам, ниобий, молибден, тантал, ванадий	$CF_4 + O_2$	Алюминий Окись алюминия Коррозионно-стойкая сталь Кварц Фторопласт-4 Химически стойкие эластомеры
Хром, золото, платина	CCl_4 , CF_3Cl , CF_2Cl_2 и их смеси с кислородом и инертными газами	Коррозионно-стойкая сталь Окись алюминия Кварц Фторопласт-4 Химически стойкие эластомеры

Продукты диссоциации рабочего газа в плазме и их взаимных реакций	Продукты реакции с обрабатываемым и конструктивными материалами	Соединения, образующиеся в вакуумной системе при ее вскрытии на атмосферу
C_2F_6 , COF_2 , SF_2 , SF_4 , F , O , O_3 , CO_2 , CO , S , Si , C , Cl , Cl_2 , F_2 , SOF_2 , $(CF_2)_n$, $(SiF_2)_n$	S , F_4 , SiF_2 , Si , OF_2 , $SiCl_4$, $AlCl_3$, $SiOCl_2$, NO_2 , N_2O , CO , CO_2	HF , H_2SiO_3 , H_2O , H_2CO_3 , HCl , HNO_3 , SiO_2
$(CHF_2)_n$, C_2F_6 , H , H_2 , $(CH_2)_n$, CH_4 , C	SiF_4 , SiH_4 , AlH_3 , $SiOF_2$, CH_4	SiO_2 , HF , H_2O
C_2F_6 , COF_2 , $(CF_2)_n$, Cl , CO , CO_2 , O , O_3	TiF_4 , WF_6 , WF_4 , MoF_6 , NbF_5 , TaF_5 , VF_5 , CO , CO_2 , $SiOF_2$, SiF_4	HF , H_2CO_3 , SiO_2 , TiO_2 , WO_3 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , V_2O_3 , Mo_2O_3 , H_2O
Cl , Cl_2 , $COCl_2$, $(CCl_2)_n$, C_2F_6 , $(CF_2)_n$, O , O_3 , COF_2 , CO , CO_2	$C_2O_2Cl_2$, $AuCl_3$, $PtCl_4$, CO , CO_2 , $SiCl_4$, SiF_4	HCl , HF , $PtCl_2$, A_4Cl_2 , SiO_2 , H_2O

Материал, подвергаемый травлению	Рабочий газ	Конструкционные материалы камеры
Полупроводники группы А-В III V	CCl_4 , CF_2Cl_2 и их смеси с кислородом и инертными газами	Коррозионно-стойкая сталь Окись алюминия, кварц Фторопласт-4 Химически стойкие эластомеры
Коррозионно-стойкая сталь, железо, никель, медь, серебро, пермаллой, гранаты	Ar, Xe	Окись алюминия Кварц Фторопласт-4 Эластомеры

А - элемент III группы, В - элемент V группы.

помещаются на отрицательный электрод газоразрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами, вытягиваемыми из плазмы разряда;

ионно-лучевое травление (ИЛТ), при котором образцы помещаются на мишени в высоковакуумной рабочей камере и бомбардируются ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника. При ИЛТ может применяться фокусировка ионных пучков с помощью электрических и магнитных полей, а также компенсация их объемного заряда с помощью инъекции электронов.

2. Плазмохимическое травление (ПХТ), при котором для удаления поверхностных слоев материалов используется энергия химических реакций между ХАЧ и атомами (или молекулами) обрабатываемого материала. В зависимости от условий обработки и среды, в которую помещаются образцы, ПХТ подразделяется на:

Продукты диссоциации рабочего газа в плазме и их взаимных реакций	Продукты реакции с обрабатываемыми конструкционными материалами	Соединения, образующиеся в вакуумной системе при ее вскрытии на атмосферу
Cl , Cl_2 , $COCl_2$, $(CCl_2)_n$ ↓, $(CF_2)_n$ ↓, O, O ₃ , CO, CO ₂ , COF ₂	$AlCl_3$, (B)Cl ₅ , (A)F ₃ ↓, (B)F ₅ , SiCl ₄ , SiF ₄ , CO, CO ₂	HClt↓, HF↓, CCl ₄ ↓, (A)F ₃ ↓, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , H ₂ O↓
A ⁺ Xe ⁺	Физическое распыление указанных материалов	Окислы указанных материалов

плазменное травление (ПТ), при котором образцы помещаются в газоразрядную плазму химически активных газов; радикальное травление (РТ), при котором образцы помещаются в вакуумную камеру (или зону), отделенную от газоразрядной химически активной плазмы либо расстоянием, либо перфорированными металлическими экранами, либо электрическими и магнитными полями, а травление осуществляется незаряженными ХАЧ, поступающими из газоразрядной плазмы.

3. Ионно-химическое травление (ИХТ), при котором для удаления поверхностных слоев материалов используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия химических реакций между ХАЧ и атомами (или молекулами) материала. В зависимости от условий обработки и среды, в которую помещаются образцы, ИХТ подразделяется на:

реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ), при котором образцы помещаются на электрод газоразрядного устройства и подвергаются как бомбардировке ионами химически активных газов, вытягиваемых из плазмы разряда, так и воздействию незаряженных ХАЧ;

реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ), при котором образцы помещаются на мишени в высоковакуумной рабочей камере и бомбардируются только ионами химически активных газов, вытягиваемых из автономного ионного источника.

В табл. 4 приведен перечень основных параметров, характеризующих различные виды процессов ВПТ. В табл. 5 приведен перечень основных рабочих газов и газовых смесей, применяемых при травлении материалов, используемых при изготовлении кремниевых сверхбольших интегральных схем (СБИС), перечислены конструкционные материалы вакуумных камер, продукты диссоциации рабочих газов в плазме, продукты взаимодействия ХАЧ с обрабатываемыми и конструкционными материалами, а также соединения, образующиеся в вакуумной системе при подаче в нее атмосферного воздуха.

2.2. Типы и конструкции установок для ВПТ

Для реализации радикального травления (РТ) чаще всего используют реакторы цилиндрического типа, в которых возбуждение плазмы производится либо с помощью индуктора (рис. 8, а), либо с помощью конденсаторных пластин (рис. 8, б). В этих реакторах зона плазмы окружает реакционную зону и отделена от нее перфорированным цилиндром-вкладышем, а доставка ХАЧ к обрабатываемым пластинам происходит в результате диффузии ХАЧ через отверстия в цилиндре. Цилиндр может быть заземлен, иметь плавающий потенциал или являться ВЧ электродом. Для реализации плазменного травления (ПТ) используются как реакторы цилиндрического (объемного) типа без перфорированного цилиндра, в которых плазма возбуждается с помощью расположенного снаружи индуктора (рис. 8, в), так и реакторы планарного типа (рис. 8, г), в которых плазма возбуждается с помощью верхнего ВЧ электрода.

Реакторы объемного типа имеют очень низкий потенциал

между плазмой и подложками (10–50 В). Сочетание низкого потенциала и высокого давления (более 100 Па) вызывает изотропный характер давления, однако обеспечивает высокую селективность (избирательность) травления (от 10 до 20). Вместе с тем, большим недостатком реакторов объемного типа является высокая неравномерность травления, поскольку скорость травления увеличивается от центра пластины к ее периметру.

Значительно большую равномерность травления обеспечивают реакторы планарного типа, в которых газ чаще всего подается через отверстие в нижнем электроде и откачивается через отверстия, расположенные на периферии реактора. Разность потенциалов между плазмой и нижним заземленным электродом, на котором расположены подложки, достигает нескольких сотен вольт, поскольку плазма находится между

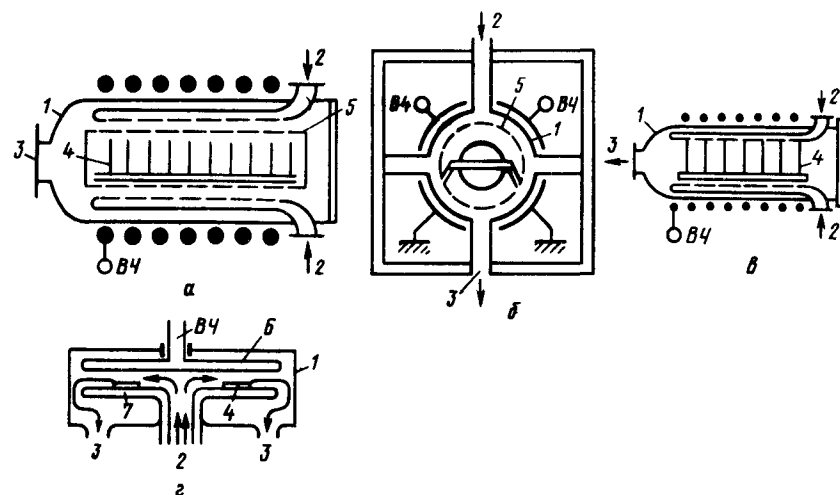


Рис. 8. Реакторы для реактивного (РТ) и плазменного (ПТ) травления:

а – цилиндрический для РТ с индукционным возбуждением; б – цилиндрический для РТ с емкостным возбуждением; в – цилиндрический для ПТ; г – планарный для ПТ с плоско-параллельными электродами (1 – корпус реактора; 2 – подача газа; 3 – откачка; 4 – обрабатываемые пластины; 5 – перфорированный цилиндр; 6 – верхний ВЧ электрод; 7 – нижний электрод)

близко расположенными электродами. Несмотря на наличие высокого потенциала и низкого давления (менее 65 Па) травление носит изотропный характер. Добиться анизотропии за счет снижения давления при близко расположенных электродах практически невозможно, поскольку при малых давлениях затруднено стабильное горение разряда. Если увеличить расстояние между электродами, то можно снизить рабочее давление, однако травление тем не менее остается изотропным, поскольку при этом потенциал между плазмой и нижним заземленным электродом быстро падает. Скорость травления в планарном реакторе обычно больше, чем в объемном, однако селективность значительно ниже.

Для реализации реактивного ионно-плазменного травления чаще всего используют реакторы планарного типа с плоско-параллельными электродами, а также с коаксиальными электродами в виде многогранной призмы. Во всех случаях обрабатываемые пластины размещаются на электроде, к которому подведено ВЧ напряжение. При проведении РИПТ поверхность обрабатываемого материала находится в контакте с плазмой. Газоразрядная плазма стимулирует физические и химические процессы, происходящие как в газовой фазе, так и на поверхности обрабатываемого материала. При этом физический и химический процессы складываются не аддитивно, в результате чего суммарная скорость травления при одновременном протекании обоих процессов намного больше сумм скоростей травления каждого процесса в отдельности.

Непосредственный контакт ВЧ плазмы с обрабатываемым материалом и интенсивная ионная бомбардировка вызывают радиационные повреждения приповерхностных слоев в планарных реакторах диодного типа (рис. 9, а). В триодной системе (рис. 9, б) вблизи электрода, на который подан ВЧ потенциал, размещена изолированная сетка, находящаяся под плавающим потенциалом. При этом образуется своеобразный полый катод, наличие которого в 3–4 раза увеличивает плотность ионов в пространстве между сеткой и ВЧ электродом и одновременно в 4–5 раз снижает напряжение автосмещения на ВЧ электроде. Малое расстояние между сеткой и ВЧ электродом (~ 15 мм) обеспечивает стабильное горение тлеющего разряда при напряжении автосмещения ~ 20 В. Характерные для триодной системы высокие скорости травления

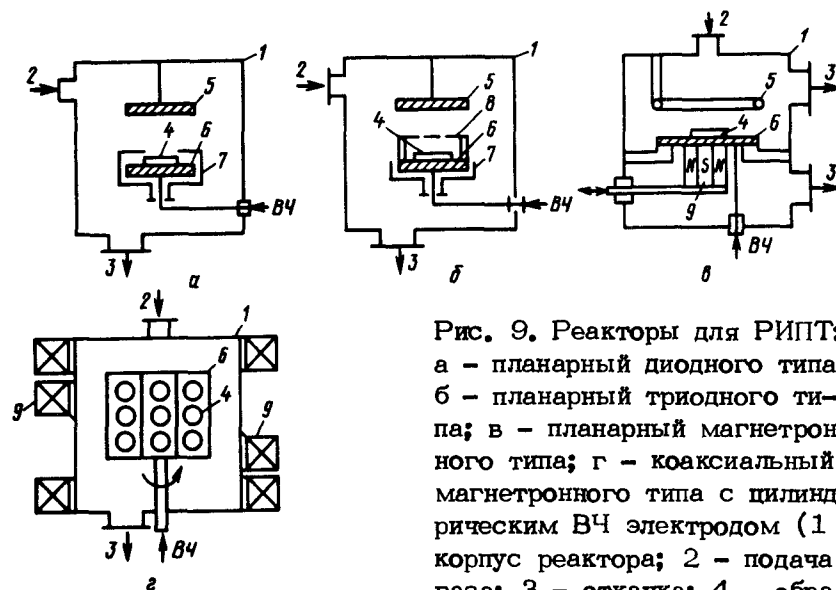


Рис. 9. Реакторы для РИПТ: а – планарный диодного типа; б – планарный триодного типа; в – планарный магнетронного типа; г – коаксиальный магнетронного типа с цилиндрическим ВЧ электродом (1 – корпус реактора; 2 – подача газа; 3 – откачка; 4 – обрабатываемые пластины; 5 – верхний заземленный электрод; 6 – ВЧ-электрод; 7 – экран; 8 – сетка; 9 – магнит)

в сочетании с низкими энергиями ионов позволяют значительно уменьшить (а в некоторых случаях полностью устранить) радиационные дефекты в обрабатываемых материалах и структурах.

В магнетронной системе (рис. 9, в) образуются замкнутые токи дрейфа электронов. Для этого снизу мишени, на которую подано ВЧ напряжение, размещены постоянные магниты, что позволяет локализовать плазму в непосредственной близости у мишени. Эмитируемые из мишени под действием ионной бомбардировки электроны оказываются в своеобразной магнитной ловушке и циркулируют по замкнутым траекториям, увеличивая эффективность процесса ионизации и возбуждения молекул и атомов рабочего газа, в результате чего резко повышается скорость травления. Кроме того, наличие магнитного поля снижает автосмещение на ВЧ электроде до 50–100 В и обеспечивает стабильное горение разряда при сравнительно низком давлении (~ 10 Па). Высокие скорости

травления в сочетании с низкими энергиями ионов позволяют значительно снизить радиационные дефекты обрабатываемых материалов и структур. Однако наличие магнитной системы вызывает локализацию плазмы вблизи мишени в виде вытянутой O-образной дорожки, что резко снижает равномерность травления, и для ее повышения приходится либо сканировать магнитное поле, либо перемещать образцы вдоль и поперек O-образной дорожки.

Существенным недостатком планарных систем с плоскопараллельными электродами является низкая производительность, поскольку небольшие размеры электродов ограничивают количество одновременно обрабатываемых пластин. Кроме того, пластины могут загрязняться в результате попадания на них нелетучих частиц, которые отделяются со стенок и электродов реактора. Для преодоления этих ограничений была разработана вертикальная ВЧ диодная система магнетронного типа с коаксиальным шестигранным ВЧ электродом, окруженным заземленным цилиндром (рис. 9, г). При использовании этой системы обеспечивается большая величина отношения площадей заземленного и ВЧ электродов (2:1). Это приводит к тому, что темное катодное пространство сосредотачивается в непосредственной близости от ВЧ электрода. В этом пространстве происходит ускорение ионов, которые бомбардируют подложки под прямым углом, обеспечивая высокую анизотропию и разрешение РИПТ. Энергия ионов, бомбардирующих подложку, может в широких пределах регулироваться за счет изменения величины магнитного поля, создаваемого катушками соленоидов. Для улучшения равномерности предусмотрено вращение ВЧ электрода.

2.3. Влияние различных факторов на параметры процесса травления

Состав рабочего газа или газовой смеси оказывает определяющее влияние на скорость, селективность, анизотропию и однородность процесса ВПТ. Так, например, замена CF_4 на SF_6 в два раза увеличивает скорость РИПТ кремния и его нитрида, а замена CF_4 на смесь 20% NF_3 + 80% Ar увеличивает скорость РИПТ кремния в 6–7 раз и селектив-

ность травления относительно SiO_2 в 4 раза. В некоторых случаях для реализации ВПТ применяют многокомпонентные газовые смеси. Так, например, для РИПТ SiO_2 в планарном реакторе может быть использована смесь $C_2F_6 + CHF_3 + O_2 + He$. Первый компонент смеси обеспечивает высокую скорость травления (до 1,4 мкм/мин), второй – гарантирует значительную селективность (5:1 относительно Si и фоторезиста), третий – обеспечивает анизотропный профиль травления, четвертый – позволяет эффективно рассеивать выделяющуюся на пластине мощность, поскольку He обладает высокой теплопроводностью.

Следует отметить, что высокая скорость, селективность и анизотропия не во всех случаях способны обеспечить качественный процесс травления. Так, например, при ПТ тонких слоев кремния, когда нет необходимости в достижении высоких скоростей травления, целесообразно использовать хлорсодержащие газы (например, CCl_4), обеспечивающие высокую анизотропию, которая растет с увеличением числа атомов Cl в молекуле рабочего газа. Однако очень быстрое (через 1,5–2 мин) образование полимерной пленки, а также резко выраженный загрузочный эффект (снижение скорости травления по мере загрузки реактора) приводят к тому, что в реакторах цилиндрического типа с объемным расположением подложек неоднородность травления составляет ~35% при частичной загрузке реактора и ~50% при его полной загрузке. В то же время замена CCl_4 на C_2ClF_5 устраняет возможность образования полимерной пленки и снижает загрузочный эффект, в результате чего даже при полной загрузке реактора неоднородность травления <8%. Последующее кратковременное травление в CCl_4 или в Cl_2 обеспечивает высокую анизотропию и селективность процесса. При таком последовательном травлении с Si сначала в плазме C_2ClF_5 , а затем в плазме CCl_4 или Cl_2 объединяются достоинства каждого газа и исключаются присущие ему недостатки.

Величины давления и газового потока оказывают влияние на стабильность и воспроизводимость процесса ВПТ. Для электродных разрядов значение оптимального давления $p_{опт}$ определяется из кривых Пашена. Следует выбирать такое

давление, при котором достигается минимальный потенциал зажигания разряда и максимальная проводимость плазмы. При $p_{\text{опт}}$ в плазме разряда скорости генерации ХАЧ (свободных атомов и радикалов) и заряженных частиц (ионов и электронов) максимальны, а следовательно, максимальны и скорости травления материалов. Значение $p_{\text{опт}}$ для конкретной системы ВПТ определяется видом используемого рабочего газа и не зависит от природы материала, который подвергается обработке. Для безэлектродной ВЧ системы с емкостным возбуждением плазмы $p_{\text{опт}}$ в зависимости от состава рабочего газа лежит в диапазоне 40–160 Па.

Отклонение давления рабочего газа от $p_{\text{опт}}$ всего лишь на (20–50)% приводит к значительному (в несколько раз) снижению скорости травления материалов, причем это снижение различно для разных материалов, в результате чего изменяется селективность их травления. Например, повышение давления смеси $\text{He} + \text{CF}_4 + \text{O}_2$ в цилиндрическом реакторе с индукционным возбуждением от 50 до 300 Па изменяет селективность травления ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) от 8 до 25, а (SiO_2/Si) – от 1,4 до 0,1. При ИТ и ИХТ изменение давления рабочего газа в области устойчивого горения разрядов не оказывает заметного влияния на анизотропию травления (отношение скоростей травления по вертикали и по горизонтали), однако рост давления значительно (в 3–5 раз) снижает показатель анизотропии при ПХТ. Если же давление уменьшается, то одновременно повышается потенциал на ВЧ электроде, снижается число столкновений ионов и растет их энергия, в результате чего резко увеличивается показатель анизотропии.

Высокая стабильная скорость и селективность травления могут быть получены только при постоянной величине расхода рабочего газа Q . На зависимостях скорости травления V материалов от Q при постоянной мощности разряда W и давлении p_0 наблюдается максимум. Увеличение Q вначале способствует эффективной доставке молекул рабочего газа в зону плазмы разряда, повышению стационарной концентрации электронов, ионов и ХАЧ, а следовательно, и скорости ВПТ. Однако при дальнейшем увеличении Q время нахождения молекул газа в реакторе $\tau_p = p_0 V / Q$ (где V – объем реактора) становится настолько малым, что молекулы газа и ХАЧ

откачиваются из реактора, не успев превратиться в активные частицы или вступить в реакцию с обрабатываемым материалом. При постоянных мощности разряда и давлении газа в зависимости от величины Q значение τ_p может изменяться в 5–10 раз, что вызывает существенное изменение скорости травления. Кроме того, величина Q оказывает большое влияние на селективность травления. Так, например, увеличение потока газовой смеси $\text{CH}_4:\text{H}_2$ (в соотношении 9:1) в 8 раз увеличивает селективность РИПТ окиси кремния по отношению к кремнию \sim в 2 раза. Величина и направление потока рабочего газа во многом определяют равномерность РИПТ и ПХТ в цилиндрических и планарных реакторах. С увеличением Q от центра к краям планарного реактора (рис. 8, г) максимум плотности электронов, а следовательно, и ХАЧ сдвигается к краям электродов, изменяя равномерность травления.

Газовые добавки существенно изменяют скорости и селективность травления.

Добавка кислорода к фтороуглеродному соединению (например, CF_4) уменьшает концентрацию ненасыщенных фтороуглеродных частиц, способных полимеризоваться на поверхности Si или SiO_2 и замедляющих процесс травления. Увеличивающаяся при этом концентрация атомов F повышает скорость травления. Однако при дальнейшем увеличении концентрации O_2 (>40%) относительная концентрация атомов F снижается и увеличивается адсорбция атомов O на активных центрах поверхности материала, в результате чего скорость травления Si и SiO_2 снижается. Аналогичная картина наблюдается при добавке кислорода в плазму CCl_4 при травлении хрома.

Помимо изменения скорости травления добавка O_2 может существенно изменять селективность травления одного материала по отношению к другому. Добавка O_2 в плазму C_2F_6 вызывает резкое увеличение скорости травления поликремния (в 2–3 раза) и одновременно резко снижает (в 2–3 раза) скорость травления SiO_2 . Добавка кислорода в плазму CCl_4 при травлении ИП резко изменяет анизотропию, причем максимальный показатель анизотропии имеет место в том случае, когда в потоке CCl_4 имеется $\sim 40\%$ O_2 , после чего анизотропия снижается.

Добавка водорода в плазму фтороуглеродистых газов уменьшает концентрацию атомов F , а следовательно, увеличивает концентрацию склонных к полимеризации ненасыщенных фтороуглеродистых частиц. При значительной добавке H_2 можно превратить процесс травления материалов в плазме CF_4 или C_2F_6 в процессе осаждения полимерных пленок на их поверхности. Однако небольшие (до 30%) добавки H_2 , вызывая снижение скорости травления Si , не оказывают заметного влияния на скорость травления SiO_2 , что позволяет добиться высокой селективности. Добавка H_2 в плазму CCl_4 при травлении $GaAs$ резко снижает глубину нарушенного слоя.

Добавка азота (до 80%) в плазму CCl_4 при травлении Al устраняет осаждение пленки углерода, при этом скорость травления Al не только не снижается, но даже немного возрастает.

Добавка гелия (до 20%) в плазму CCl_4 не сопровождается существенным изменением процесса травления. Добавка He в плазму $CF_4 + O_2$ увеличивает селективность травления $Si_3N_4/SiO_2/Si$, которая может достигать значения 20:1 для Si_3N_4/SiO_2 и 13:1 для SiO_2/Si .

Добавка небольших количеств хлорсодержащих газов CF_2CF_2 , C_2F_5Cl , $CFCl_3$ в плазму SF_6 резко снижает величину подтрав под маску фоторезиста ($< 0,3$ мкм) при травлении поликремния. Добавка Cl_2 в плазму $CF_4 + Ar$ снижает глубину нарушенного слоя в $GaAs$. Добавка CF_3Br в плазму $CF_4 + 4\% O_2$ резко повышает селективность травления Si_3N_4/SiO_2 (это отношение достигает 25). При травлении материалов ионами Ar добавка H_2 почти не отражается на скорости травления, в то время как даже незначительная добавка O_2 резко снижает скорость травления Ti , $TiSi_2$, $MoSi_2$, Mo , не изменяя, по существу, скорость травления Si , поликремния, SiO_2 и $PtSi$.

Пары воды и кислородсодержащие газы, которые выделяются со стенок реактора и являются основными загрязняющими примесями многих рабочих газов, вносят неопределенность в процесс травления. Образующийся при этом тонкий слой естественного окисла на поверхности Al вызывают за-

держку начала травления Al , а также приводит к неоднородности и нестабильности самого процесса травления.

Наличие в объеме реактора тяжелых углеводородов, которые могут попасть в него в виде паров рабочих жидкостей из механического и диффузионного насосов, вызывает появление полимерных пленок и делает процесс травления невоспроизводимым. Появление тяжелых ионов Fe , Ni , Cr и других в результате воздействия плазмы на стенки реактора и детали внутрикамерных устройств являются причиной загрязнений подвергаемых травлению структур.

Ориентировочные расчеты показывают, что в типовых реакторах планарного типа, использующих коррозионно-стойкую сталь, алюминий и кварц, поток загрязняющих примесей в зависимости от степени очистки стенок реактора составляет от 5 до 50 $см^3/мин$. Снижение газовыделения со стенок реактора может быть достигнуто в результате длительной откачки влажного воздуха из камеры (в течение 2–3 часов) с одновременным прогревом ее стенок горячей водой, однако это резко снижает производительность оборудования, а поэтому неприемлемо в производственных условиях. Вместе с тем, изменение потока загрязняющих примесей от цикла к циклу делает невоспроизводимым процесс травления. Более того, появление в результате химических реакций на стенках реактора и внутренней оснастки пористых пленок и порошков, зачастую сильно гигроскопичных, может увеличить скорость удельного газовыделения еще в 5–10 раз, в результате чего поток загрязняющих примесей становится сопоставимым по величине с потоком основного рабочего газа.

Особенно чувствителен к наличию загрязняющих примесей Al , травление которого обычно производится в хлорсодержащей плазме и основано на образовании летучего соединения $AlCl_3$. Чистый хлор нельзя использовать, поскольку он не эффективен при удалении слоя естественного окисла Al_2O_3 , всегда присутствующего на поверхности Al . Поэтому для травления Al используют различные хлорсодержащие газы: BCl_3 , CCl_4 , $SiCl_4$, которые применяются в комбинации друг с другом или с другими газами (Ar , N_2 , He). Даже при наличии 5% влажности время, необходимое для удаления Al_2O_3 с поверхности Al составляет ~ 15 с. Это время резко возрастает при дальнейшем повышении влажности, что

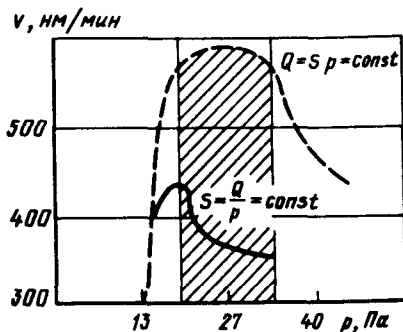


Рис. 10. Зависимость скорости травления Al в хлорсодержащем газе от давления при $S = const$ и $Q = const$

вносит неопределенность в процесс травления Al . Отсюда следует важный практический вывод о том, что

только применение шлюзов гарантирует защиту реакционной камеры от воздействия влажного атмосферного воздуха, делает процесс травления полностью управляемым и обеспечивает гибкость в выборе реакционных газов. Использование индивидуальной обработки пластин в рабочей камере малого объема позволяет резко сократить требуемую величину потока рабочего газа, что облегчает условия работы откачных средств.

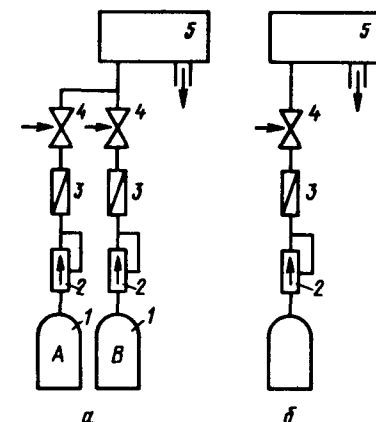
На рис. 10 представлено изменение скорости травления Al в хлорсодержащей плазме в зависимости от давления рабочего газа. Как видно из приведенных кривых, высокая и стабильная скорость травления может быть достигнута в том случае, если проводить процесс не при постоянной скорости откачки S , а при постоянной величине потока $Q = Sp$, регулируя скорость откачки насоса таким образом, чтобы работа осуществлялась в том диапазоне давлений и газовых потоков, в котором скорость травления имеет стабильную и высокую величину и практически не зависит от давления.

2.4. Поддержание требуемого состава рабочего газа

Поскольку состав рабочего газа или газовой смеси оказывает решающее влияние на основные параметры ВПТ (скорость, селективность, анизотропию, воспроизводимость и др.), то поддержание требуемого состава газовой смеси является важной практической задачей. На рис. 11 изображены две типичные газовые системы, обычно используемые в установках ВПТ. При исследовании зависимостей параметров трав-

Рис. 11. Схема газовых систем установок ВПТ с использованием двух источников газов (а) и одного источника со смесью газов (б):

1 - газовые баллоны; 2 - стабилизаторы давления; 3 - датчики измерения расхода газа; 4 - натекатели; 5 - рабочие камеры



ления от состава газовой смеси применяются газовые системы, в которых каждый газ проходит через отдельный датчик расхода (рис. 11, а). В производственных условиях чаще всего применяется газовая смесь постоянного состава, подаваемая в реактор с помощью упрощенной газовой системы (рис. 11, б). При этом необходимо, чтобы в объеме реактора состав газовой смеси, напуск которой производится с помощью как отдельной, так и упрощенной газовой системы, был полностью идентичен.

Для измерения давления и расхода газа обычно используются датчики на основе термосопротивлений. Показания этих датчиков зависят от рода газа. Поэтому для определения точного расхода необходимо использовать поправочные коэффициенты $\psi = Q / Q_H$, обеспечивающие одинаковые показатели датчиков расхода рабочего газа Q и нейтрального газа Q_H (например, азота). Величина ψ изменяется от 0,28 для SF_6 до 1,44 для Ar (для N_2 $\psi = 1$).

Зная поправочные коэффициенты для каждого компонента смеси (ψ_A, ψ_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 $Q_{см}^{пр} = Q_{см} / \psi_{см}$, то учитывая, что $Q_{см}^{пр} = Q_A^{пр} + Q_B^{пр}$, легко получить выражение для поправочного коэффициента смеси при незначительном различии в скоростях откачки газовых компонентов:

$$\frac{1}{\psi_{\text{см}}} = \frac{n_A}{\psi_A} + \frac{n_B}{\psi_B} + \dots,$$

где $n_A = p_A / (p_A + p_B + \dots)$; $n_B = p_B / (p_A + p_B + \dots)$ — относительное содержание компонентов, входящих в состав смеси в баллоне. С помощью этого выражения при известных газах, образующих смесь, и реальном расходе смеси можно определить ее состав в тех случаях, когда поправочные коэффициенты газов сильно отличаются друг от друга (например, CF_4 и O_2).

2.5. Повышение коэффициента использования рабочего газа и ресурса работы откачных средств

Отличительной особенностью ряда процессов ВПТ (РИПТ, ПХТ и др.) является большой поток рабочего газа \dot{V} (до 500 см³/мин), проходящий через объем реактора. В отличие от давления p_0 , которое в первую очередь определяет стабильное горение разряда, а при постоянной ВЧ мощности скорость генерации ХАЧ, величина \dot{V} определяет время пребывания ХАЧ обрабатываемой поверхности, а следовательно, скорость, равномерность и селективность травления материала. Увеличение газового потока в ряде случаев желательно потому, что при этом производится интенсивная "промывка" реактора, обеспечивающая снижение содержания загрязняющих примесей в рабочем газе. Последнее особенно необходимо при использовании установок периодического действия с непрогрываемыми камерами, поскольку в этом случае стенки, электроды, экраны и держатели подложек непрерывно выделяют газ, и поток загрязняющих газов достигает значительной величины.

С другой стороны, большой поток рабочего газа нежелателен из-за высокой стоимости большинства газов (в особенности фреонов сложного состава), резкого снижения ресурса работы механических насосов. Коэффициент использования рабочего газа, равный отношению скорости удаления атомов с поверхности подвергнутого травлению материала к потоку молекул рабочего газа на эту поверхность, обычно со-

ставляет менее 0,2. В противном случае в процессе травления происходит столь заметное изменение состава рабочего газа (в результате включения в него продуктов реакции), которое может вызывать существенное изменение скорости и селективности травления. Кроме того, при этом в ряде случаев может наблюдаться образование пленок на стенках рабочей камеры в результате разложения продуктов реакции (например, образование пленок кремния при разложении SiF_4).

Одним из возможных путей уменьшения расхода фреонов является разбавление их таким газом, у которого энергия возбужденных нестабильных атомов близка к энергии резонансного состояния молекул активного газа, способной вызвать их диссоциацию. При этом скорость генерации ХАЧ и, как следствие, скорость травления материала практически не изменяются. Так, например, бинарные газовые смеси, состоящие в основном из аргона (до 80%) и использующие в качестве добавки SF_6 , CHF_3 , Cl_2 или NF_3 , могут успешно применяться для травления Si и SiO_2 . Смесь Ar с NF_3 может быть использована также для травления GaAs , а смесь 70% N_2 и 30% CCl_4 может быть применена для травлений SiO_2 и Al .

Сохраняя неизменной скорость травления, бинарные газовые смеси в ряде случаев позволяют повысить селективность и анизотропию процесса. При этом одновременно увеличивается ресурс работы механических вакуумных насосов, сокращается расход вакуумного масла, увеличивается время между регламентными чистками реактора, снижается степень загрязнения атмосферы фреонами и продуктами процесса травления.

Кроме того, повышается безопасность условий работы обслуживающего персонала, в особенности при проведении регламентных чисток реактора. Дальнейшее повышение коэффициента использования рабочего газа может быть достигнуто путем создания замкнутых циклов с регенерацией и повторным использованием введенного в систему рабочего газа.

3. ОТКАЧНЫЕ СРЕДСТВА

3.1. Требования к откачным средствам

На выбор откачных средств определяющее влияние оказывают две особенности процессов вакуумно-плазменного осаждения и травления материалов:

1) необходимость работы в широком диапазоне давлений (от 10^{-3} до 10^3 Па);

2) необходимость откачки значительных потоков газов и продуктов реакций (до $500 \text{ см}^3/\text{мин}$), большинство из которых представляют собой агрессивные, токсичные, коррозионные, огнеопасные и пиррофорные соединения. Таким образом, если сравнительно недавно, когда приходилось в основном откачивать воздух и инертные газы (главным образом аргон), речь шла о физике вакуума, то в настоящее время ситуация коренным образом изменилась и первоочередное значение приобрели вопросы химии вакуума.

Получение требуемых характеристик процессов осаждения и травления предъявляет к откачным средствам целый ряд специфических трудновыполнимых и подчас противоречивых требований:

запуск от атмосферного давления при малой длительности пускового периода;

обеспечение постоянства скорости откачки насосов в широком диапазоне давлений;

создание остаточной среды, свободной от паров воды, кислорода, углеводородов;

обеспечение строгого постоянства компонентов газовой смеси в реакторе и величины газового потока;

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 производить откачку рабочего объема до высокого вакуума, а затем длительную "промывку" объема рабочим газом в том диапазоне давлений, в котором проводится технологический процесс. В этом случае значительно снижается стоимость вакуумной системы, но одновременно к насосу предъявляются

трудносовместимые требования: с одной стороны, – обеспечение низкого предельного давления, а с другой, – высокая производительность в условиях среднего и низкого вакуума.

3.2. Механические насосы с масляным уплотнением

Насосы этого типа чаще всего используются для реализации процессов, которые проводятся при давлении $10-10^3$ Па. При проведении процессов, требующих больших газовых потоков, предпочтение следует отдавать механическим насосам плунжерного типа. Кроме того, плунжерные насосы имеют большой объем резервуара с маслом, что позволяет примерно в 10 раз увеличить интервал времени между очередной сменой вакуумного масла. При откачке газов, вызывающих коррозию, возникает ряд специфических проблем. Части насоса, погруженные в масло и покрытые тонкой масляной пленкой, наименее подвержены коррозии. В то же время выпускной патрубков насоса и прилегающая к нему камера, в которой газ сжимается до давления, выше атмосферного, сильно корродируют. 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 являются инертными 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 пара при откачке влажного атмосферного воздуха, а также через газобалластный клапан, образует соляную кислоту, вызывающую коррозию деталей насоса, которая особенно интенсивна в межоперационный период.

Снижение вредного воздействия паров воды может быть достигнуто за счет:

введения в систему осушенных инертных газов, предпочтительно в зоне выхлопного отверстия насоса, в том числе подачи осушенного азота вместо воздуха в газобалластный клапан;

уменьшения потока химически активного газа путем разбавления его инертным газом или азотом;

слива масла из насоса и заполнение его объема осушенным азотом перед длительной остановкой.

При откачке фторсодержащих соединений (как и при откачке кислородсодержащих газов) коррозия конструкционных материалов не столь резко выражена по сравнению с хлорсодержащими газами, и основную роль здесь играют реакции, вызывающие образование в рабочих жидкостях органического происхождения суспензий, эмульсий и своеобразных гелей, состоящих из SiO_2 , HCl и продуктов разложения масла.

Наиболее радикальным средством, позволяющим длительно эксплуатировать насос, является замена масел, изготавливаемых из нефти, синтетическими маслами. Однако синтетические масла очень дорогие, и их использование не решает полностью проблемы коррозии. Поскольку между потоками инертной смазки и коррозионных веществ реакции не происходит, то загрязняющее вещество не нейтрализуется, и поэтому необходим фильтр с патроном из нейтрализующего или поглощающего вещества (активированный древесный уголь и другие сорбенты) для улавливания кислот, смол и других соединений. Использование фильтров с поглощающими или нейтрализующими патронами существенно упрощает обслуживание насосов и значительно повышает время использования масла без замены (в 20–25 раз).

Для повышения коррозионной стойкости масел нефтяного происхождения производят их повторную дистилляцию, освобождая при этом жидкость от тех компонентов, которые наименее стойки в среде повышенной коррозионной активности. Общепринятым стало также применение внешних систем фильтрации масла для удаления сгустков и снижения показателя кислотности, что повышает ресурс работы масла в 6–7 раз. 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 уменьшить парциальное давление веществ, вызывающих коррозию, и исключить накапливание этих веществ в масле. С этой целью целесообразно применять продувку системы нейтральными газами. Для того чтобы предотвратить конденсацию аг-

рессивных газов и паров в резервуаре с маслом, желательно использовать насос, нормально работающий при температуре 330–340 К. Для этого может быть использована газобалластная система (с присоединением ее к источнику нейтрального газа).

Для защиты насоса от пыли на входе в насос обычно устанавливают один или несколько фильтров. Для улавливания крупных образований (сгустков) применяются двухступенчатые фильтры с металлическими кольцами и масляным увлажнителем. Для улавливания более мелких частиц применяются фильтры из стекловолокна. Большая площадь поверхности фильтра позволяет увеличить ресурс его работы.

Таким образом, фильтрация масла выполняет несколько функций: улавливает попавшие в насос твердые частицы; задерживает смолы и продукты распада, образующиеся в результате воздействия кислот на масло; улавливает значительную часть попавших в насос кислот.

Для повышения коррозионной стойкости в настоящее время используются либо специальные конструкции насосов с применением инертных масел и их непрерывной фильтрацией и нейтрализацией, либо охлаждаемые азотные ловушки, устанавливаемые на впускном патрубке насоса, которые резко снижают давление газов, вызывающих коррозию. Основное различие между стандартными и коррозионностойкими насосами состоит в том, что в последнем случае применяются улучшенные химически стойкие материалы для внутренних деталей насоса, соприкасающихся с агрессивными средами, высококачественные эластомеры для создания уплотнений и специальные рабочие жидкости. Эти насосы требуют значительных капитальных затрат, но зато обеспечивают надежность и удобство при длительной эксплуатации. Поэтому их целесообразно применять в промышленных установках.

Использование охлаждаемых ловушек не требует больших капитальных затрат, но оно возможно только при условии устранения тех затруднений, которые возникают при регенерации ловушки. Давление хлорсодержащих газов резко снижается при использовании двухступенчатых ловушек, что позволяет довести до минимума количество хлорсодержащих соединений, попадающих в насос. Если охлаждаемые ловушки снабжаются средствами промывки в водном растворе, то в

этом случае в откачную систему необходимо добавить еще два клапана: один для впуска растворителя и другой для выпуска вытекающего потока жидкости. Однако следует помнить, что применение водных растворов вызывает сильную коррозию, и поэтому они могут использоваться только в случае крайней необходимости.

При использовании фторсодержащих соединений вымораживающие азотные ловушки малоэффективны. Уже после нескольких циклов травления ловушки перестают задерживать продукты реакции, что, по-видимому, связано со значительно более низкими температурами кипения откачиваемых фторсодержащих соединений по сравнению с хлорсодержащими. К числу агрессивных газов, которые плохо задерживаются азотными ловушками, относится большинство фторсодержащих соединений, а также пары HCl . Малая эффективность азотных ловушек ставит под сомнение целесообразность их использования при проведении процессов во фторсодержащих газах.

Выпускная магистраль обычно использует фильтры со сквозным потоком, которые предназначены для улавливания ядовитых веществ, а также веществ, вызывающих коррозию. Кроме того, фильтры позволяют улавливать пары рабочей жидкости, обеспечивая тем самым возможность ее повторного использования. В случае засорения патрона фильтр будет автоматически перепускать выходящий из насоса газ, предотвращая тем самым возможность взрыва (который возможен в том случае, если давление в герметичной системе превысит допустимую величину). Для предотвращения опасности взрыва следует не допускать:

накопления в насосе взрывоопасной смеси, присоединяя камеру сжатия насоса к форвакуумному трубопроводу нейтрального сухого газа (например N_2) с давлением 10 Па и пропускной способностью 1–5 л/мин² (при нормальных температуре и давлении);

случайного попадания кислорода (за счет исключения газобалластного клапана или подсоединения его к источнику азота);

быстрого размораживания ловушек с жидким азотом на впускном клапане насоса.

При присоединении выпускного трубопровода необходимо выполнять следующие правила;

диаметр трубопровода должен быть по крайней мере равен диаметру выхлопного отверстия насоса. Как показывает опыт эксплуатации систем ВПТ, в ряде случаев реакция заканчивается в выхлопном трубопроводе, вызывая отложение осадков в трубопроводе и тем самым уменьшая его внутренний диаметр. Засорение трубопровода снижает его пропускную способность и вызывает повышение давления в насосе, в результате чего увеличивается конденсация вредных веществ в насосе и сокращается срок его службы;

на выходе насоса должен быть установлен бачок для слива конденсата;

использование маслоуловителя должно быть исключено, 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, величину его потока и вызывая появление пузырьков газа.

Совершенно недопустимо использование стандартных маслоуловителей в том случае, если производится откачка воспламеняющихся газов или кислорода, поскольку фильтрующий патрон может воспламениться. Твердые или пастообразные осадки на патроне уменьшают проводимость фильтра. При этом избыточное давление в камере насоса возрастает, и должен открыться 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.

3.3. Двухроторные вакуумные насосы (ДВН)

Поскольку общей тенденцией развития процессов осаждения и травления является увеличение газового потока и уменьшение рабочего давления, то в ряде случаев даже двухступенчатые насосы плунжерного типа с масляным уплотнением не в состоянии обеспечить требуемого режима

откачки систем ПХТ и РИПТ. Вследствие этого все чаще начинают использоваться ДВН (или насосы Рутса). В установках для РИПТ зачастую используют два последовательно соединенных ДВН. 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.

Использование ДВН обеспечивает как высокую производительность, так и работу в требуемом диапазоне давлений. Для ДВН практически отсутствуют проблемы коррозии, поскольку откачиваемые газы быстро проходят через насос при достаточно низком давлении, вследствие чего скорости реакции очень малы. Герметичность ДВН может быть очень высокой, особенно если используются индукционные двигатели, находящиеся в вакууме и не требующие вводов движения. ДВН обеспечивает снижение обратного потока паров рабочей жидкости из форвакуумного насоса как вследствие увеличения давления на входе в форвакуумный насос при установившемся вязкостном течении газа, так и вследствие высокого коэффициента сжатия углеводородов (~ 200), уменьшающего во столько же раз их парциальное давление. Поскольку допуски на внутренние движущиеся части ДВН достаточно велики (0,1–0,3 мм), эти насосы могут откачивать газы, содержащие пыль и мелкодисперсные частицы. Последние могут возникать, например, при травлении сплава $Al-Si-Cu$, поскольку медь не образует легколетучих газообразных соединений.

3.4. Диффузионные паромасляные насосы

Диффузионные паромасляные насосы, являющиеся наиболее дешевыми и надежно работающими откачными средствами, не имеющими резко выраженной селективности при откачке газовых смесей, используются как для предварительной высоковакуумной откачки рабочих объемов реакторов, так и для реализации процессов ВПТ, проводимых при давлении $p \ll 10$ Па.

При переходе от режима предварительной высоковакуумной откачки объема реактора ($p = 10^{-3}$ – 10^{-4} Па) к рабочему режиму ($p = 10^{-1}$ – 10 Па) существенное значение име-

ет правильный выбор места дросселирования газового потока. В некоторых случаях дросселирование осуществляется частичным перекрытием затвора, расположенного 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 непрогрываемых установках периодического действия являются пары воды (до 70–90%), то дросселирование потока надо делать ниже азотной ловушки. Реализация такого способа дросселирования возможна в том случае, если непосредственно над впускным патрубком насоса установить тонкостенную перегородку 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:

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 путем 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 неточности регулирования оператором потока газа при перекрытии затвора.

Основной тенденцией развития откачных систем на базе диффузионных насосов является создание комплексных систем, содержащих в одном блоке наряду с насосом также и другие элементы – клапаны, экраны, ловушки. При этом уменьшаются габаритные размеры и число разборных соединений, использующих эластомерные уплотнения, что позволяет улуч-

шить такой важный параметр, как предельный вакуум насоса. Следует иметь в виду, что большинство диффузионных насосов содержат сварные соединения, полученные с использованием припоев из различных цветных металлов, которые подвержены сильной коррозии. Высокая температура пара и рабочей жидкости в кипятильнике насоса повышает скорость коррозии и может быть одной из причин быстрого выхода его из строя.

3.5. Турбомолекулярные насосы (ТМН)

Характерной особенностью ТМН является постоянство скорости откачки в широком диапазоне давлений (10^{-1} – 10^{-6} Па), очень малые зазоры между пластинами ротора и статора. Поэтому ТМН могут быть использованы только в том случае, если при проведении технологического процесса не образуются вредные мелкодисперсные продукты.

Одним из основных параметров ТМН является степень сжатия газа, которая зависит от молекулярного веса откачиваемого газа и геометрической формы каналов в дисках статора и ротора, а также от окружности скорости вращения дисков ротора. 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 масс, характерных для тяжелых газов, и в первую очередь для углеводородов. При определенных соотношениях давлений в случае откачки смеси газов могут одновременно существовать два противоположных потока тяжелых и легких газов. Поэтому можно считать, что ТМН является своеобразным "газоразделительным устройством", эффективно откачивающим тяжелые газы и в то же время сохраняющим на определенном уровне давление кислорода. Для того чтобы снизить давление водорода в рабочем объеме установки, на выходе ТМН необходимо иметь форвакуумный насос большой производительности, причем соотношение скоростей откачки ТМН и механического насоса должно быть не выше 20:1. Кроме того, для увеличения эффективности откачки паров воды целесообразно на входе в ТМН устанавливать ловушку, охлаждаемую жидким

азотом. Последняя может выполнять также роль дросселя, снижающего давление на входе в ТМН, что также необходимо для предотвращения торможения дисков ротора ТМН при $p \gg 10^{-1}$ Па, следствием чего может являться неустойчивость быстроты действия насоса. При выполнении перечисленных требований ТМН может стабильно работать в области среднего вакуума при значительных потоках газа.

При давлениях 10^{-2} Па откачка коррозионных, воспламеняющихся, взрывоопасных и токсичных газов менее проблематична. Дело в том, что при столь малых давлениях скорость процесса коррозии замедляется, а количество откачиваемого газа ничтожно мало и в редких случаях создает взрывоопасную или пожароопасную ситуацию. Однако необходимо учитывать специфику работы ТМН, высокоскоростные роторы которых вращаются в шариковых подшипниках, смазываемых маслами. Стандартные масла имеют минеральную основу, состоящую из углеводородных цепочек с большим содержанием водорода. Коррозионные газы могут разрушать эти углеводородные цепочки, в результате чего масла теряют свои смазывающие свойства, и подшипники при отсутствии смазки могут быстро выйти из строя. Эта проблема может быть решена путем замены 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. Эти эфиры примерно в 100 раз дороже обычных минеральных масел, однако большинство ТМН нуждаются в очень небольшом количестве масла для подшипников, в связи с чем применение дорогостоящих эфиров для ТМН вполне целесообразно. Основной проблемой в ТМН является коррозионная стойкость масла или консистентной смазки, используемых в качестве смазочного материала для высокоскоростных шариковых подшипников, а также коррозионная стойкость материалов, используемых для изготовления шпинделя (особенно к хлорсодержащим продуктам). Если не применять специальных мер к улучшению надежности шариковых подшипников и системы смазки, то насос может выйти из строя через 30–40 циклов.

3.6. Крионасосы

Крионасосы обладают наиболее широким диапазоном рабочих давлений по сравнению со всеми другими видами вакуумных насосов, поскольку могут начинать работу с давления откачиваемого газа в тройной точке, когда обеспечивается превращение газа в твердую фазу, минуя жидкое состояние. Так, например, при условии обеспечения требуемой температуры криопанели можно откачивать газы, начиная со следующих величин давления (в Па): $O_2 - 146$, $H_2O - 560$, $H_2 - 7,2 \cdot 10^3$, $N_2 - 1,2 \cdot 10^4$, $Ar - 1,5 \cdot 10^4$. По сравнению с другими видами откачных средств, крионасосы имеют наиболее низкие энергетические затраты на единицу скорости откачки вплоть до давлений 100–1000 Па (при больших давлениях из-за увеличения энергозатрат применение крионасосов становится нецелесообразным). Для достижения эффективной откачки низкипящих газов (гелий, водород, неон) оказалось рациональным снабжать крионасосы двумя криопанелями: внешней (называемой первой ступенью) – с температурой $\sim 70-80$ К, – предназначенной для откачки высококипящих газов (в основном паров H_2O , CO , углеводородов) и внутренней (называемой второй ступенью) с температурой ~ 20 К, основное назначение которой – откачка низкокипящих газов. Кроме того, входной фланец насоса закрывают азотной ловушкой жалюзийного типа, предназначенной для откачки водяных паров. С экономической точки зрения целесообразно охлаждать криопанель второй ступени до 20 К, поскольку такой процесс 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 либо активировать криопанель, либо применять дополнительный геттерно-ионный насос. Для эффективной работы крионасоса очень важно соотношение мощностей хладопроизводительности обеих ступеней откачки. Так, например, если мощность первой ступени недостаточна для быстрой откачки высококипящих газов, то последние станут конденсироваться на второй ступени, что снизит эффективность откачки низкокипящих газов. С другой стороны, если мощность первой ступени чрезмерно велика, то снижается экономичность насоса. Для современных крионасосов, используемых для про-

цессов ПХТ, хладопроизводительность первой ступени 50 Вт, а второй – 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 сконденсированный на криопанели слой газа представляет собой своеобразный "слоеный пирог": нижний слой состоит из смеси многих компонентов, а верхний – преимущественно из H_2O . Следует отметить, что температура замерзания подавляющего большинства хладонов лежит в диапазоне 170–80 К, в связи с чем они в основном конденсируются на криопанели первой ступени. Поскольку многие процессы травления проводятся при давлении $10-10^3$ Па, то криоконденсат имеет рыхлую структуру и насос может эффективно работать даже при значительной толщине криоконденсата благодаря явлению криозахвата. Этому способствует также то обстоятельство, что коэффициент захвата (отношение числа молекул, захваченных криопанелью, к общему числу молекул, падающих на криопанель) для хладонов (CF_2Cl_2 , CH_2Cl_2 , $CHCl_3$ и др.) даже при температуре криопанели 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 лишь на 1–2 К (что наблюдается при большой нагрузке на первую ступень) скорость откачки низкокипящих газов резко 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).

Регенерация крионасоса производится путем его постепенного разогрева под откачкой механическим насосом с масляным уплотнением. Поскольку в криоосадке обычно присутствует значительное количество паров воды, то чтобы не допустить насыщения ими ловушки, на механическом насосе откачку следует вести через перепускной клапан. При работе с крионасосами следует соблюдать правила техники безопасности. Поскольку крионасос накапливает на криопанелях значительное количество сконденсированных газов, быстрый его нагрев, который возможен, например, при неожиданном отключении или выходе из строя криогенератора, может вызвать аварию. Так, например, если насос объемом около 10 л (распространенный вариант), на криопанелях которого сконденсировано $5 \cdot 10^5$ см³ газа, быстро нагревать, то давление в нем может достигнуть 5 МПа, и он может взорваться. Для предупреждения взрыва 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. Конденсация на криопанелях большого количества токсичных веществ (HCl, HBr, HF, Cl₂, AsCl₃, AsF₃, BF₃, SiF₄ и др.) при проведении процессов ВПТ требует особенно внимательного соблюдения мер предосторожности при регенерации крионасосов.

3.7. Откачные системы

Реализация процессов, в которых используются агрессивные, токсичные и взрывоопасные газы, производится в установках периодического, полунепрерывного и непрерывного действия, что существенно влияет на построение откачной системы. В установках периодического действия целесооб-

разно использовать две отдельные магистрали: одну для откачки воздуха из реактора с помощью диффузионного насоса, другую – для откачки технологических газов с помощью двухроторного и механического насоса с масляным уплотнителем. Использование отдельных магистралей и двух механических насосов с масляным уплотнением (один из которых подключен к диффузионному, а другой – к двухроторному насосу) предотвращает одновременное попадание водяных паров и агрессивных газов в один и тот же насос, что существенно повышает срок службы каждого насоса.

В установке непрерывного действия целесообразно использовать три отдельные магистрали: первую для откачки с помощью механического насоса вспомогательных камер и шлюзовых устройств для загрузки и выгрузки изделий, вторую для высоковакуумной откачки с помощью диффузионного насоса вспомогательных камер и третью для непрерывной откачки рабочих газов с помощью азотной ловушки, двух последовательно включенных двухроторных насосов и механического насоса. Помимо правильной компоновки откачной системы, существенное значение имеет выбор конструкционных материалов. Поскольку практически не существует материала, стойкого к любой форме коррозии, то наилучшей защитой от коррозии системы в целом является гибкость в решении различных возникающих при этом проблем и поддержание чистоты масла в механическом насосе.

Прежде всего следует исключить из реактора и откачной системы детали, изготовленные из меди и ее сплавов (медные трубки, латунные и бронзовые детали, а также мягкие металлы (олово, свинец) и сплавы на их основе. Особое внимание следует обратить на сварные соединения и швы, полученные пайкой твердыми припоями. Следует иметь в виду, что в присутствии радикалов фтора и водяных паров покрытия из фторопласта (тефлона), используемые для защиты некоторых насосов, могут разрушаться. Фтор также разрушает материалы, содержащие кремний или окись кремния, что в первую очередь относится к стеклу, используемому в окнах для наблюдения за уровнем масла в насосах. Кроме того, стекло применяется в качестве фильтрующих элементов, а также в маслоуловителях, где фтор в присутствии водяных паров значительно ускоряет химические реакции.

В то же время в системах, использующих хлор и его соединения (например CCl_4), предпочтение следует отдавать эластомерам на основе кремния, а также витону типа А (витон типа В быстро разрушается в присутствии хлора). Несмотря на то, что газопроницаемость эластомеров на основе кремния несколько выше по сравнению с витоном, все же им следует отдавать предпочтение при работе с хлорсодержащими соединениями. При этом особое внимание следует уделять качеству уплотнения трубопроводов на выходе из насоса. Коррозионно-стойкая сталь интенсивно разрушается в присутствии хлорсодержащих соединений из-за междолинной коррозии, вследствие чего следует по возможности ограничить ее использование для выхлопных трубопроводов механических насосов.

Время технического обслуживания вакуумной установки может быть значительно сокращено подбором соответствующих фильтров, рабочих жидкостей для насосов и систем для их очистки, а также материалов для изготовления электродов, экранов и стенок реактора. Правильное сочетание всех этих компонентов может обеспечить длительное время безаварийного функционирования системы в целом и существенно уменьшить опасности, связанные с использованием агрессивных, токсичных и взрывоопасных газов.

3.8. Специфические свойства рабочих газов

При работе с газами следует учитывать, что они занимают одно из первых мест среди потенциально опасных химических веществ и материалов, используемых в производстве СБИС. Наибольшую угрозу представляют газы, которые могут самовоспламениться или окисляться, поскольку они могут вызвать взрывы и пожары. 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. Так, например, аммиак при транспортировке не огнеопасен, но будет гореть в воздухе при его концентрациях $> 16\%$. Окислители или газы, насыщенные кислородом, могут явиться причиной многих пожаров при их соединениях с горючими смесями.

Влияние второстепенных компонентов необходимо рассматривать с учетом их концентрации в смеси. Так, например, газ, состоящий из $1\% N_2$ и $99\% W_2$, не образует огнеопасной смеси. Однако, если N_2 составляет 5% от объема смеси, а $N_2 - 95\%$, то уже образуется огнеопасная смесь. Кроме того, даже 1% -ная смесь N_2 с 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. Так, например, безводный фтористый водород (HF) может вызвать смертельный исход при ожоге лица в том случае, когда обожжено всего лишь $2,5\%$ поверхности лица. В то же время многие газы, используемые при травлении, содержат HF или могут образовывать его в результате химических реакций.

Высокотоксичные газы, такие, как арсин (AsH_3), воздействуют на организм как яды гемолитического действия (вызывают замещение кислорода в крови), другие газы, например фосфин, воздействуют на систему дыхания. Следует отметить, что фтороуглероды, считавшиеся ранее нетоксичными, также могут оказывать тот или иной токсический эффект. Целый ряд газов обладает как токсическими, так и коррозионными свойствами. К этим газам в первую очередь относятся хлор и его соединения (Cl_2 , HCl , CH_2Cl_2 , $CClF_3$, BCl_3 , C_2ClF_5 , SiH_2Cl_2 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 . Однако в хлорсодержащих газах, которые не достаточно хорошо очищены, может присутствовать значительное число высокотоксичных примесей. Так, например, в BCl_3 со степенью очистки $99,999\%$ содержится $10^{-4}\%$ фосгена ($COCl_2$) однако чаще всего на практике используется BCl_3 со степенью очистки $99,9\%$, в котором содержится $1,5 \cdot 10^{-2}\%$ фосгена. Помимо фосгена при проведении ряда технологических процессов могут образовываться и другие газы и соединения, оказывающие отравляющее, удушающее и раздражающее действия на организм человека (например, фтор, арсин

AsH_3 , треххлористый мышьяк $AsCl_3$, пятифтористый мышьяк AsF_5 , трехфтористый бор BF_3 , четыреххлористый кремний $SiCl_4$, пятифтористый вольфрам WF_5 , шестифтористый молибден MoF_6 , фтористый водород HF , окись углерода CO , трехфтористый азот NF_3 , окись азота NO , сероводород H_2S и др.). Помимо газов применяются пары токсичных жидкостей. Так, например, тетрахлорсилан $SiHCl_3$ – воспламеняющаяся бесцветная жидкость с удушливым запахом, вызывающая коррозию; тетрахлорид кремния $SiCl_4$ – сильнотоксичная дымящаяся жидкость, вызывающая коррозию.

В результате химических реакций помимо самих исходных газов, паров и жидкостей могут образовываться окислы, галлоиды, гидриды, гидроокиси, а также металлоорганические соединения, многие из которых обладают взрывоопасностью, агрессивностью и токсичностью. Наиболее важными являются два мероприятия. Во-первых, защита от вредных веществ, отделяющихся от внутренних стенок реактора, а также защита от пыли и токсичных частиц, образующихся при напуске воздуха во время загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий. Во-вторых, меры предосторожности, необходимые при монтаже и регламентной чистке, в том числе при очистке деталей внутрикамерной оснастки различными кислотами.

Большинство токсичных веществ попадают в организм человека через дыхательные пути или проникают через кожу, хотя последнее менее характерно для полупроводникового производства. 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 может заглатываться со слизью и попадать в систему органов пищеварения. Пары многих веществ, состоящие из мелкодисперсных частиц размером около 0,3 мкм, оказывают очень сильное воздействие на дыхательную систему. Соединения мышьяка, например треххлористый мышьяк $AsCl_3$, являющийся маслянистой жидкостью с температурой кипения $403,4^\circ C$, оказывает при испарении воздействие на глаза и дыхательную систему, а при попадании на кожу может проникнуть в кровь. Самым токсичным из всех соедине-

ний бора является гидрид бора, воздействующий на органы дыхания. Диборан (B_2H_6) оказывает сильное воздействие на легкие. Пентаборан (B_5H_9) и декаборан ($B_{10}H_{14}$) воздействуют на центральную нервную систему, кроме того, декаборан вызывает отравление, проникая в кровь через кожу. Характерно, что такой сильно отравляющий газ как арсин AsH_3 , сохраняет свою токсичность даже после перехода в окисные соединения.

Необходимо соблюдать осторожность при замене масла и чистке вакуумных насосов, поскольку некоторые газы и продукты их разложения сохраняют свою токсичность даже после попадания в вакуумное масло. Безопасность работы с газами и жидкостями может быть обеспечена только в том случае, когда производственный персонал полностью осведомлен об их свойствах (воспламеняемости, летучести, токсичности и степени воздействия на человеческий организм) и приняты все необходимые меры по технике безопасности и охране труда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным видом вакуумного оборудования для плазмохимического осаждения и травления материалов являются установки периодического действия для групповой обработки пластин. В этих установках в течение первого часа откачки поток примесей (в основном паров воды) за счет газовыделения со стенок зачастую сопоставим с потоком рабочего газа. Естественно, это изменение потока загрязняющих примесей от цикла к циклу будет влиять на характеристики процесса осаждения и травления материалов, делая их по существу, невозпроизводимыми.

Необходимость поддержания постоянства газового состава в рабочей камере в течение всего периода эксплуатации установки показывает целесообразность перехода от установок периодического действия к установкам полунепрерывного и непрерывного действия, использующим способ кассетной шлюзовой загрузки и выгрузки дорогостоящих пластин большого диаметра, исключая контакт оператора с пластина-

ми в процессе их технологической обработки. Индивидуальная обработка небольшой партии помещаемых в кассету пластин (а в некоторых случаях каждой пластины в отдельности) позволяет повысить эффективность использования энергии и реагентов и увеличить выход годных ИС за счет более воспроизводимых и контролируемых условий обработки в рабочих камерах малого объема. Расчеты показывают, что если при диаметре пластин 100 мм системы непрерывного и периодического действия сопоставимы по производительности, то при переходе к пластинам диаметром 150 мм они на 30–50% превосходят последние.

Процессы индивидуальной обработки пластин большого диаметра в установках непрерывного действия обладают следующими достоинствами:

позволяют легче реализовать нетермическую активацию технологических процессов и последующую интеграцию этих процессов;

в значительной мере снижают ограничения по выбору конструкционных материалов;

легче поддаются автоматизации и механизации и легко встраиваются в состав автоматической поточной линии;

более подходят для мобильной перестройки при многономенклатурном производстве интегральных схем;

позволяют изменять пространственное расположение пластин в процессе их обработки, что в ряде случаев способствует снижению дефектности;

обеспечивают более высокий коэффициент использования оборудования, ритмичность производства и равномерное потребление электроэнергии.

Кроме того, оборудование для индивидуальной обработки пластин занимает меньше места, чем при групповой обработке, и легче встраивается в чистые комнаты.

Однако не следует забывать, что при индивидуальной обработке пластин оборудование работает в более интенсивном режиме и требует более высокой надежности на единицу продукции. Кроме того, при этом увеличивается интенсивность теплового и радиационного воздействий на обрабатываемые пластины (например, при использовании высокоинтенсивного магнетронного метода травления материалов). При индивидуальной транспортировке пластин интенсивность работы меха-

низмов 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 и мало надежны в эксплуатации и могут стать аккумуляторами пыли. По-видимому, в настоящее время наиболее вероятными транспортными средствами являются конвейер, робот и закрытая система с лиминарным потоком газа, сопрягаемая с вакуумными шлюзами. Существенные трудности возникают также в унификации устройств загрузки-выгрузки и при объединении в линию установок, значительно отличающихся по производительности. Вопрос надежности и гибкости связи между отдельными установками приобретает в этом случае первоочередное значение.

Последние годы характеризуются расширением области применения низкотемпературной плазмы для различных процессов получения, нанесения, травления, очистки и модификации материалов и структур, необходимых для изготовления интегральных схем. Однако следует иметь в виду, что процессы, для проведения и активации которых используются высокоэнергетические частицы, не всегда могут быть применены при изготовлении интегральных схем. В тех случаях, когда недопустимо радиационное воздействие на обрабатываемые структуры, предпочтение следует отдавать фотонно-стимулированным процессам, не вызывающим радиационные нарушения структуры. Поэтому в настоящее время ведутся интенсивные исследования возможности использования лазеров в технологии интегральных схем.

Повышение уровня интеграции и, как следствие, прецизионности обработки ИС предъявляют очень жесткие требования к чистоте и обеспыленности производственных помещений. Основными источниками загрязнений 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 комбинезонах в условиях искусственного климата. При этом имеет место парадоксальная ситуация, при

которой для обработки пластин, объем которых составляет всего лишь сотни кубических сантиметров, приходится строить помещения объемом в несколько тысяч кубометров, обеспечивая в них обеспыленность и условия вакуумной гигиены, в которых не нуждается ни используемое оборудование, ни тем более ее обслуживающий персонал.

Наиболее реальный выход из создавшейся ситуации – соединение всех рабочих камер с помощью вспомогательных промежутков, заполненных очищенными инертными газами или же находящимися под вакуумом. В любом случае в этих промежутках могут быть обеспечены стерильные условия, которые на несколько порядков выше тех, которые имеют место в самых чистых комнатах. При этом оборудование может быть установлено в обычном помещении, в котором без всяких комбинезонов может находиться также обслуживающий персонал, обеспечивающий с помощью механических манипуляторов перемещение пластин и осуществляющий контроль за ходом всего технологического процесса.

Создание небольших по величине замкнутых технологических объемов значительно дешевле и доступнее строительства и эксплуатации громоздких гермозон с искусственным климатом. Естественно, что на сегодняшний день далеко не все операции можно проводить в этих замкнутых объемах (например, много еще придется поработать над литографией). Однако реализация этого принципа построения технологической базы позволяет решать важнейшие научно-технические задачи сравнительно малыми коллективами и, безусловно, окажет сильное стимулирующее воздействие на дальнейшее развитие интегральной электроники, расширив сферы ее использования.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем основные преимущества реакторов с пониженным давлением?
2. Какие материалы получают в реакторах с пониженным давлением? Какие при этом используются газы и газовые смеси?
3. Какие типы и конструкции установок используют для осаждения материалов из газовой фазы при пониженном давлении?
4. Какова роль газоразрядной плазмы в процессе осаждения пленок из газовой фазы при пониженном давлении?
5. Перечислите три основных вида процессов вакуумно-плазменного травления материалов.
6. Какие основные параметры характеризуют процессы вакуумно-плазменного травления материалов?
7. Какие газы и газовые смеси применяются для вакуумно-плазменного травления материалов?
8. Какие основные факторы влияют на параметры процесса травления?
9. Каким путем можно повысить коэффициент полезного использования рабочего газа?
10. Какие требования предъявляются к откачным средствам для реализации процессов вакуумно-плазменного осаждения и травления материалов?
11. В чем специфика использования механических насосов с масляным уплотнением при откачке плазмохимических реакторов?
12. В чем специфика использования крионасосов при откачке плазмохимических реакторов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуумная техника: Справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Г. Александрова и др.; Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1985. 360 с.
2. Васильев В.Ю., Сухов М.С. Аппаратура и методы осаждения слоев при пониженном давлении. Обзоры по электронной технике. ЦНИИ "Электроника". Сер. 7: Технология, организация производства и оборудования, 1985, ч. 1, вып. 3 (1087), 56 с., ч. II, вып. 4 (1088). 52 с.
3. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. М.: Советское радио, 1979. 104 с.
4. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для очистки и травления материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 367 с.
5. Данилин Б.С. Вакуумно-технические проблемы изготовления сверхбольших интегральных схем. Сборник "Итоги науки и техники", сер. Электроника. М.: ВИНТИ. 1986, т. 18. С. 133-183.
6. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Вакуумно-технические проблемы ионного, ионно-химического и плазмохимического травления микроструктур. Обзоры по электронной технике. ЦНИИ "Электроника". Сер. 3: Микроэлектроника, 1984, вып. 5 (1050). 55 с.
7. Киреев В.Ю., Данилин Б.С., Кузнецов В.Н. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. М.: Радио и связь, 1983. 126 с.
8. Минайчев В.Е. Вакуумные крионасосы. М.: Энергия, 1978. 150 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Плазмохимическое осаждение при пониженном давлении	5
1.1. Основные принципы метода	5
1.2. Получаемые материалы и используемые газы	9
1.3. Типы и конструкции реакторов и установок	14
1.4. Влияние различных факторов на параметры процесса осаждения	19
2. Вакуумно-плазменное травление	23
2.1. Классификация процессов вакуумно-плазменного травления (ВПТ)	23
2.2. Типы и конструкции установок для ВПТ	34
2.3. Влияние различных факторов на параметры процесса травления	38
2.4. Поддержание требуемого состава рабочего газа	44
2.5. Повышение коэффициента использования рабочего газа и ресурса работы откачных средств	46
3. Откачные средства	48
3.1. Требования к откачным средствам	48
3.2. Механические насосы с масляным уплотнением	49
3.3. Двухторные вакуумные насосы (ДВН)	53
3.4. Диффузионные паромасляные насосы	54
3.5. Турбомолекулярные насосы (ТМН)	56
3.6. Крионасосы	58
3.7. Откачные системы	60
3.8. Специфические свойства рабочих газов	62
Заключение	65
Вопросы для самопроверки	69
Список литературы	70

Борис Степанович ДАНИЛИН

ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И ОБОРУДОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Редактор Н.А. Педченец
Художественный редактор В.В. Лебедев
Технический редактор Н.В. Павлова
Корректор П.В. Нерода

Н/К

Сдано в набор 9.01.87. Подписано в печать 8.05.87.
Т-11939. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная № 2.
Ротапринт. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,19.
Усл. кр.-отт. 4,40. Уч.-изд. л. 3,52. Тираж 1500 экз.
Заказ 1629 Бесплатно

Ордена Трудового Красного Знамени издательство
"Машиностроение", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Отпечатано в Московской типографии № 9 Союзполиграф-
прома при Государственном комитете СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
109033, Москва, Волочаевская ул., 40, с оригинала-макета,
изготовленного в издательстве "Машиностроение" на
наборно-пишущих машинах