

Б.С.ДАНИЛИН
В.К.СЫРЧИН

МАГНЕТРОННЫЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1982

ББК 32.85
Д18
УДК 621.38

Данилин Б. С., Сырчин В. К.
Д18 **Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь; 1982. — 72 с., ил.**

25 к.

Рассматриваются принцип действия и конструкции магнетронных распылительных систем, их рабочие характеристики, принципы конструирования и расчета, а также применение магнетронных распылительных систем в полупроводниковом производстве и ряде других областей, в которых используются пленочные покрытия. Описывается получение с помощью магнетронных распылительных систем проводящих, резистивных, сверхпроводящих, магнитных, диэлектрических, оптических и других пленок.

Для специалистов, занимающихся разработкой и производством изделий электронной техники.

Д 2403000000—031 78—82
(046)01—82

ББК 32.85
6Ф0.3

РЕЦЕНЗЕНТ К. И. МАРТЮШОВ

Редакция литературы по конструированию и технологии
производства радиоэлектронной аппаратуры

Борис Степанович Данилин
Владимир Кимович Сырчин

Магнетронные распылительные системы

Редактор С. И. Баранова
Редактор издательства Н. К. Калининна
Обложка художника Л. В. Брылева
Художественный редактор Л. Н. Сильянов
Технический редактор Л. К. Грачева
Корректор З. Г. Галушкина
ИБ № 129

Сдано в набор 2.11.81 г. Подписано в печать 15.12.81 г.
Т-30526 Формат 60×90/16 Бумага кн.-журн. Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 4,5 Усл. кр.-отт. 4,875 Уч.-изд. л. 5,34 Тираж 3100 экз.
Изд. № 19419 Зак. № 149 Цена 25 к.
Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь» Госкомиздата СССР
101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

© Издательство «Радио и связь», 1982.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Еще сравнительно недавно основным методом нанесения тонкопленочных покрытий были испарение и конденсация веществ в высоком вакууме. Методы ионного распыления материалов вследствие низких скоростей осаждения и высоких радиационных воздействий на обрабатываемые структуры использовались ограниченно. Появившиеся сравнительно недавно магнетронные распылительные системы, позволяющие наносить как тонкопленочные слои, так и пленочные покрытия толщиной в сотни микрон, позволили существенно расширить область применения ионного распыления материалов.

В последние годы в нашей стране и за рубежом проведены научные исследования и конструктивно-технологические разработки по созданию широкого класса магнетронных распылительных систем, а также установок и линий (в том числе непрерывного действия) на их основе. Однако в публикациях по этим вопросам по существу не отражены вопросы проектирования и расчета основных параметров магнетронных распылителей, в то время как такие сведения совершенно необходимы инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием, производством и эксплуатацией этих систем.

Данная книга является первой попыткой восполнить этот пробел. Авторы полагают, что она будет полезным пособием для работников электронной и других отраслей промышленности, которым в своей практической деятельности приходится иметь дело с различными аспектами пленочной технологии.

Особую благодарность авторы выражают рецензенту заслуженному деятелю науки и техники РСФСР проф. К. И. Мартюшову за позитивную критику, которая позволила существенно дополнить и улучшить содержание книги.

В заключение считаем своим приятным долгом выразить глубокую признательность коллегам по работе, совместно с которыми были опубликованы статьи, приведенные в списке литературы.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Эффект увеличения ионного тока в тлеющем разряде в результате воздействия магнитного поля, обнаруженный Пеннингом в 1936 г., послужил толчком для начала работ по изучению влияния магнитного поля на самостоятельный разряд низкого давления. Проведенные в конце 50-х и начале 60-х годов исследования советских и зарубежных ученых явились по существу предпосылкой для создания магнитных электроразрядных насосов и вакуумметров.

Новый интерес к явлениям, происходящим в скрещенных электрическом и магнитном полях, возник в связи с развитием работ по созданию плазменных источников ионов [1]. Было установлено, что в таких системах в результате дрейфа электронов возникает холловский ток, величина которого практически не зависит от давления, в то время как разрядный ток сильно возрастает с увеличением давления и приложенного к разрядному промежутку напряжения. Разряд характеризуется резко выраженной неоднородностью: наличием у анода тонкого слоя отрицательного пространственного заряда, в котором происходит падение практически всего приложенного к разряду напряжения.

Подробное изучение разряда в коаксиальных системах с радиальным электрическим и аксиальным магнитным полями (прямой и обращенный магнетроны) показало, что разряд низкого давления скачком переходит в сильноточный с интенсивным образованием ионов при увеличении рабочего давления выше некоторого критического значения. Кроме того, в разряде могут возникать ионизационные неустойчивости, обуславливающие колебание тока разряда [2—4]. Было также обнаружено, что в зависимости от величины магнитного поля в разряде образуется либо область катодного падения потенциала (при слабых полях), либо область анодного падения (при сильных полях), либо существуют обе области [5]. Исследования показали, что коаксиальные разрядные системы могут быть эффективно использованы для распыления различных материалов и получения пленочных покрытий. Эти системы и явились прообразом первых магнетронных распылительных систем, которые произвели революцию в развитии плазменных методов получения пленок.

В результате исследований магнетронных систем с конусообразной и плоской мишенями в области магнитных полей 0,03—0,13 Т и давлений 0,1—10 Па, используемых в промышленных вакуумных высокопроизводительных установках для нанесения тонких пленок [6, 7], была разработана физическая модель раз-

ряда, получено аналитическое выражение для вольт-амперной характеристики и предложена методика расчета, связывающая скорость распыления с конструктивными и рабочими параметрами системы. Для магнетронных систем с кольцеобразной зоной распыления создана методика расчета равномерности нанесения тонкопленочных слоев и выбора оптимальных геометрических параметров системы с учетом неравномерности распределения ионного тока по поверхности мишени [8]. Вопросы теории магнетронного распыления в цилиндрических системах рассмотрены в [9].

Следует отметить, что практическое применение магнетронных распылительных систем значительно опередило разработку теории их работы и методику расчета. Поэтому авторы поставили перед собой задачу собрать, обобщить и систематизировать сведения, опубликованные в трудах советских и зарубежных исследователей по этим важным вопросам.

Глава первая

◆ РАЗВИТИЕ ВАКУУМНЫХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЛОЕВ

Получение высококачественных тонкопленочных слоев металлов, сплавов, диэлектриков и полупроводников является одной из актуальных задач технологии изготовления различных элементов радиоэлектронной аппаратуры. До сравнительно недавнего времени для получения пленок толщиной до нескольких микрон использовались главным образом процессы испарения и конденсации веществ в высоком вакууме (так называемый термовакuumный метод). При необходимости получать более толстые слои (например, микрополосковые линии толщиной 10—20 мкм) этот метод дополнялся методом ионного покрытия [10], а также электрохимическим наращиванием тонких пленок.

Термовакuumный метод, характеризующийся простотой и высокими скоростями осаждения, не обеспечивает достаточной воспроизводимости свойств пленок в особенности при осаждении веществ сложного состава, не позволяет испарять тугоплавкие материалы, а вылет крупных частиц в процессе испарения материалов (особенно диэлектрических с низкой теплопроводностью) является причиной появления поверхностных дефектов и нарушения непрерывности пленочного покрытия.

Электронно-лучевой нагрев, обеспечивая высокие скорости осаждения (до $50 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$), характеризуется низким коэффициентом полезного использования материала (обычно ниже 20%) и очень низким энергетическим КПД, поскольку непосредственно на процесс испарения расходуется от 1 до 5% подводимой энергии, а основная масса энергии идет на нагрев тигля, рентгеновское и ультрафиолетовое излучение и образование вторичных электронов (до 25% энергии первичного пучка). Эти электроны, бомбардируя находящиеся на подложке микроэлектронные структуры, например МДП, нагревают их до 620—770 К и обуславливают появление радиационных дефектов, к которым эти структуры особенно чувствительны.

При испарении из двух источников, которое используется для осаждения сплавов алюминия с кремнием в целях повышения надежности металлизации и предотвращения закорачивания эмиттерных переходов (необходимость применения двух источников обусловлена тем, что скорости испарения кремния и алюминия

различаются в 500 раз), трудно реализовать постоянство композиционного состава наносимых слоев. От этих недостатков в значительной мере свободны испарители дискретного действия, использующие так называемый «взрывной» метод испарения. Но этот метод не поддается формализации, так же как и электронно-лучевое испарение, и на его основе трудно построить автоматические поточные линии с АСУТП.

Расширение номенклатуры материалов, используемых при получении РЭА, и стремление перейти к непрерывным технологическим процессам существенно повысили интерес к получению пленок распылением материалов ионной бомбардировкой. Этим методом можно наносить пленки металлов (включая тугоплавкие), сплавов (в том числе многокомпонентного состава), полупроводников и полупроводниковых соединений, а при использовании высокочастотного распыления — диэлектрические пленки. Характерно, что скорости распыления у большинства материалов различаются не более чем на порядок, в то время как скорости их испарения резко (на несколько порядков) изменяются при изменении температуры испарителя. Так, например, при напряжении на мишени 600 В скорости распыления вольфрама и алюминия различаются всего лишь в 2 раза, в то время как скорости испарения этих металлов при температуре 2000°C — на 9 порядков.

Метод получения пленок ионным распылением материалов обладает целым рядом достоинств, к которым относятся: возможность получения (при введении в газоразрядную плазму реакционно-способных газов) соединений, которые практически почти невозможно получить термическим испарением веществ в высоком вакууме; высокая адгезия пленок; сохранение стехиометрического состава пленок при распылении многокомпонентных сплавов; высокий коэффициент использования распыляемого материала; однородность покрытий по толщине (в том числе при осаждении на поверхности, имеющие сложный профиль); возможность создания установок и линий непрерывного действия, поскольку мишени могут иметь большой запас распыляемого материала, а формализация процесса осаждения в зависимости от параметров режима позволяет осуществить полную автоматизацию всего цикла получения покрытия.

Анализ ионно-плазменных методов получения пленочных покрытий [11] показывает, что их развитие идет в направлении все более широкого использования процессов ионного распыления с постепенным понижением диапазона рабочих давлений, увеличением скоростей осаждения и снижением напряжения на разрядном промежутке распылительных систем. Изменение этих параметров в указанном направлении вызывается, с одной стороны, стремлением увеличить производительность процесса распыления и, с другой стороны, необходимостью получения пленок с минимальным уровнем загрязнения и радиационных дефектов.

Однако до сравнительно недавнего времени широкое применение процессов ионного распыления сдерживалось низкими ско-

ростями осаждения (от 0,2 до 1,5 нм·с⁻¹), наличием высокого напряжения (2—5 кВ), вызывающего радиационные дефекты в структурах, а также интенсивным нагревом подложек и пленки в результате бомбардировки высокоэнергетическими вторичными электронами. Кроме того, проведение процесса при сравнительно высоких давлениях (1—10 Па) значительно ограничивало получение пленок с минимальным уровнем загрязнений.

Положение существенно образом изменилось после появления высокоэффективных магнетронных распылительных систем (МРС).

В этих устройствах электроны, эмиттируемые с мишени под действием ионной бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям вблизи поверхности мишени. Высокая плотность ионного тока (на 2 порядка выше, чем в обычных диодных распылительных системах) и большая удельная мощность, рассеиваемая на мишени, резко (в 50—100 раз) увеличивает скорость распыления материалов в магнетронной системе. В то же время локализация электронов вблизи мишени предотвращает бомбардировку ими подложек, в результате чего снижается температура и уменьшаются радиационные дефекты в создаваемых структурах. Увеличение скорости распыления с одновременным снижением давления рабочего газа позволяет существенно снизить степень загрязнения пленок посторонними газовыми включениями.

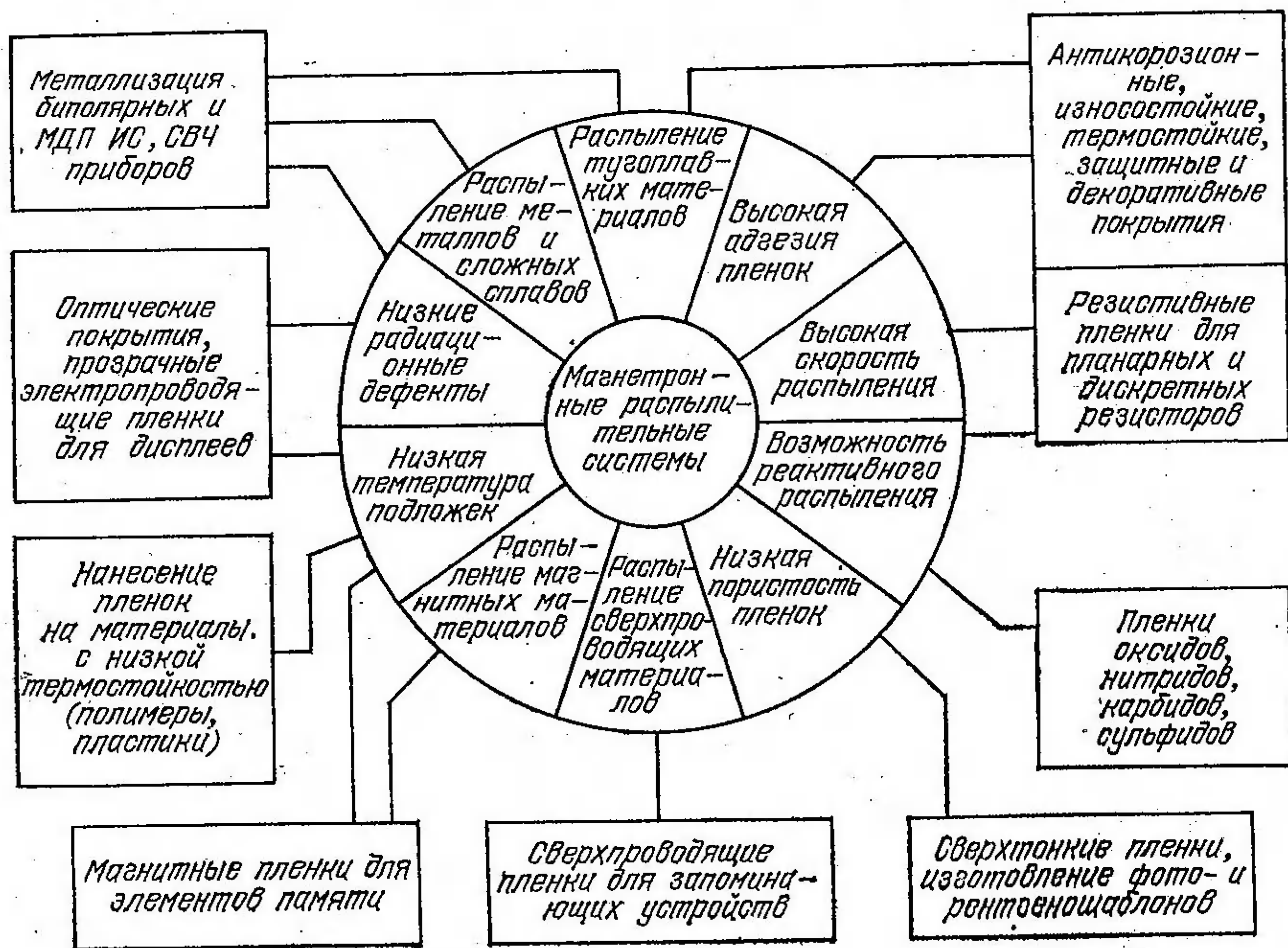


Рис. 1. Характерные особенности и области применения магнетронных распылительных систем

Магнетронные распылительные системы, имея ряд преимуществ по сравнению с системами электронно-лучевого испарения и высокочастотного распыления (табл. 1), а также с другими распылительными системами (табл. 2), находят с каждым годом все более широкое применение в самых различных областях науки,

Таблица 1

Сравнительные характеристики методов нанесения пленочных покрытий

Характеристика	Электронно-лучевое испарение	Высокочастотное распыление	Магнетронное распыление
<i>Процесс генерации частиц</i>			
Источник энергии	Электронно-лучевая пушка	Высокочастотный тлеющий разряд	Магнетронный тлеющий разряд
Способ генерации вещества	Бомбардировка электронами	Бомбардировка ионами	Бомбардировка ионами
Носители энергии	Электроны	Ионы	Ионы
Энергия бомбардирующих частиц, кэВ	10—30	0,1—3	0,3—0,7
Средняя удельная мощность, Вт·см ⁻²	(0,2—2) · 10 ³	2 · 10 ¹	2 · 10 ²
Максимальная удельная мощность, Вт·см ⁻²	10 ⁴ —10 ⁵	10 ²	5 · 10 ² —10 ³
Средняя плотность тока, А·см ⁻²	(0,5—5) · 10 ⁻¹	3 · 10 ⁻³	3 · 10 ⁻¹
<i>Источник частиц</i>			
Удельная скорость испарения (распыления), г·см ⁻² ·с ⁻¹	(2—20) · 10 ⁻³	(2—20) · 10 ⁻⁷	(4—40) · 10 ⁻⁵
Эффективность процесса генерации (по меди), г·Дж ⁻¹	3 · 10 ⁻⁶	6 · 10 ⁻⁷	3 · 10 ⁻⁶
Энергия генерируемых частиц, эВ	0,1—0,2	10—200	10—20
<i>Процесс осаждения частиц</i>			
Скорость осаждения, нм·с ⁻¹	10—60	0,3—3	10—60
Энергия осаждаемых частиц, эВ	0,1—0,2	0,2—20	0,2—10
Рабочее давление, Па	10 ⁻⁴	0,5—2,0	(5—50) · 10 ⁻²
Удельная мощность, рассеиваемая на подложке, Вт·см ⁻²	0,1	5	1
Нагрев подложки в процессе осаждения, К	До 770	До 670	До 370
Источник радиационного воздействия на подложку	Рентгеновское излучение (электроны)	Вторичные электроны (рентгеновское излучение, фотоны, ионы)	Фотоны (ионы)

Сравнительные характеристики систем плазменного распыления материалов

Характеристики систем	Диодная с плоской мишенью	Диодная ВЧ с цилиндрической мишенью	Триодная	Магнетронная	
				с конической мишенью	с плоской мишенью
Давление, Па	10	0,5	0,07	0,3 — 0,7	0,1 — 0,5
Напряжение на мишени, кВ	3—5	1—3	0,5 — 1,0	0,4 — 0,7	0,4 — 0,7
Удельная мощность, Вт/см ²	2	5	5—10	80	100
Плотность ионного тока, мА/см ²	1	5	5	160	200
Расстояние между мишенью и подложкой, см	10	10	40	25	5
Скорость осаждения (по меди), нм/с	0,5	0,8	2	3	30
Вид движения подложек	Неподвижные на плоскости	Неподвижные на барабане	Планетарное вращение	Планетарное вращение	Линейное перемещение
Температура разогрева подложки, °С	250 — 300	250 — 300	70	50	80
Степень использования материала мишени, %	60 — 80	60 — 80	30	30	60 — 80
Эффективность распыления $\times 10^{-8}$, см ³ /Дж	7	25	20	35	35

техники и промышленного производства (рис. 1). С помощью МРС получают сверхтонкие (меньше 20 нм) прозрачные пленки, необходимые для изготовления жидких кристаллов, тонкие пленки хрома для прецизионных фото- и рентгеношаблонов, пленки алюминия и его сплавов, пленки тугоплавких металлов для металлизации ИС, упрочняющие, износостойкие, защитные и декоративные покрытия [12]. Возможность распыления тугоплавких металлов и сплавов с хорошим сохранением состава при высоких скоростях осаждения, малая инерционность процесса позволяют получать с помощью МРС резистивные пленки со стабильными параметрами при изготовлении планарных и дискретных резисторов.

Глава вторая



ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Вопросы теории разряда в магнетронных распылительных системах и методы расчета их технологических и конструктивных параметров до настоящего времени проработаны слабо. Слож-

ность заключается в том, что в этих системах используются неоднородные скрещенные электрическое и магнитное поля, причем электрические параметры разряда в значительной степени зависят от рабочего давления, величины и конфигурации магнитного поля, конструктивных особенностей распылительной системы. Все это делает практически невозможным точное аналитическое описание явлений, происходящих в разряде магнетронной системы.

Принцип действия и рабочие параметры. Магнетронные распылительные системы получили свое название от СВЧ приборов М-типа (магнетронных устройств), хотя, кроме наличия скрещенных электрического и магнитного полей, ничего общего с ними не имеют. Магнетронные системы относятся к системам распыления диодного типа, в которых распыление материала происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа (обычно аргона), образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Высокая скорость распыления, характерная для этих систем, достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля [13].

Принцип действия магнетронной распылительной системы показан на рис. 2. Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитно-

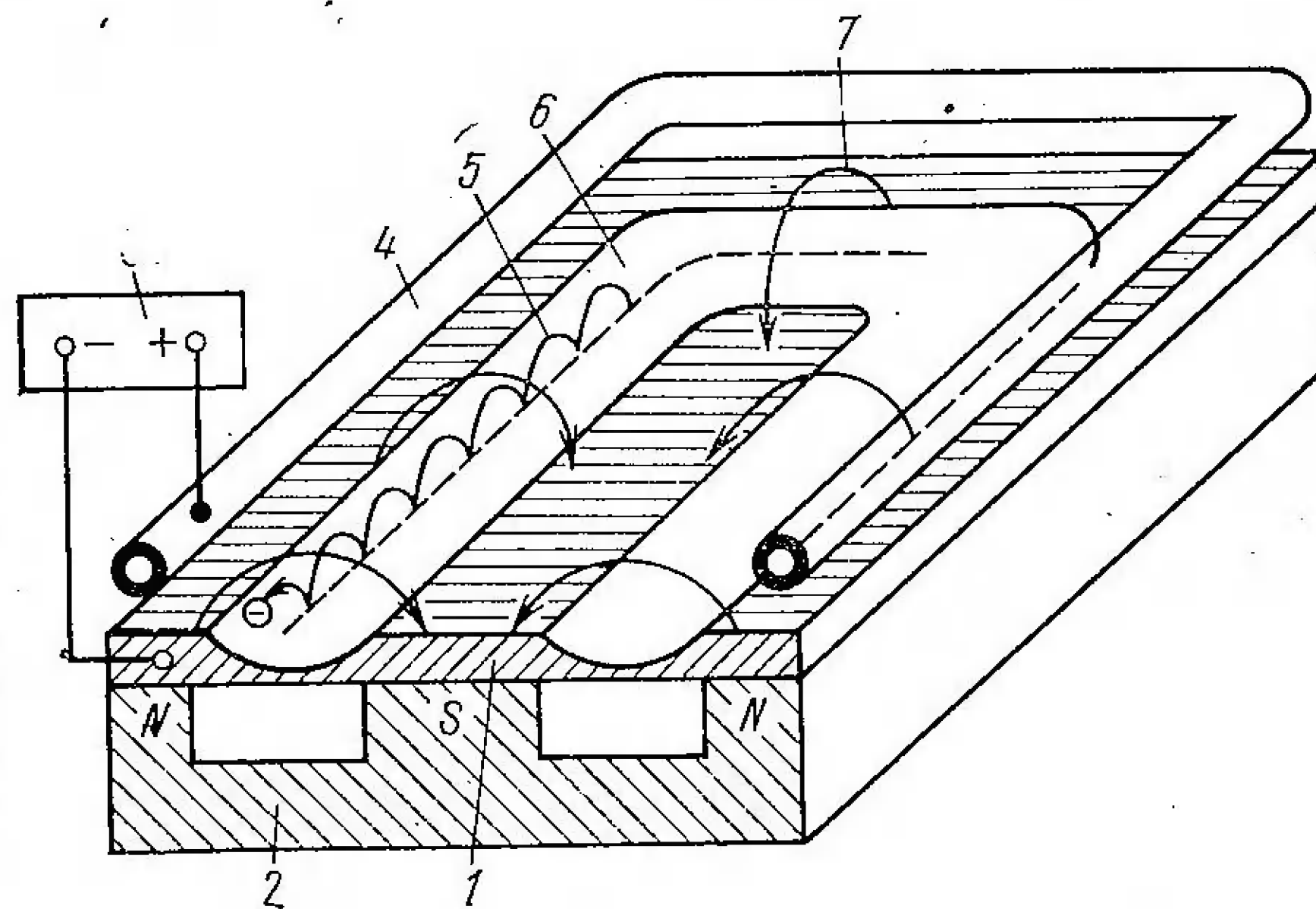


Рис. 2. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью:

1 — катод-мишень; 2 — магнитная система; 3 — источник питания; 4 — анод; 5 — траектория движения электрона; 6 — зона распыления; 7 — силовая линия магнитного поля

го поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмиттированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны

захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой стороны — поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны циклируют в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это в свою очередь обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости распыления, а следовательно, и скорости осаждения пленки. Средние скорости осаждения различных материалов с помощью магнетронной распылительной системы, имеющей плоскую дисковую мишень диаметром 150 мм, при мощности источника 4 кВт и расположении подложки на расстоянии 60 мм от источника приведены ниже:

Материал . . .	Si	Ti	Ta	W	Nb	Mo	Al	Cr	Pt	Cu	Au	Ag
Скорость осаждения, нм/с . . .	7	8	8	8	8,5	12	13	17	21	30	37	44

Следует отметить, что плазма разряда существует только в области магнитной ловушки в непосредственной близости от мишени и ее форма определяется геометрией и величиной магнитного поля.

Создание магнитной ловушки у распыляемой поверхности мишени представляет собой простое, но весьма эффективное решение проблемы увеличения скорости распыления материалов в плазменных распылительных системах. Но помимо этого достоинства МРС обладает рядом специфических свойств, основным из которых является отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетическими вторичными электронами.

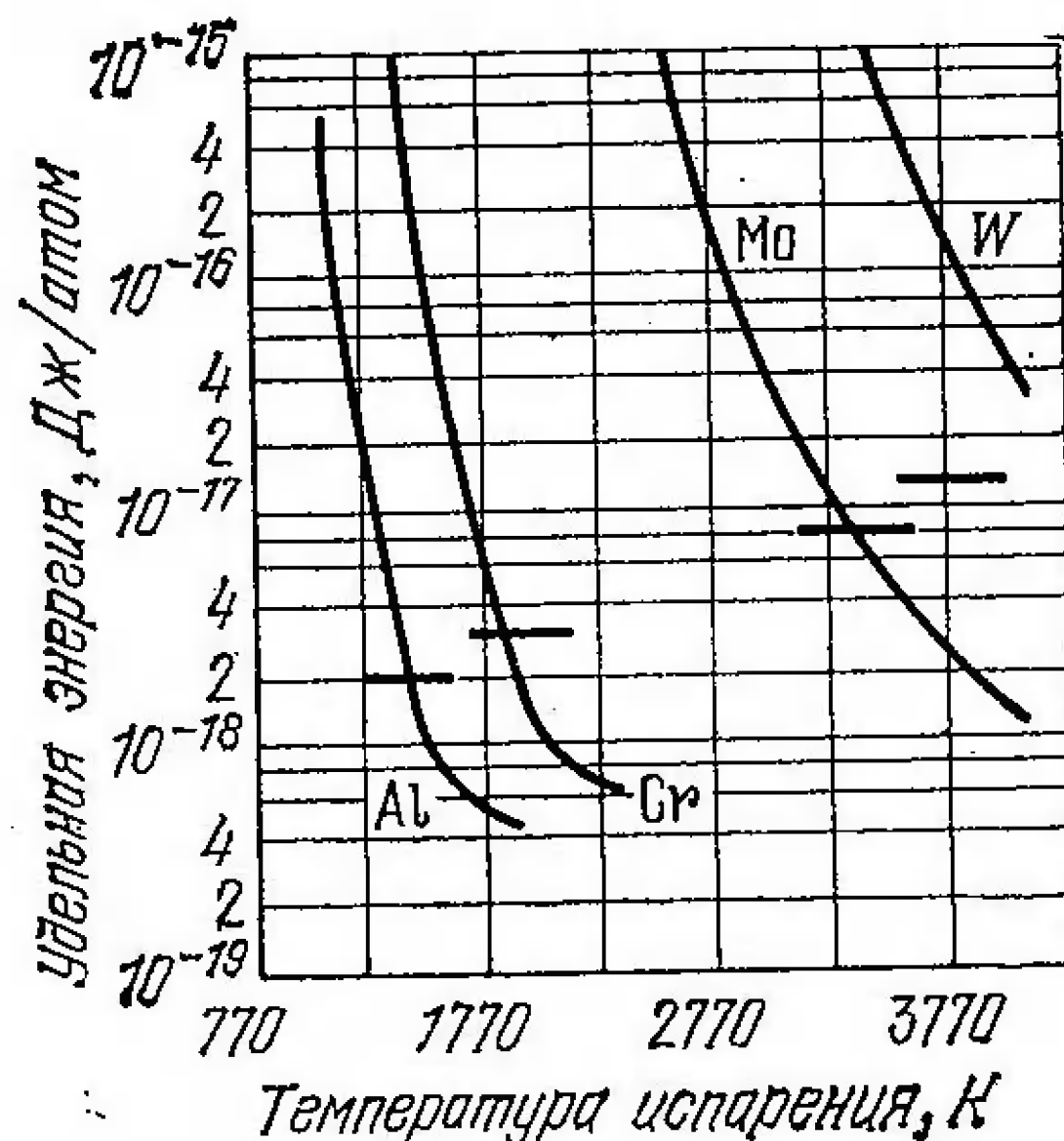
Известно, что при распылении материалов в плазме тлеющего разряда высокоэнергетические вторичные электроны с мишени являются основным источником нагрева подложек. Интенсивный перегрев подложек не позволяет увеличивать скорости распыления, повышая рабочее напряжение. В магнетронной распылительной системе вторичные электроны захватываются магнитной ловушкой и не бомбардируют подложку, что обеспечивает ее сравнительно низкую температуру. Источниками нагрева подложки в этих системах служат энергия конденсации распыленных атомов, кинетическая энергия осаждаемых атомов, энергия отраженных от мишени нейтрализованных ионов, а также излучение плазмы. Энергия конденсации составляет 3—9 эВ/атом, кинетическая энергия в зависимости от распыляемого материала — от 5 (для алюминия) до 20 эВ/атом (для вольфрама), а излучение плазмы

2—10 эВ/атом. Суммарная тепловая энергия, рассеиваемая на подложке, и температура подложки для различных материалов, осаждаемых в цилиндрической МРС, приведены ниже [14]:

Материал	Al	Cu	Ta	Cr	Au	Mo	W
Тепловая энергия, эВ/атом	13	17	20	20	23	47	73
Температура подложки, °C	79	110	97	118	106	163	202

Сравнение этих результатов с данными, полученными для метода термического испарения в вакууме, показывает (рис. 3), что при сравнительно низких скоростях испарения последний характеризуется более высокой тепловой энергией на подложку. Это

Рис. 3. Удельная тепловая энергия, рассеиваемая на подложке при электронно-лучевом испарении (диаметр тигля 5 см) различных металлов. Горизонтальными линиями показаны средние значения энергии при распылении тех же материалов в магнетронной системе



объясняется тем, что в данном случае основным источником нагрева подложки является радиационное излучение с поверхности расплавленного материала. Однако при высоких скоростях испарения начинает преобладать нагрев за счет энергии конденсации (особенно для легкоплавких материалов). Во многих случаях нагрев подложки в магнетронных системах сравним, а при испарении тугоплавких материалов даже ниже, чем при методе термического испарения. Это дает возможность использовать магнетронные системы для нанесения пленок на подложки из материала с низкой термостойкостью (пластики, полимеры, оргстекло и бумагу).

Основные рабочие характеристики магнетронных распылительных систем — напряжение на электродах, ток разряда, плотность тока на мишени и удельная мощность, величина индукции магнитного поля и рабочее давление. От величины и стабильности перечисленных параметров, которые взаимно связаны между собой, зависят стабильность разряда и воспроизводимость процесса нанесения пленок. Магнетронные системы относятся к низковольтным системам распыления. Напряжение питания не превышает 1000 В постоянного тока. Рабочее напряжение составляет 300—700 В, на мишень обычно подается отрицательный потенциал, а анод имеет нулевой потенциал. Однако в магнетронных системах

с плоским катодом для более полного улавливания вторичных электронов рекомендуется на анод подавать небольшое положительное смещение (40—50 В). В некоторых системах предусматривается подача отрицательного напряжения смещения на подложку (до 100 В) для реализации распыления со смещением.

Ток разряда зависит от многих факторов, например от рабочего напряжения, давления и рабочего газа, индукции магнитного поля, конфигурации магнетронной системы, распыляемого материала, и определяется мощностью источника питания. Плотность тока на мишени очень велика и для систем с полым цилиндрическим катодом составляет в среднем 80 mA/cm^2 , с коническим катодом — 160 mA/cm^2 , а с плоским катодом — 200 mA/cm^2 , причем максимальные плотности тока в центральной части зоны распыления могут быть значительно выше. Значения удельной мощности в магнетронных системах с полым цилиндрическим катодом достигают 40 Вт/см^2 , а с плоским катодом — 100 Вт/см^2 . Пределно допустимая мощность определяется условиями охлаждения мишени и теплопроводностью распыляемого материала.

Магнетронная распылительная система может работать в диапазоне давлений от 10^{-2} до 1 Па и выше. Важнейшими параметрами, во многом определяющими характер разряда в ней, являются геометрия и величина магнитного поля, индукция которого у поверхности мишени $0,03—0,1 \text{ Т}$.

Одной из основных характеристик разряда является вольт-амперная характеристика (ВАХ). Существенное влияние на нее оказывают рабочее давление (p) и индукция магнитного поля (B)

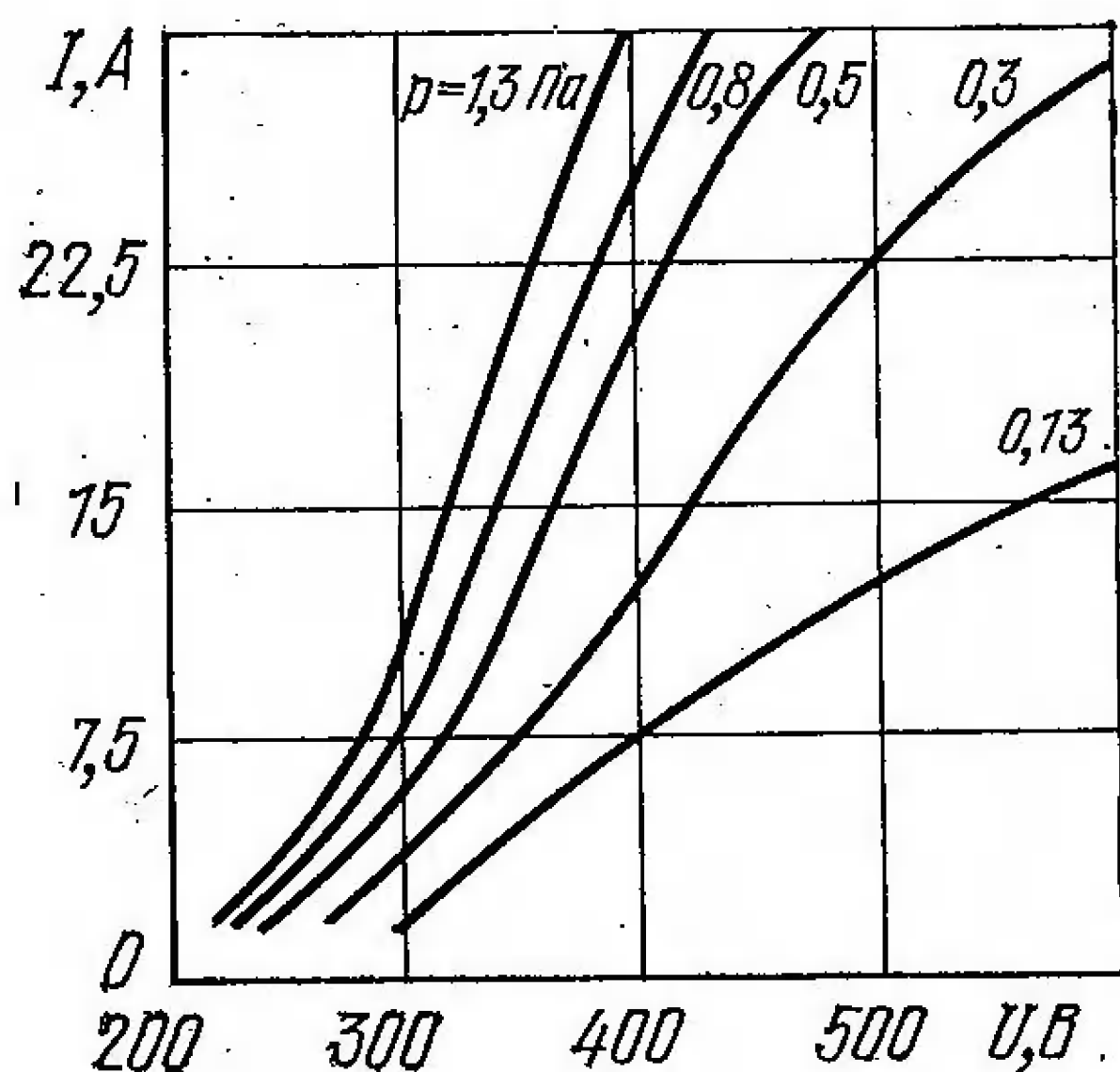


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики планарной магнетронной системы распыления с алюминиевой мишенью размером $40 \times 60 \text{ см}$ при постоянном магнитном поле $0,03 \text{ Т}$ и различном давлении аргона

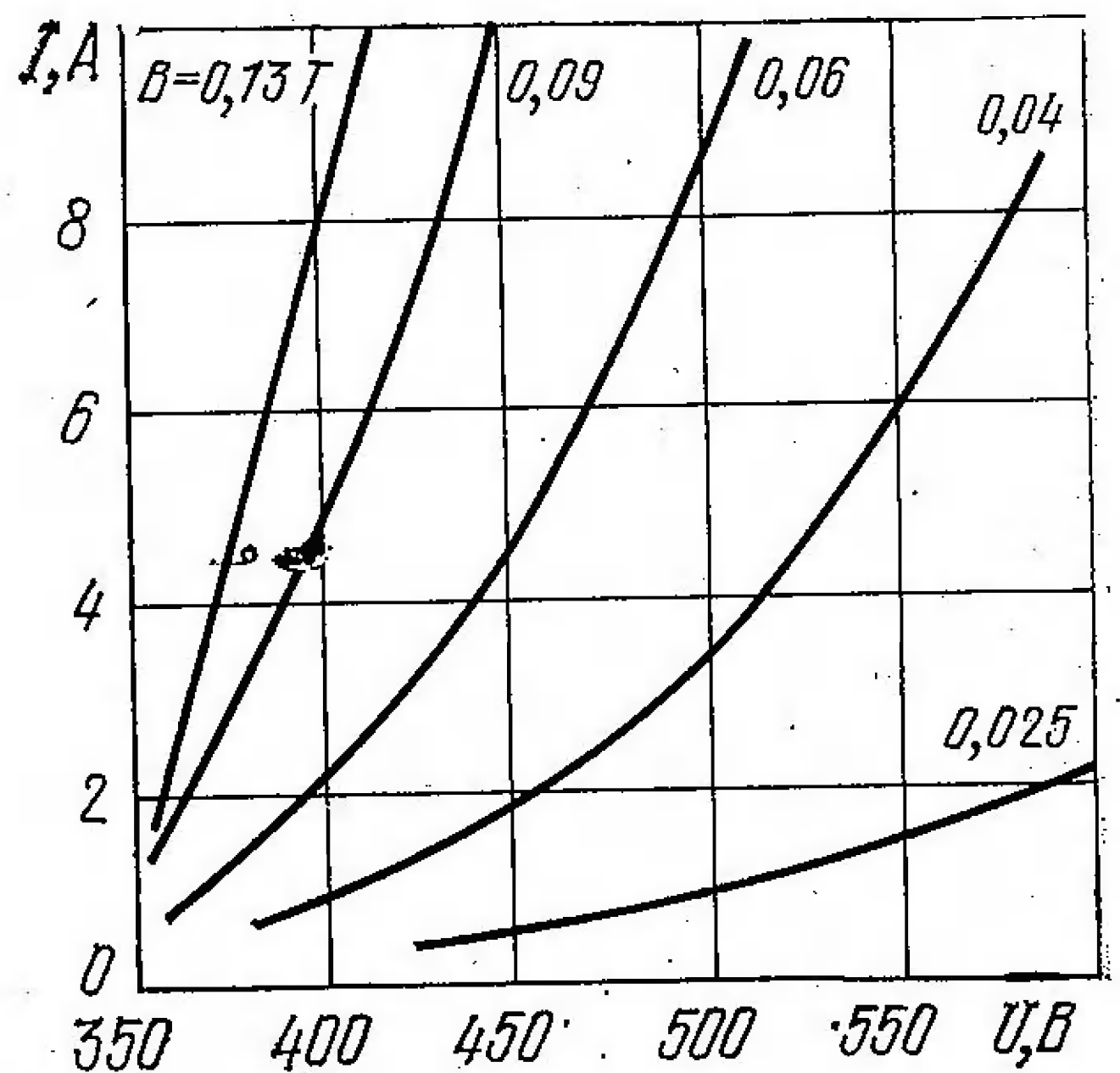


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики магнетронной системы распыления с алюминиевой мишенью диаметром 160 мм при постоянном давлении аргона $0,3 \text{ Па}$ и различной индукции магнитного поля

[6, 7]. С уменьшением p ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений и приближаются к линейной зависимости (рис. 4). Аналогичным образом влияет и индукция магнитного поля (рис. 5). Близкие к линейной зависимости наблюдаются при больших значениях B . На ВАХ разряда влияют также материал мишени (рис. 6) и ее форма, которая видоизменяется по мере распыления материала. Образование выемки в плоской мишени приводит к сдвигу ВАХ в область меньших рабочих напряжений из-за улучшения условий локализации плазмы, причем этот сдвиг растет с увеличением p (рис. 7): В этом случае определяющим является не только геометрический фактор, но и переход зоны разряда в область более сильного магнитного поля по мере распыления мишени.

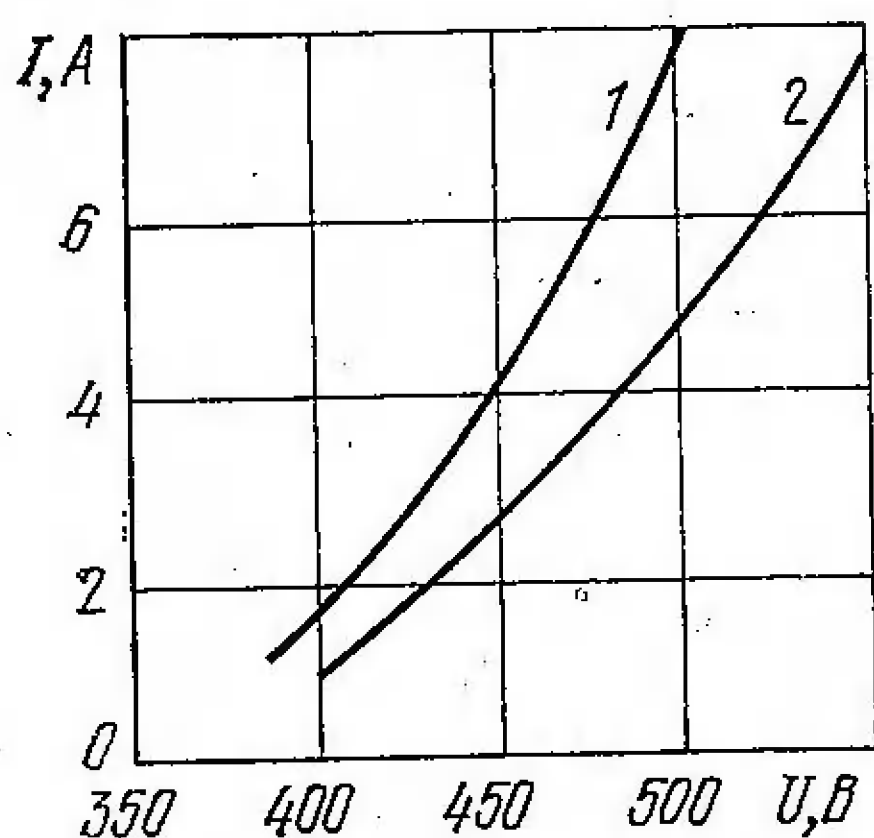


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики магнетронной системы распыления с плоской мишенью из алюминия (кривая 1) и меди (кривая 2) при постоянном давлении 0,5 Па и индукции магнитного поля 0,08 Т

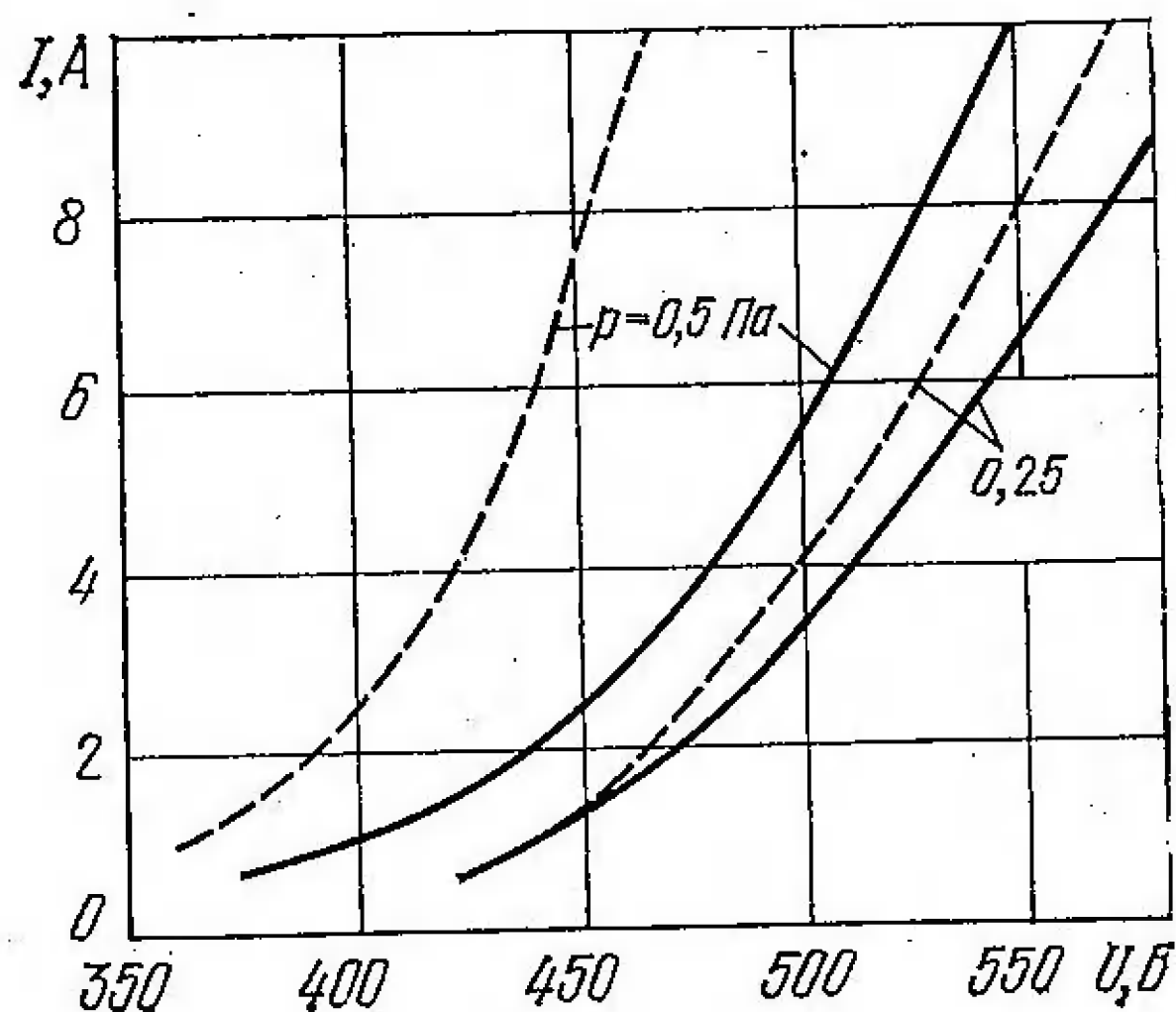


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики магнетронной системы с конической новой (сплошные линии) и эродированной (штриховые линии) мишенями при индукции магнитного поля 0,06 Т и различном давлении аргона

Важным параметром разряда, определяющим скорость распыления, является электрическая мощность, причем скорость осаждения пленки почти линейно зависит от приложенной мощности (рис. 8) [15]. В свою очередь мощность разряда при постоянной мощности источника зависит от p и B . В достаточно слабых магнитных полях существует такое значение p , при котором на разряде выделяется максимальная мощность (рис. 9). С ростом B (до 0,04 Т) при низких значениях p мощность разряда сначала резко возрастает, затем замедляется и при $B=0,08\div 0,1$ Т становится максимальной. При достаточно высоком p максимальная мощность достигается уже при $B=0,04\div 0,06$ Т (рис. 10).

Напряжение зажигания в магнетронной системе значительно ниже, чем в обычных диодных системах. Это объясняется тем,

что еще до наложения электрического поля электроны, всегда присутствующие в рабочей камере и обеспечивающие первые акты ионизации в развитии лавинного процесса пробоя газового промежутка, захватываются магнитной ловушкой, вследствие чего их

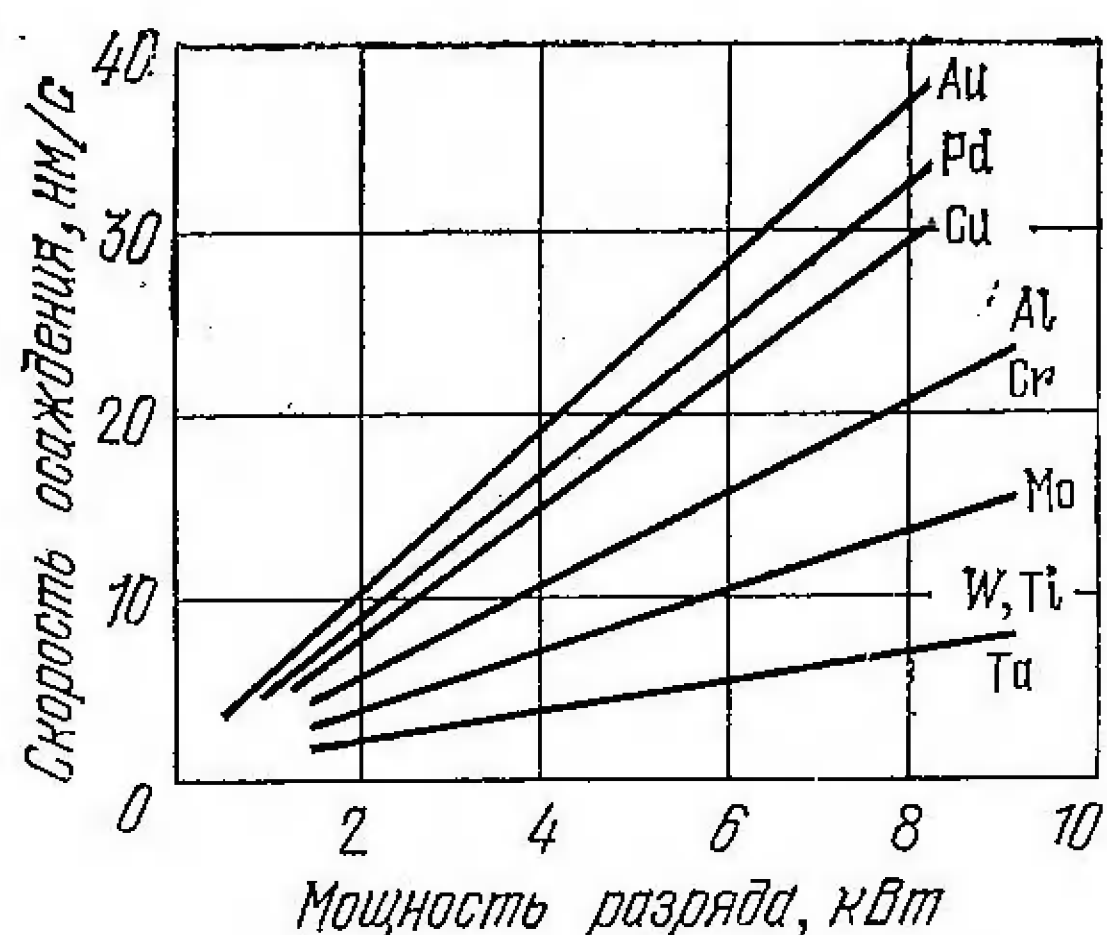


Рис. 8. Зависимость скорости осаждения различных материалов от мощности разряда. (Подложка перемещается со скоростью 8 см/мин на расстоянии 6 см от мишени размером 13×38 см.)

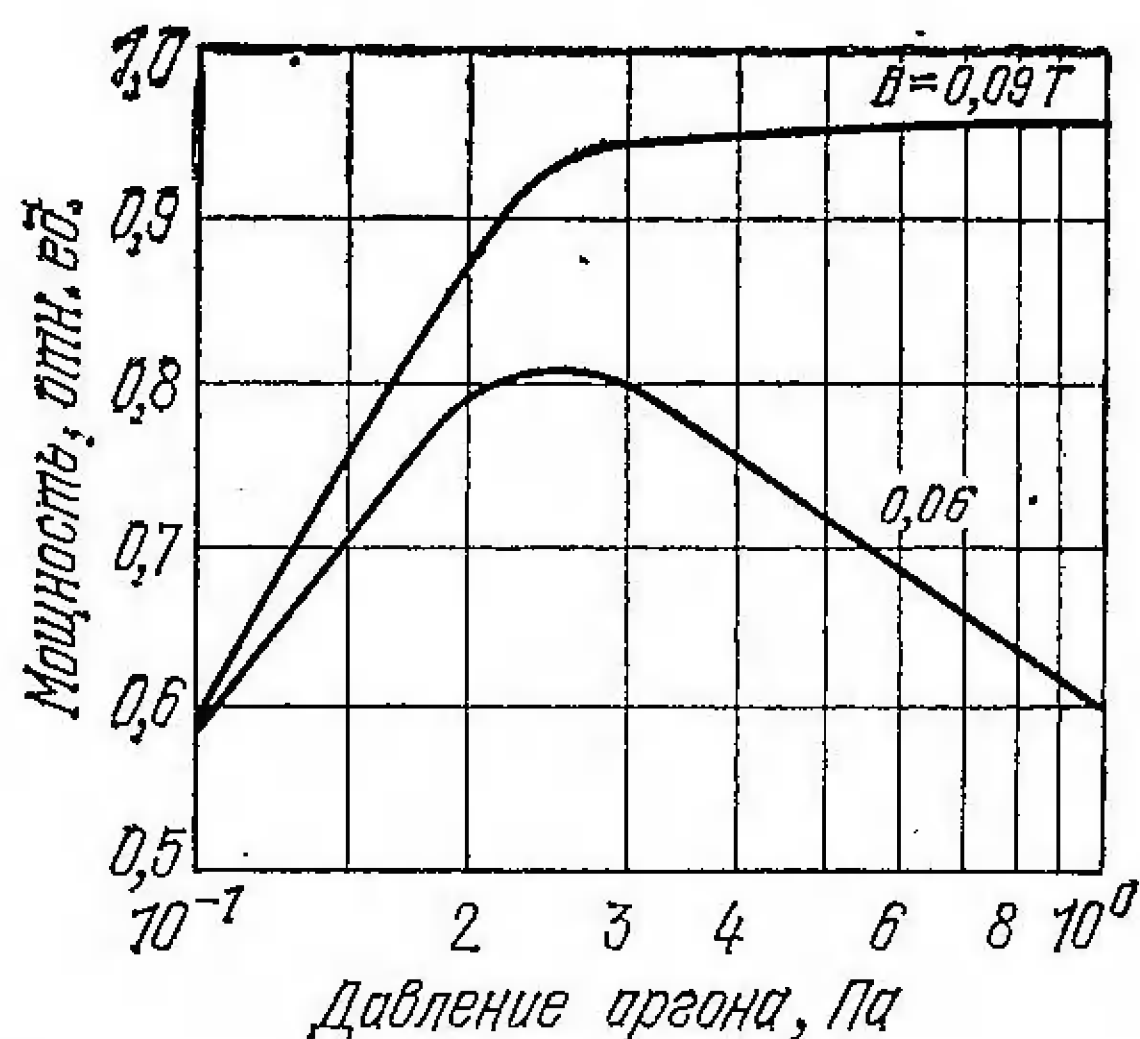


Рис. 9. Зависимость мощности разряда от рабочего давления при различной индукции магнитного поля: (Мощность источника питания постоянна.)

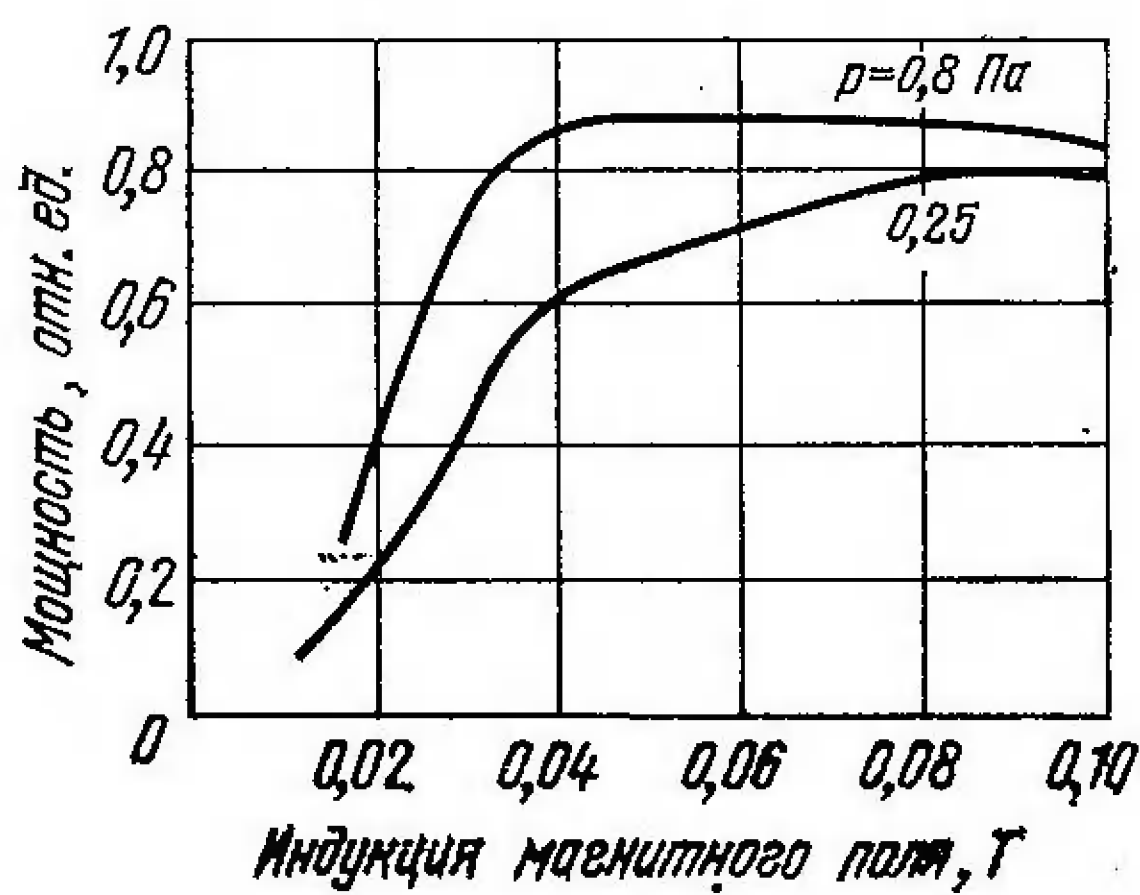


Рис. 10. Зависимость мощности разряда от индукции магнитного поля при различном давлении аргона

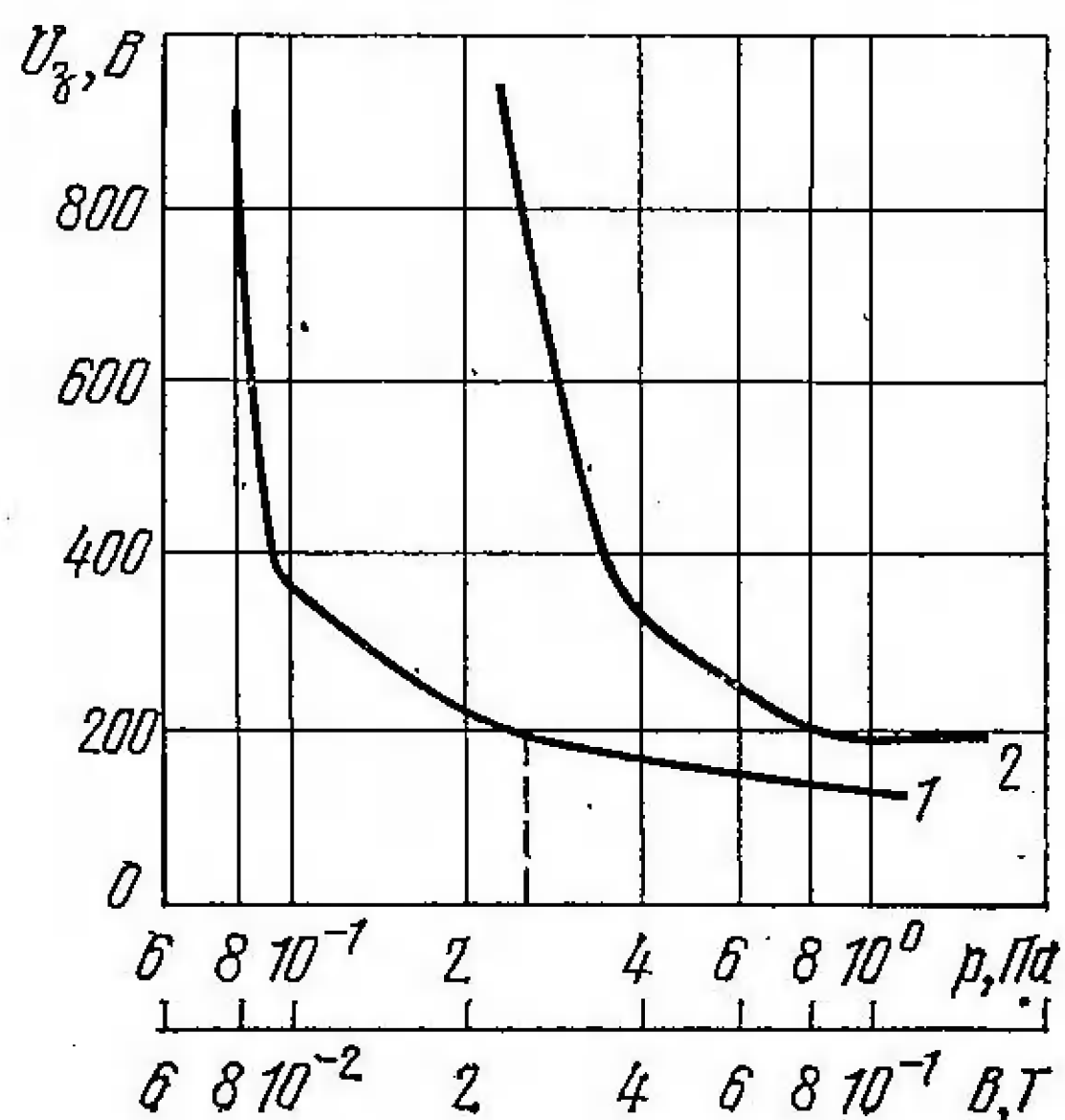


Рис. 11. Зависимость напряжения зажигания от давления при постоянной индукции магнитного поля 0,06 Т (кривая 1) и индукции магнитного поля при постоянном давлении 0,25 Па (кривая 2)

концентрация в этой области оказывается выше, чем в объеме камеры, что и способствует возникновению разряда при более низких напряжениях. Исследования [6, 7] показали, что зависимости напряжения зажигания от давления аргона и индукций

магнитного поля аналогичны (рис. 11), причем на кривых условно можно выделить три области: при $p > 0,3$ Па и $B > 0,08$ Т напряжение зажигания практически не зависит от давления и индукции; в диапазоне $0,3 > p > 0,1$ Па и $0,08 > B > 0,04$ Т наблюдается заметное возрастание напряжения зажигания, а при $p < 0,1$ Па и $B < 0,04$ Т оно резко растет и быстро достигает значения, соответствующего максимальному напряжению источника питания, после чего разряд не зажигается. Сходство приведенных зависимостей указывает на тот факт, что магнитное поле и рабочее давление оказывают одинаковое влияние на возникновение и развитие разряда в МРС.

Как видно из приведенных выше зависимостей, эффективность работы магнетронной распылительной системы зависит от правильного выбора рабочих параметров, а стабильность этих параметров определяет постоянство скорости осаждения пленки и воспроизводимость свойств получаемых пленок. Необходимая скорость осаждения пленки в магнетронной системе с достаточной точностью может поддерживаться за счет постоянства таких параметров процесса, как ток разряда или подводимая мощность. Эти функции может выполнять источник питания, благодаря чему управление конечной толщиной пленки достигается, если задается время осаждения. Однако можно управлять ростом пленки и с помощью прямых методов контроля, например с помощью кварцевого датчика, поскольку плазма в магнетронной системе локализована и не воздействует на датчик [16]. Как показывает практика, для обеспечения воспроизводимости и стабильности процесса нанесения пленки ток разряда необходимо поддерживать с точностью $\pm 2\%$, а при стабилизации процесса по мощности разряда точность ее поддержания составляет ± 20 Вт в диапазоне регулирования от 0 до 10 кВт. При этом рабочее давление должно быть постоянным (отклонение не должно превышать $\pm 5\%$).

Движение заряженных частиц в плазме. В неоднородных скрещенных электрическом и магнитном полях заряженные частицы совершают дрейфовые движения. Хотя рассмотрения дрейфовых движений отдельных частиц недостаточно для полного описания плазмы, с их помощью можно наглядно описать некоторые макроскопические свойства плазменного состояния.

Траектория движения электронов в плазме магнетронных распылительных систем очень сложна, и описать ее аналитически с учетом всех составляющих движения практически невозможно. Количественный учет сложного движения заряженных частиц в газе проводится обычно разложением его на две составляющие: беспорядочное (диффузионное) и направленное движение. Преобладание того или иного вида движения зависит от давления газа p и напряженности электрического поля E , действующего в области разряда. Критерием оценки характера движения частиц является отношение E/p . Если значение этого отношения велико,

то преобладающим является направленное движение под действием электрического поля [17].

В магнетронных распылительных системах, работающих при сравнительно низких давлениях, существуют объемные заряды и узкие области катодного и анодного падения потенциала, для которых характерны высокие напряженности электрического поля, поэтому значение E/p велико (превышает 10^5 В/м·Па), что позволяет считать движение электронов и ионов в плазме магнетронных систем направленным.

Важным параметром плазмы, определяющим ее состояние, является дебаевский радиус экранирования λ_D , от которого зависит сфера влияния выделенного пробного заряда [18]:

$$\lambda_D = 49 (T/n)^{1/2},$$

где T — температура, К; n — концентрация электронов (или ионов) в плазме, m^{-3} . В качестве меры неидеальности плазмы обычно употребляется дебаевское число N_D , т. е. число частиц в дебаевской сфере:

$$N_D = (4\pi/3) n\lambda_D^3.$$

Значение этой величины для магнетронной системы велико (более 10^2), что позволяет плазму разряда считать идеальным газом, состоящим из заряженных частиц, т. е. взаимодействием частиц между собой можно пренебречь.

Основным типом движения заряженной частицы в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, является циклотронное вращение, характеризующееся следующими параметрами:

$$r_{\perp} = v_{\perp}/\omega, \quad \omega = ezB/m, \quad (1)$$

где r_{\perp} — радиус вращения частицы (ларморовский радиус), м; v_{\perp} — составляющая скорости частицы в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, м/с; ω — циклотронная частота, s^{-1} ; e — заряд электрона, Кл; z — кратность заряда частицы; B — индукция магнитного поля, Т; m — масса частицы, кг.

Совместное действие электрического и магнитного полей вызывает дрейф заряженной частицы в направлении, перпендикулярном как электрическому, так и магнитному полям со скоростью

$$v_H = E/B, \quad (2)$$

где E — напряженность электрического поля, В/м.

При движении в однородных электрическом и магнитном полях без начальной скорости траектория частицы представляет циклоиду, высота которой равна двум ларморовским радиусам:

$$h_{\perp} = 2mE/ezB^2. \quad (3)$$

В скрещенных электрическом и магнитном полях могут существовать и другие типы дрейфовых движений, например градиентный и центробежный дрейфы, вызываемые неоднородностью маг-

нитного поля и искривлением его силовых линий. Скорости этих видов движений зависят от массы и заряда частицы, что приводит к разделению зарядов и появлению токов. Суммарная скорость дрейфа заряженной частицы в магнитном поле с изогнутыми силовыми линиями складывается из скоростей градиентного и центробежного дрейфов:

$$v_{др} = \frac{m}{2 e z B^2} (v_{\perp}^2 + 2v_{\parallel}^2) [\mathbf{n} \times \nabla \mathbf{B}], \quad (4)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор в направлении \mathbf{B} ; v_{\parallel} — скорость движения частицы в направлении, параллельном \mathbf{B} , м/с.

В магнетронных системах неоднородными являются как электрическое, так и магнитное поля, и поэтому в плазме разряда существуют все вышеперечисленные типы дрейфовых движений заряженных частиц.

Характеристики разрядного промежутка. При низком давлении разряд в распылительной системе с холодным катодом поддерживается в основном за счет вторичных электронов, эмиттируемых с катода под действием ионной бомбардировки. Выбитые из катода электроны ускоряются в области темного катодного пространства и с большими энергиями входят в область плазмы, где совершают ионизирующие столкновения с атомами рабочего газа до тех пор, пока не потеряют энергию или не попадут на анод.

Оценка по формулам (1) показывает, что r_L у ионов более чем на два порядка выше, чем у электронов, и при используемых в магнетронных системах магнитных полях и небольшой области существования плазмы магнитное поле практически не оказывает влияния на траекторию движения ионов, т. е. они свободно под действием электрического поля уходят на мишень по траекториям, близким к прямолинейным. Электроны же, перемещаясь по сложным траекториям в области магнитной ловушки, совершают многократные столкновения с атомами рабочего газа. Следовательно, справедливо предположить, что основную роль в процессах образования и поддержания плазмы в магнетронных распылительных системах играют электроны.

Из-за неоднородности электрического и магнитного полей траектория электронов, эмиттированных с катода, не является циклоидальной. Однако для удобства аналитического описания в первом приближении можно считать ее близкой к циклоиде. Как показано на рис. 12, электрон, ускоряясь в области темного катодного пространства (ТКП) шириной d_K по траектории, близкой к циклоидальной, удаляется от катода на расстояние d_t и попадает в область плазмы. В общем случае $d_t > d_K$. Если считать эти величины близкими по величине, а электрическое поле в области ТКП достаточно однородным, то $d_t = h_{ц}$, определяемой из формулы (3), т. е. электрон удаляется от катода на расстояние двух ларморовских радиусов со скоростью $v_{\perp} = v_H$. Если $d_t \gg d_K$, то электрон, получив энергию в ТКП, будет дальше двигаться по ларморов-

ской окружности, и в этом случае d_t близко к ларморовскому радиусу, причем

$$v_{\perp} = (2e U_K / m_e)^{1/2} = 5,9 \cdot 10^5 \sqrt{U_K}, \quad (5)$$

где U_K — падение напряжения в области темного /катодного пространства, В; m_e — масса электрона, кг.

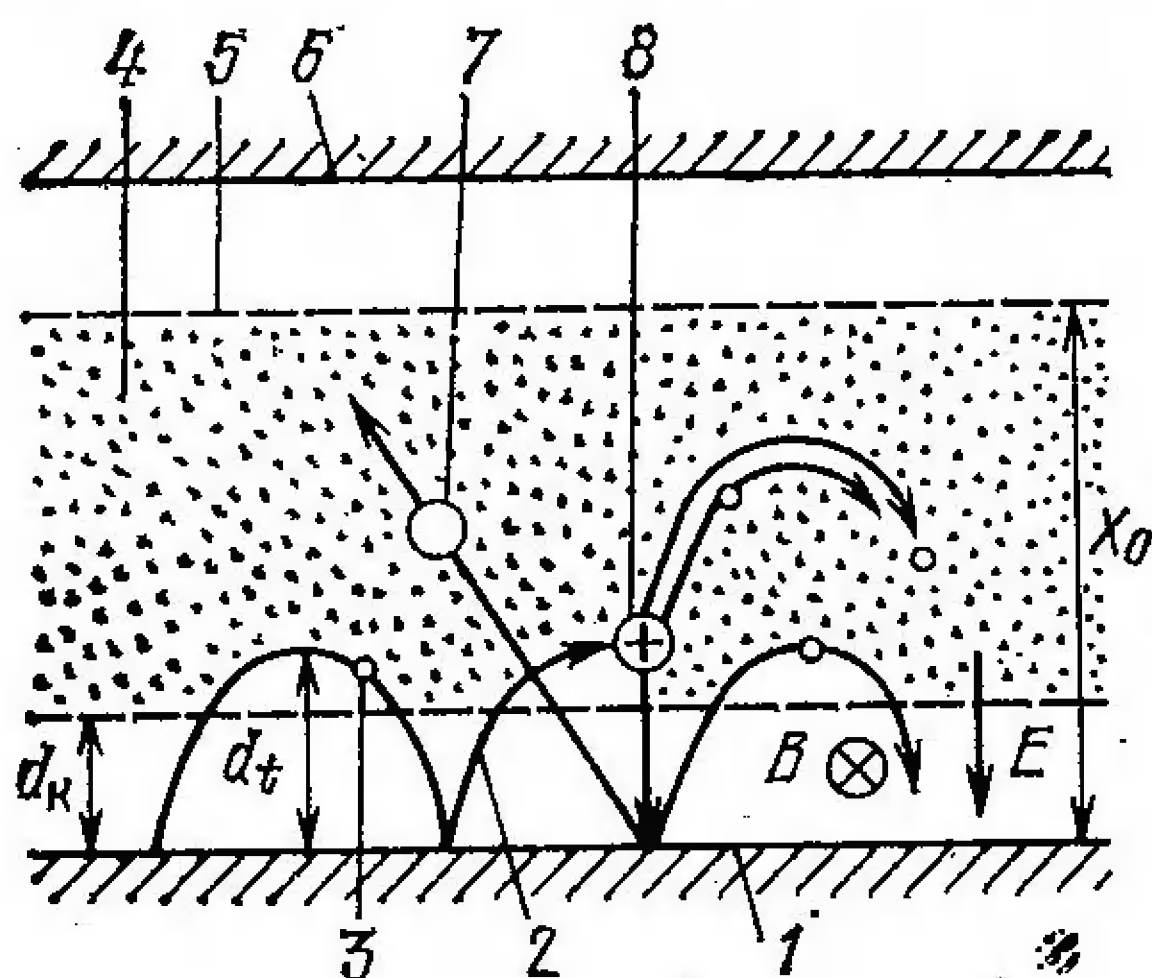


Рис. 12. Схема разрядного промежутка магнетронной распылительной системы:

1 — катод-мишень; 2 — траектория вторичного электрона; 3 — электрон; 4 — плазма; 5 — условный анод; 6 — анод; 7 — распыленный атом; 8 — ион

Ширина ТКП для случая $d_t = h_{\perp} = d_K$ определяется по формуле

$$d_K = 3,37 \cdot 10^{-6} \sqrt{U_K / B_K}, \quad (6)$$

где B_K — индукция магнитного поля в области темного катодного пространства, Т. Ширину ТКП, вычисленную по формуле (6), можно считать максимально возможной, поскольку в этом случае практически все электроны с катода движутся в области ТКП и не выходят в область отрицательного свечения плазмы, где они должны эффективно ионизировать газ. Реальную ширину ТКП можно приближенно выразить через плотность ионного тока по известной формуле Чайлда—Ленгмюра:

$$d_K = 4,7 \cdot 10^{-11} U_K^{3/4} / (m_i j_i^2)^{1/4}, \quad (7)$$

где m_i — масса иона, кг; j_i — плотность ионного тока на катоде, А/м².

Если электрон не столкнется на своем пути с другой частицей, то он возвращается к катоду и может быть обратно захвачен им. Вероятность захвата довольно велика, поскольку длина свободного пробега электрона значительно больше длины циклоиды. Однако из-за волновых процессов в плазме и неоднородности магнитного и электрического полей вероятность захвата уменьшается и считают, что она составляет 0,5 [9].

Электроны, которые попадают в магнитную ловушку и не возвращаются на катод, начинают совершать столкновения в плазме, в результате которых (а также колебаний в плазме) перемещаются в сторону анода. Совершив несколько ионизирующих столкновений, электрон теряет энергию и диффундирует к аноду. Область, в пределах которой электрон теряет энергию, является областью существования плазмы. Граница этой области в разряде магнетронной системы по существу условный анод.

Определение положения условного анода. Если магнитная ловушка достаточно эффективна, т. е. электрон циклирует в ней до тех пор, пока вся его энергия, полученная от электрического поля, не будет использована на поддержание и образование плазмы, то один электрон может произвести W_e/W_0 ионов, где W_e — энергия, полученная электроном от электрического поля, а W_0 — суммарная энергия, затрачиваемая им на один акт ионизации. В первом приближении можно считать $W_e = eU_p$, где U_p — напряжение на разряде. Величина W_0 включает энергию ионизации $e\phi_i$ (ϕ_i — потенциал ионизации рабочего газа) и энергию, затраченную на резонансное и нерезонансное возбуждение (энергию, затраченную на упругие соударения, можно не учитывать, поскольку при низких давлениях вероятность упругих соударений очень мала) [17]. Расчет W_0 затруднителен, и обычно пользуются экспериментальными данными. Для аргона $W_0 = 4,8 \cdot 10^{-18}$ Дж/ион (30 эВ/ион) [19].

Определив таким образом число ионизирующих столкновений, которое может совершить электрон, и учитывая, что при каждом столкновении в плазме электрон удаляется от катода на расстояние, примерно равное ларморовскому радиусу, с использованием формул (1) и (5), можем рассчитать расстояние от катода до условного анода в МРС для разряда в аргоне:

$$X_0 = 2,25 \cdot 10^{-7} U_p \sqrt{\bar{U}_R} / B. \quad (8)$$

Формула (8) не учитывает изменения ларморовского радиуса электрона вследствие неоднородности магнитного поля и изменения его энергии при дрейфе в плазме. Она может быть использована лишь для приближенной оценки положения условного анода в разряде с преимущественным анодным падением потенциала. В случае разряда с преимущественным катодным падением потенциала положение условного анода определяется из выражения

$$X_0 = 8,4 \cdot 10^3 \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{W_e - i W_0} \right) / B, \quad (9)$$

где $N = W_e/W_0$ — число ионизирующих столкновений, которое может совершить электрон с атомами рабочего газа.

Для учета неоднородности магнитного поля следует для расчета брать среднее значение индукции в области плазмы (обычно 0,6—0,7 максимального значения у распыляемой поверхности). В частном случае при движении электрона по циклоиде в однородных электрическом и магнитном полях с учетом выражения (3)

$$X_0 = 2 m_e E U_p / W_0 B^2. \quad (10)$$

Реальный анод МРС должен располагаться от центра зоны распыления на расстоянии, не меньшем X_0 , в противном случае он будет захватывать из магнитной ловушки электроны, способные ионизировать газ, и эффективность разряда будет уменьшаться. При периферийном расположении анода в плоских МРС он дол-

жен устанавливаться вне области входа и выхода силовых линий магнитного поля.

Локализация плазмы разряда. Одной из особенностей магнетронных распылительных систем является локализация плазмы аномального тлеющего разряда у распыляемой поверхности мишени, причем плазма имеет форму, близкую к тороидальной, и степень ее ионизации максимальна в центральной части над зоной распыления. Причина локализации плазмы относительно средней линии зоны распыления объясняется неоднородностью магнитного и электрического полей.

Прежде всего локализация плазмы происходит вследствие магнитной фокусировки электронов в магнитном поле, силовые линии которого имеют форму дуги. Это явление можно рассмотреть на примере электронов, начальные скорости которых направлены по нормали к поверхности мишени.

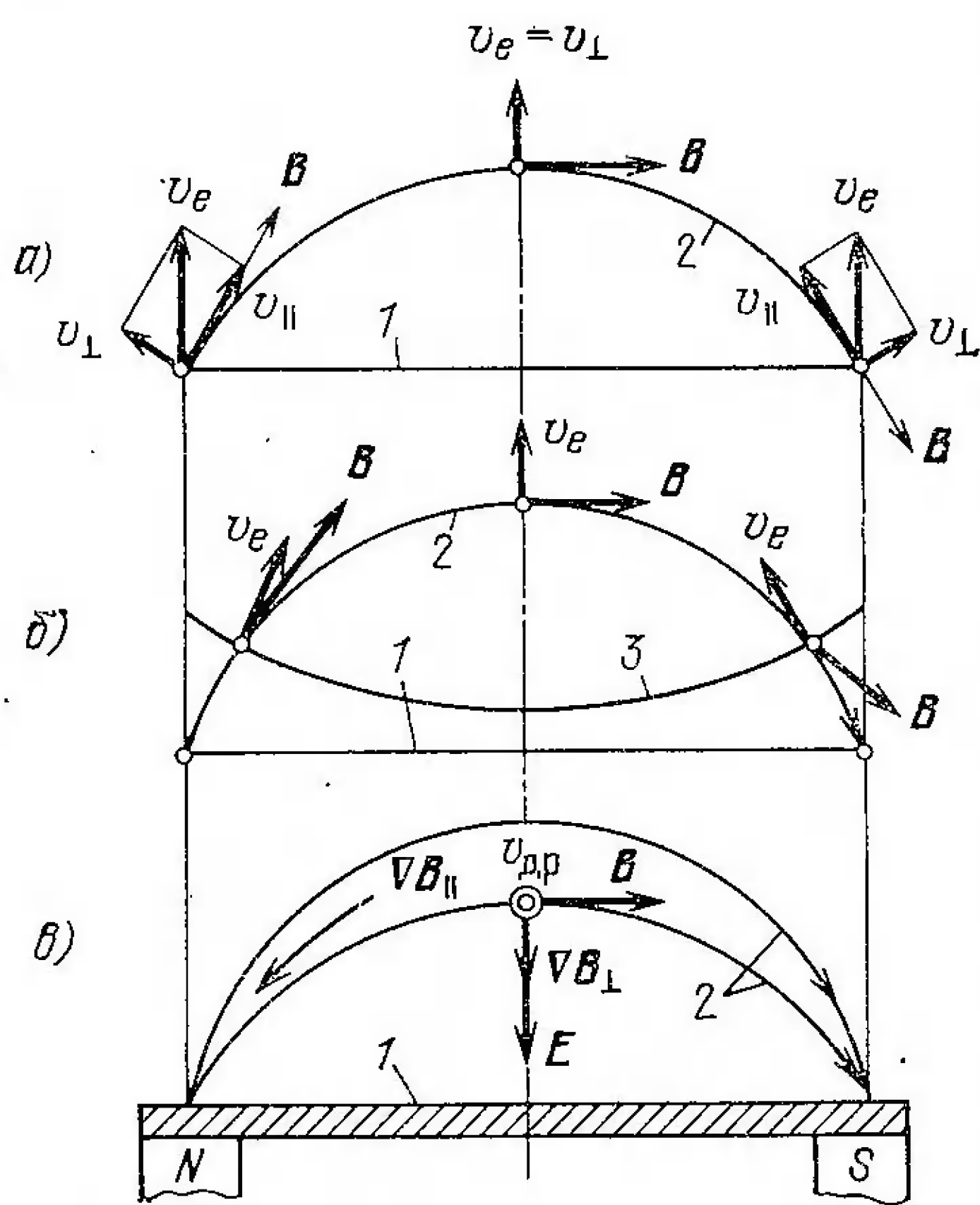


Рис. 13. Фокусирующее действие магнитного (а) и электрического (б) полей на электроны и возникновение дрейфовых движений электронов (в):

1 — катод-мишень; 2 — силовая линия магнитного поля; 3 — эквипотенциальная поверхность на границе темного катодного пространства

по нормали к поверхности мишени. Из рис. 13,а видно, что электроны, эмиттированные с краев зоны распыления, двигаются вдоль силовой линии магнитного поля к середине зоны распыления под действием составляющей скорости $v_{||}$, в то время как движение в направлении v_{\perp} ограничено сильным поперечным магнитным полем. Концентрация электронов над средней частью зоны распыления приводит к увеличению интенсивности ионизирующих столкновений и, следовательно, росту плотности плазмы в этой области. В результате этого плотность ионного тока по зоне распыления неоднородна: сильнее в центре и слабее у границ. Поскольку ширина ТКП обратно пропорциональна плотности ионного тока [см. формулу (7)], то границы этой области искажаются, что влечет за собой появление неоднородности электрического поля (рис. 13,б). Эквипотенциальная

поверхность на границе ТКП вогнутая, и электроны, ускоряющиеся в области ТКП, приобретают под действием электрического поля скорости в направлении к центру зоны распыления.

Дальнейший анализ движения электронов в разряде МРС показывает, что при рассмотренной геометрии магнитного поля они совершают также градиентный и центробежный дрейфы со скоро-

стью, определяемой по формуле (4), причем существуют как поперечный ($\nabla \mathbf{B}_\perp$), так и продольный ($\nabla \mathbf{B}_\parallel$) градиенты индукции. При изображенных на рис. 13,в направлениях \dot{E} , B и $\nabla \mathbf{B}_\perp$ электроны будут дрейфовать перпендикулярно плоскости рисунка вверх. За счет продольного градиента индукции электроны, имеющие составляющую скорости в его направлении, будут тормозиться и отражаться магнитным полем к центру плазменного кольца, прежде чем они достигнут поверхности катода, поскольку каждый электрон стремится к сохранению своего магнитного момента $\mu_M = m_e v_\perp^2 / B$.

Формирование пространственных зарядов в плазме. Исследования разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, проведенные в магнетронной системе с коаксиальными цилиндрическими электродами, показали, что магнитное поле оказывает очень сильное влияние на параметры и структуру разряда. Поскольку, как было показано выше, движение ионов в плазме слабо зависит от используемых в МРС магнитных полей, подвижность электронов поперек магнитного поля становится значительно ниже, чем для ионов, и уход электронов на анод при больших магнитных полях затруднен. Это приводит к тому, что у анода образуется отрицательный объемный заряд и формируется анодный слой, в котором происходит анодное падение потенциала. При достаточно большом магнитном поле почти все приложенное напряжение может падать в анодном слое. Электроны, ускоряясь в этой области, ионизируют атомы газа, в результате чего доминирующей областью ионизации становится прианодная область, причем толщина анодного слоя является функцией магнитного поля. Таким образом, в случае скрещенных электромагнитных полей могут наблюдаться три типа разрядов в зависимости от величины магнитного поля: разряд с областью катодного падения, разряд с областью анодного падения и разряд с одновременным существованием обеих областей (рис. 14) [5].

Первый тип разряда наблюдается в обычных распылительных системах и в магнетронных системах со слабыми магнитными полями (индукция до 0,01—0,03 Т) и характеризуется наличием у катода области с положительным пространственным зарядом. При достаточно сильных магнитных полях у анода образуется отрицательный пространственный заряд, начинает формироваться область анодного падения потенциала, и при индукции магнитного поля порядка 0,1 Т в разряде существуют явно выраженные области как катодного, так и анодного падения потенциала. При дальнейшем увеличении поля растет анодное падение потенциала и формируется разряд с отрицательным пространственным зарядом и прианодной областью ионизации. Величина индукции магнитного поля, при которой возникает этот тип разряда, зависит от конструкции разрядной системы, рабочего давления и ряда других факторов. Наиболее подробные исследования были проведены в цилиндрической разрядной системе. Эти исследования показали, что для целей распыления материалов наиболее эффек-

тивен разряд с положительным пространственным зарядом и катодным падением потенциала. Однако разряд с одновременным существованием как катодного, так и значительного анодного потенциалов также оказался весьма эффективным для распыления материалов, поскольку он обеспечивает равномерное распределение плотности тока по распыляемой поверхности мишени.

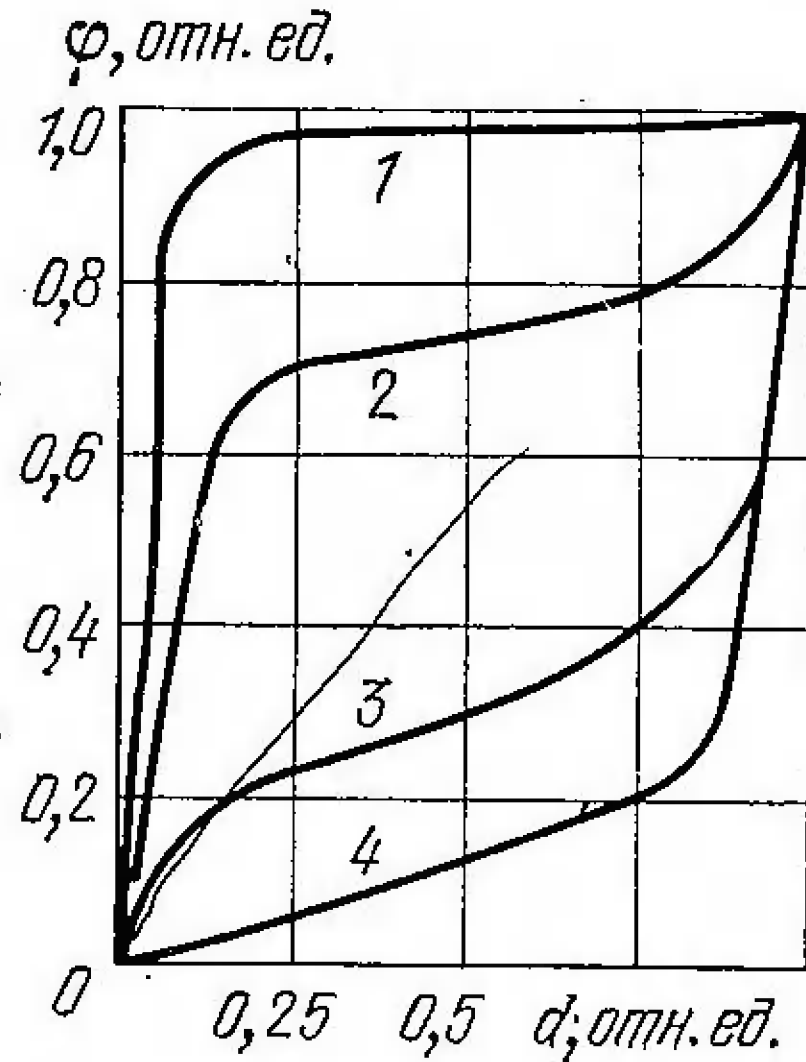


Рис. 14. Распределение потенциала в разрядном промежутке магнетронной распылительной системы с цилиндрическими электродами:

1 — область с положительным пространственным зарядом у катода; 4 — область с отрицательным пространственным зарядом у анода; 2, 3 — одновременное существование обеих областей. (Расстояние откладывается от поверхности катода.)

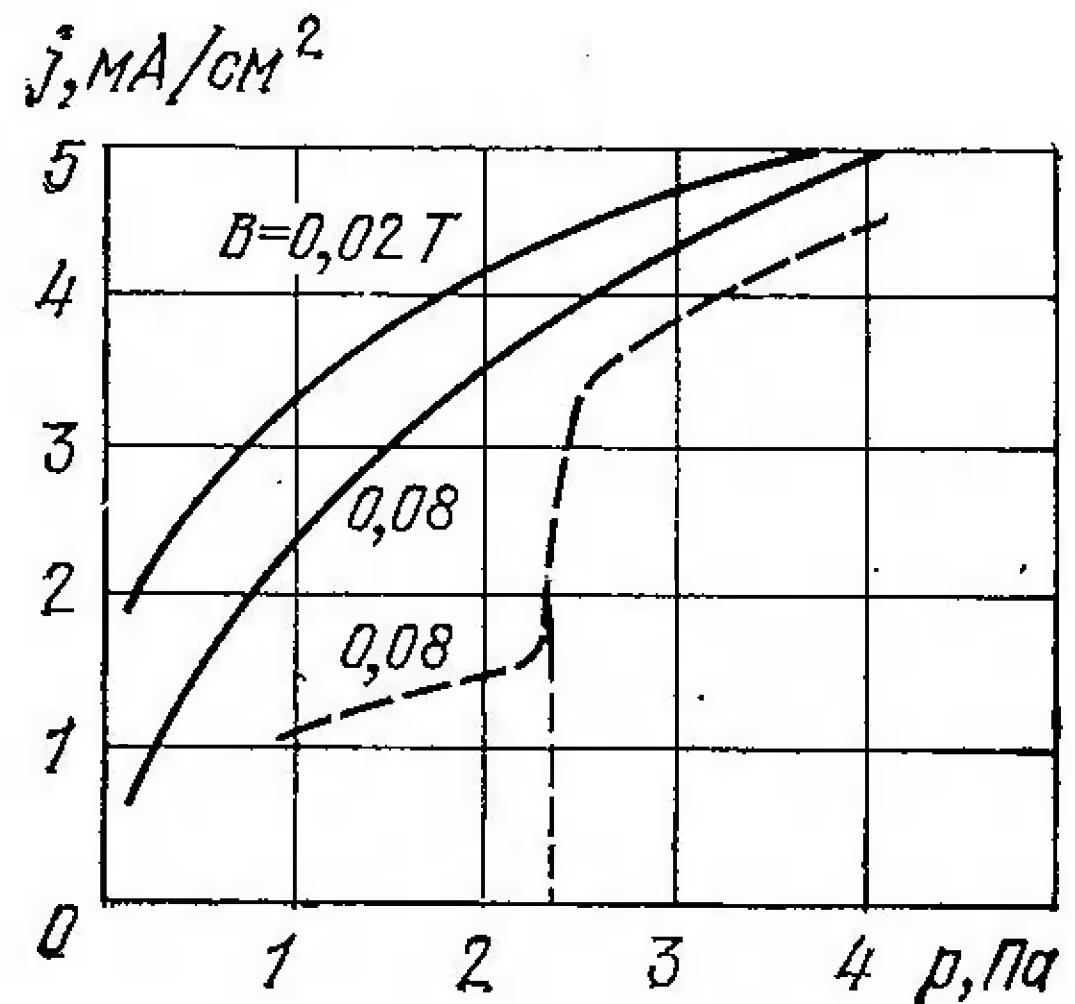


Рис. 15. Влияние давления на плотность тока разряда в магнетронной системе с мишенью в виде цилиндра с торцевыми дисками (сплошные кривые) и без них (штриховая кривая) при различной индукции магнитного поля. (Напряжение разряда постоянно и равно 500 В.)

Анализ различных вариантов конструкции магнетронных распылительных систем показывает, что все они в диапазоне используемых для разряда магнитных полей (0,03—0,1 Т) характеризуются наличием как положительного у катода, так и отрицательного у анода пространственных зарядов, причем анодное падение потенциала возрастает с ростом индукции магнитного поля.

Колебания в плазме и возникновение неустойчивостей. В плазме, находящейся в магнитном поле, возникают волновые явления [18]. Электроны могут совершать колебания вдоль силовых линий магнитного поля с частотой $\omega_{\text{п}} = 56,4n_e^{1/2}$, причем частота этих колебаний может превышать частоту столкновений электронов с атомами рабочего газа. Кроме того, электроны совершают колебания поперек силовых линий магнитного поля с частотой $(\omega_{\text{п}}^2 + \omega_e^2)^{1/2}$, где $\omega_e = 1,76 \cdot 10^{11} B$ — циклотронная частота электрона, с^{-1} . В плазме могут возникать колебания ионного тока, которые распространяются со скоростью, пропорциональной $(kT_e/m_i)^{1/2}$, где k — постоянная Больцмана; T_e — температура электрона. В плазме цилиндрической МРС экспериментально наблюдались колебания в диапазоне частот 50—500 кГц [9].

Колебания электронного и ионного токов, а также дрейфовый характер движения частиц в скрещенных неоднородных электрическом и магнитном полях приводят к возникновению неустойчивостей в плазме. Условия возникновения этих неустойчивостей определяются величиной индукции магнитного поля, конфигурацией магнитной ловушки, а также рабочим давлением (рис. 15), причем при определенных условиях и геометрии магнетронной системы существуют критические значения этих величин [3]. Скачкообразное изменение характеристик объясняется авторами [20] соотношением между шириной ТКП и высотой циклирования электронов и соответствует моменту $d_t = d_k$. Однако в [21] эти неустойчивости связываются с потерями электронов на торцах в исследуемой цилиндрической системе при слабых режимах разряда.

Одним из источников неустойчивости рабочих характеристик магнетронных распылительных систем является возникновение электрических дуг на мишени (особенно в начале работы), поэтому в источнике питания необходимо предусмотреть устройство для их подавления. Электрические дуги резко уменьшают напряжение на разряде и увеличивают токи, что может быть причиной выхода из строя источников питания и элементов магнетронной системы. В разряде наблюдаются два типа электрических дуг: в виде катодных пятен, перемещающихся с большой скоростью вдоль распыляемой поверхности, и в виде контрагированных токовых каналов, возникающих между мишенью и анодом вдоль силовых линий магнитного поля.

Первый тип электрических дуг наблюдается при зажигании разряда, связан с наличием загрязнений и окислов на распыляемой поверхности и объясняется пробоем диэлектрической пленки окислов, существующих на мишени, и локальным увеличением электронной эмиссии при наличии загрязнений. По мере ионной очистки распыляемой поверхности эти дуги прекращаются. Время очистки мишени зависит от ее чистоты и распыляемого материала. Чем химически активнее распыляемый материал и выше парциальное давление реактивных газов в вакуумной камере, тем дольше время очистки мишени.

Самопроизвольное возникновение неустойчивостей в виде контрагированных токовых каналов, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля, — одно из характерных свойств плазмы, движущейся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Эти неустойчивости связаны, очевидно, с низкочастотными неустойчивостями разряда [22]. Причина их возникновения окончательно не решена, и в настоящее время еще не установлено, связано оно с ионизационной неустойчивостью или же с турбулентностью плазмы. Однако известно, что главной их причиной является дрейфовый характер движения зарядов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Пробои вдоль силовых линий магнитного поля кратковременны, и разряд быстро самовосстанавливается без изменения первоначальных электрических параметров. Поэтому этот вид дуг менее опасен, чем возникновение катодных пятен, подавление которых требует кратковременного снятия напряжения питания с помощью специального устройства в блоке питания магнетронной системы распыления.

Влияние магнитного поля и давления на разряд. Как уже отмечалось, рабочее давление оказывает значительное влияние на условия существования разряда в МРС. В обычных распылительных системах процесс распыления возможен при давлениях $p \geq \lambda_0/l$, где λ_0 — длина свободного пробега электрона при единичном давлении, м; l — расстояние между электродами, м. В магнетронной системе магнитное поле увеличивает траекторию движения электронов в межэлектродном промежутке, следовательно, возрастает и число столкновений с атомами рабочего газа. В результате этого разряд существует при более низких давлениях, и можно считать, что наложение магнитного поля эквивалентно увеличению давления газа. Эквивалентное давление в присутствии магнитного поля

$$p_s = p_0 [1 + (\omega_e \tau_e)^2]^{1/2}, \quad (11)$$

где p_0 — рабочее давление при отсутствии магнитного поля; τ_e — время между столкновениями электрона с атомами рабочего газа, с. Из (11) видно, что влияние магнитного поля эффективно при $\omega_e \tau_e \gg 1$. Для стационарного режима существования разряда в магнетронной распылительной системе характерны следующие условия:

$$\omega_e \tau_e \gg 1; \quad \omega_i \tau_i < 1; \quad r_{\text{ли}i} > l > r_{\text{ли}e}; \quad \lambda_i > l, \quad (12)$$

где $r_{\text{ли}e}$, $r_{\text{ли}i}$ — циклотронные радиусы электрона и иона соответственно; ω_i — циклотронная частота иона; τ_i — время между столкновениями ионов с потерей направленного импульса; λ_i — длина свободного пробега иона; l — характерный размер системы.

Модель разряда и вывод его вольт-амперной характеристики. Разработка физической модели происходящих в разряде магнетронной распылительной системы процессов и аналитическое их описание дают возможность объяснить наблюдаемые явления и выбрать конструктивные и рабочие характеристики этих систем. О механизме разряда наиболее полную информацию несут вольт-амперные характеристики.

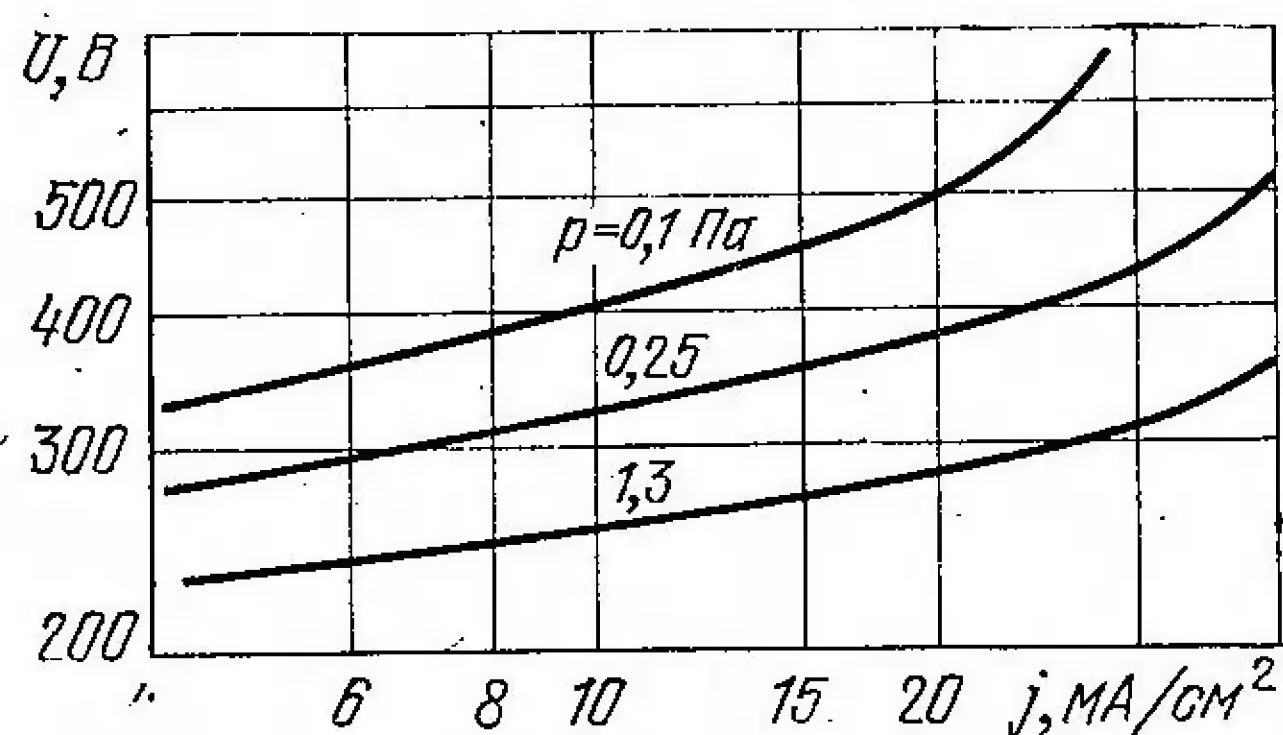


Рис. 16. Вольт-амперные характеристики магнетронной системы распыления с плоским катодом при различных давлениях аргона

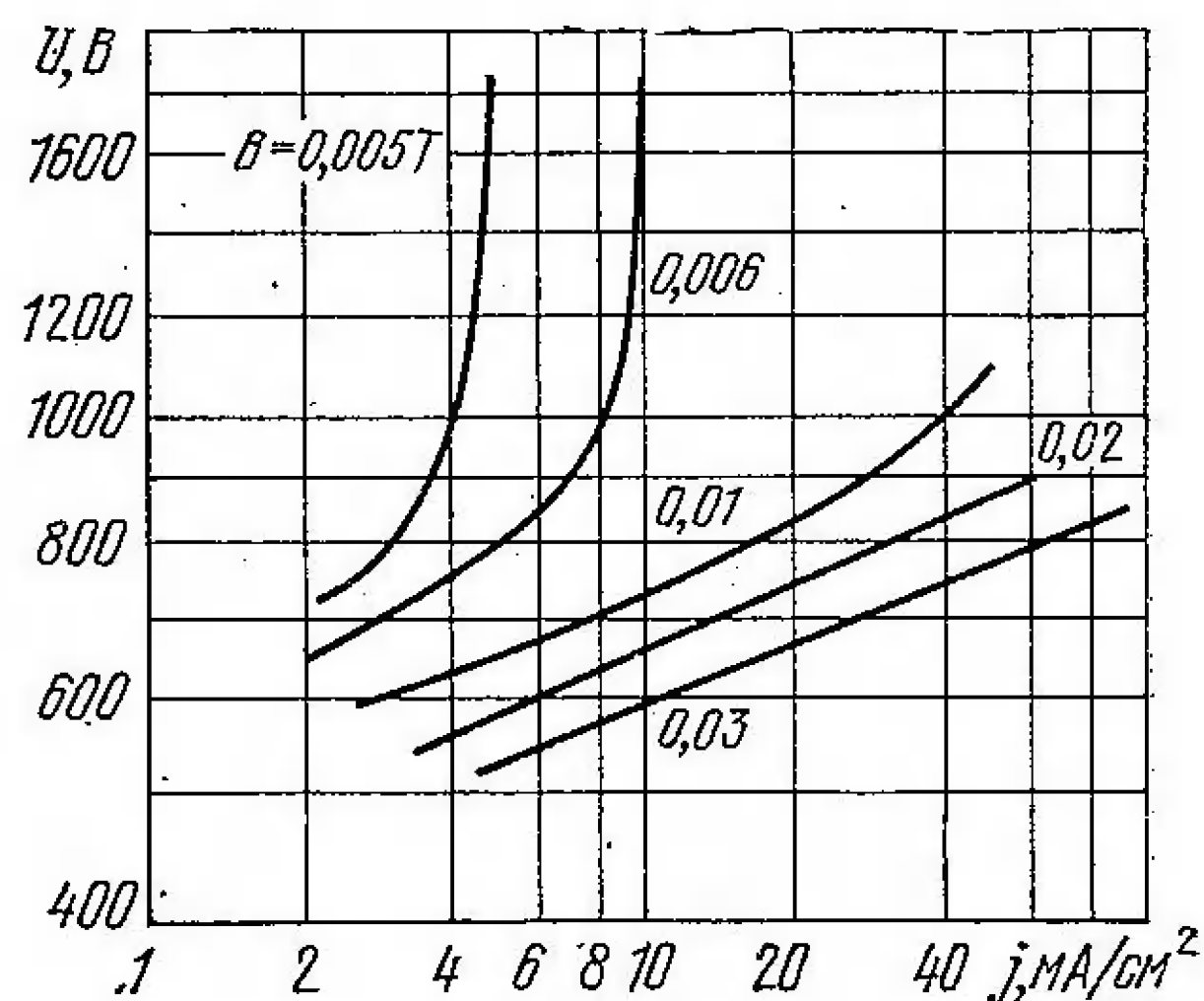


Рис. 17. Вольт-амперные характеристики цилиндрической магнетронной системы распыления при постоянном давлении аргона 1,3 Па и различной индукции магнитного поля

Типичные вольт-амперные характеристики планарной магнетронной распылительной системы приведены на рис. 16, а для цилиндрической — на рис. 17. Экспериментальные кривые можно описать уравнением вида

$$I = KU^n, \quad (13)$$

где I — ток разряда; U — рабочее напряжение; K — коэффициент пропорциональности; $n = 5 \div 9$ — показатель, зависящий от эффек-

тивности улавливания электронов магнитной ловушкой [9]. Этот показатель тем выше, чем эффективней удерживаются электроны в области разряда.

Как видно из рис. 16 и 17, вольт-амперные характеристики, построенные в логарифмическом масштабе, в широких пределах представляют собой линейные зависимости. Значительное отклонение от линейности наблюдается при низких давлениях и небольших индукциях магнитного поля. Это является результатом ухода высокоэнергетических электронов из области плазмы вследствие того, что их циклотронный радиус при слабых магнитных полях превышает расстояние между катодом и анодом.

В [23] вольт-амперные характеристики разряда магнетронной системы экстраполировались выражением

$$I = K(U - U_3)^2, \quad (14)$$

где U_3 — напряжение зажигания разряда; K — коэффициент пропорциональности. Зависимость этого коэффициента от параметров распылительной системы в каждом конкретном случае определяется эмпирически.

Исследования показывают, что рабочее напряжение магнетронной распылительной системы зависит как от давления в ней рабочего газа [9] (рис. 18), так и от индукции магнитного поля

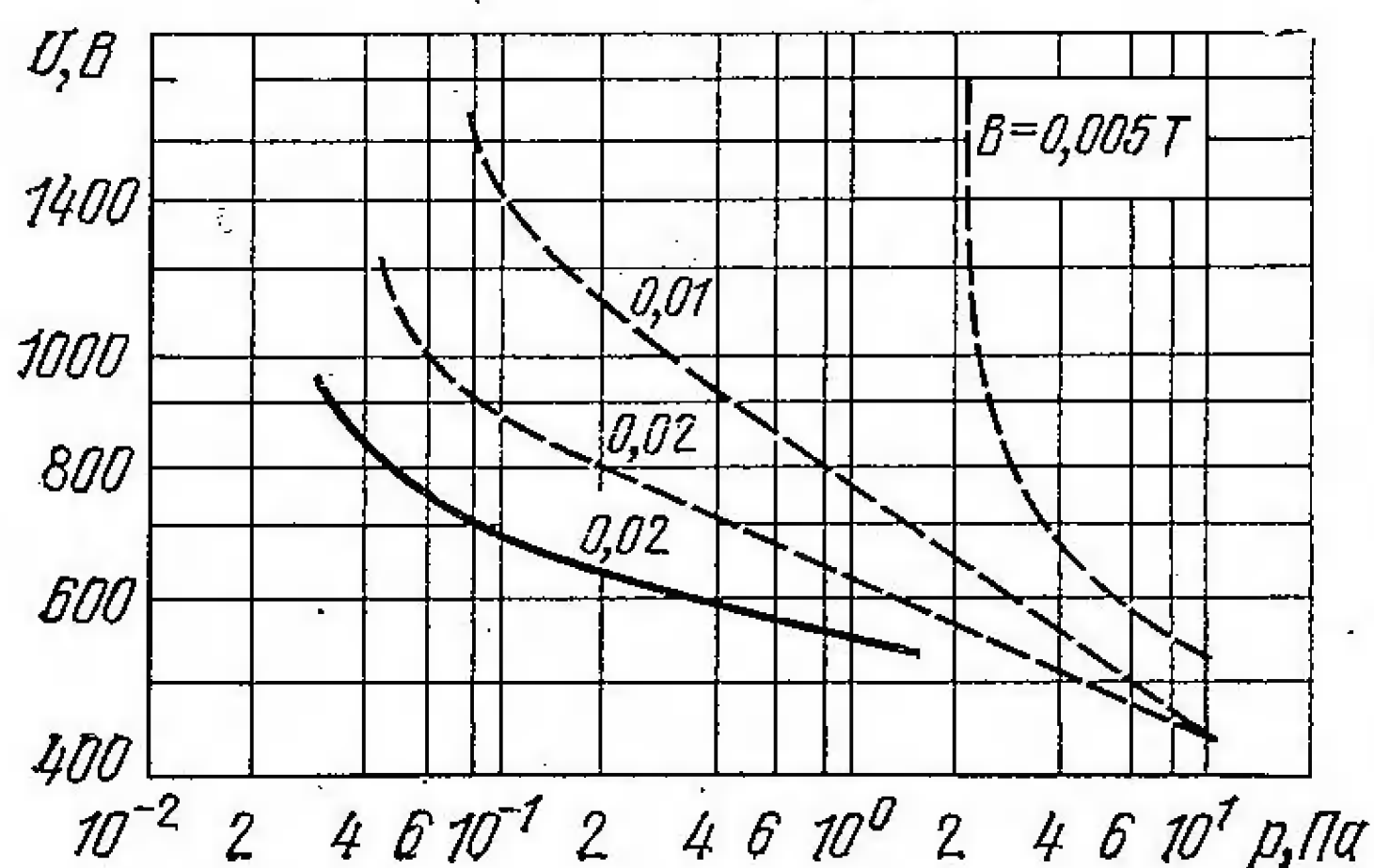


Рис. 18. Влияние давления на напряжение при постоянном токе разряда (сплошная кривая при токе разряда 1 А, штриховые — при 3 А) и различной индукции магнитного поля

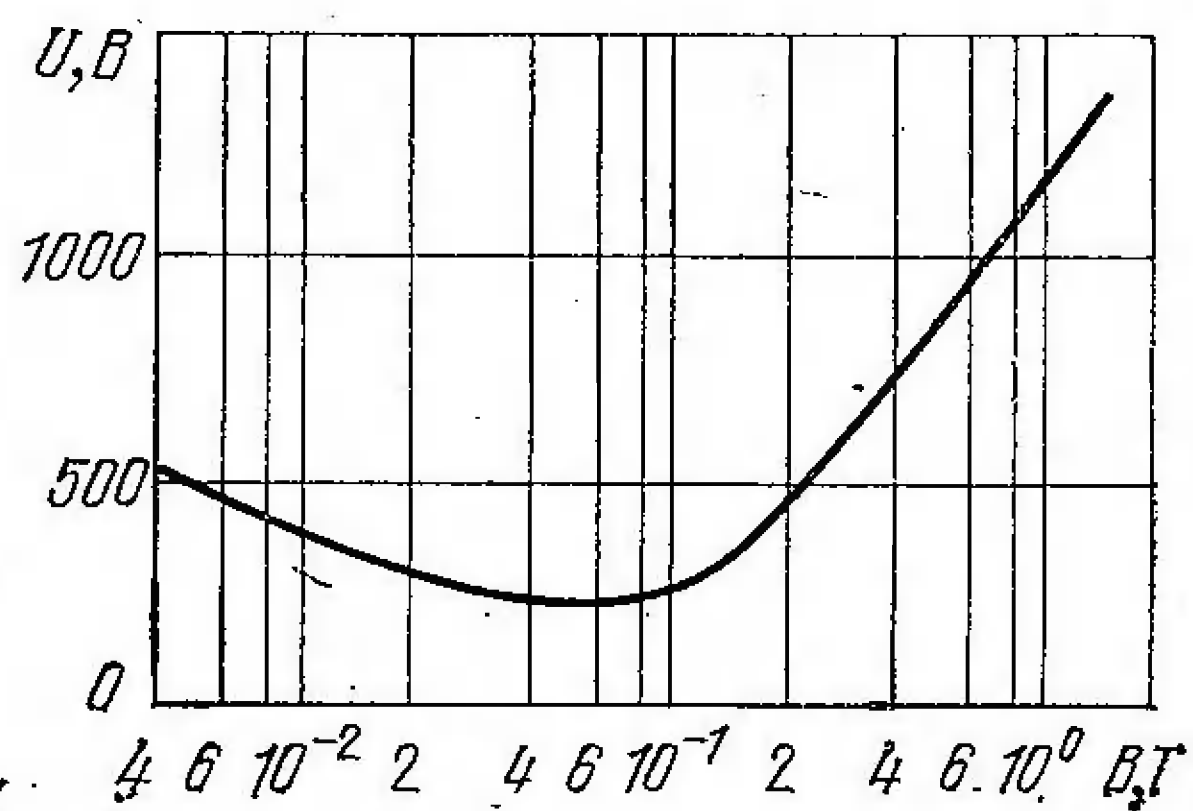


Рис. 19. Взаимосвязь магнитного поля и напряжения при постоянных значениях тока разряда и давления в цилиндрической магнетронной распылительной системе

[24]. Зависимость рабочего напряжения от B (рис. 19) можно представить в виде

$$U = KB^n, \quad (15)$$

где $n = -(1 \div 2)$ для достаточно слабых магнитных полей и $0,3 \div 0,5$ для сильных полей. Стабильный разряд существует в области определенных значений B и p , и чем ниже p , тем при больших B может существовать разряд (рис. 20).

Исходя из рассмотренных особенностей разряда можно предложить следующую модель происходящих в нем процессов [6, 7]:

основную роль в образовании и поддержании плазмы в магнетронной системе играют вторичные электроны, которые под действием скрещенных электрического и магнитного полей совершают направленное движение вдоль зоны распыления у мишени по траектории, близкой к циклоиде, причем под действием холловского дрейфа плазма совершает движение по замкнутой кривой с частотой $f = E/LB$, где L — длина зоны распыления, м;

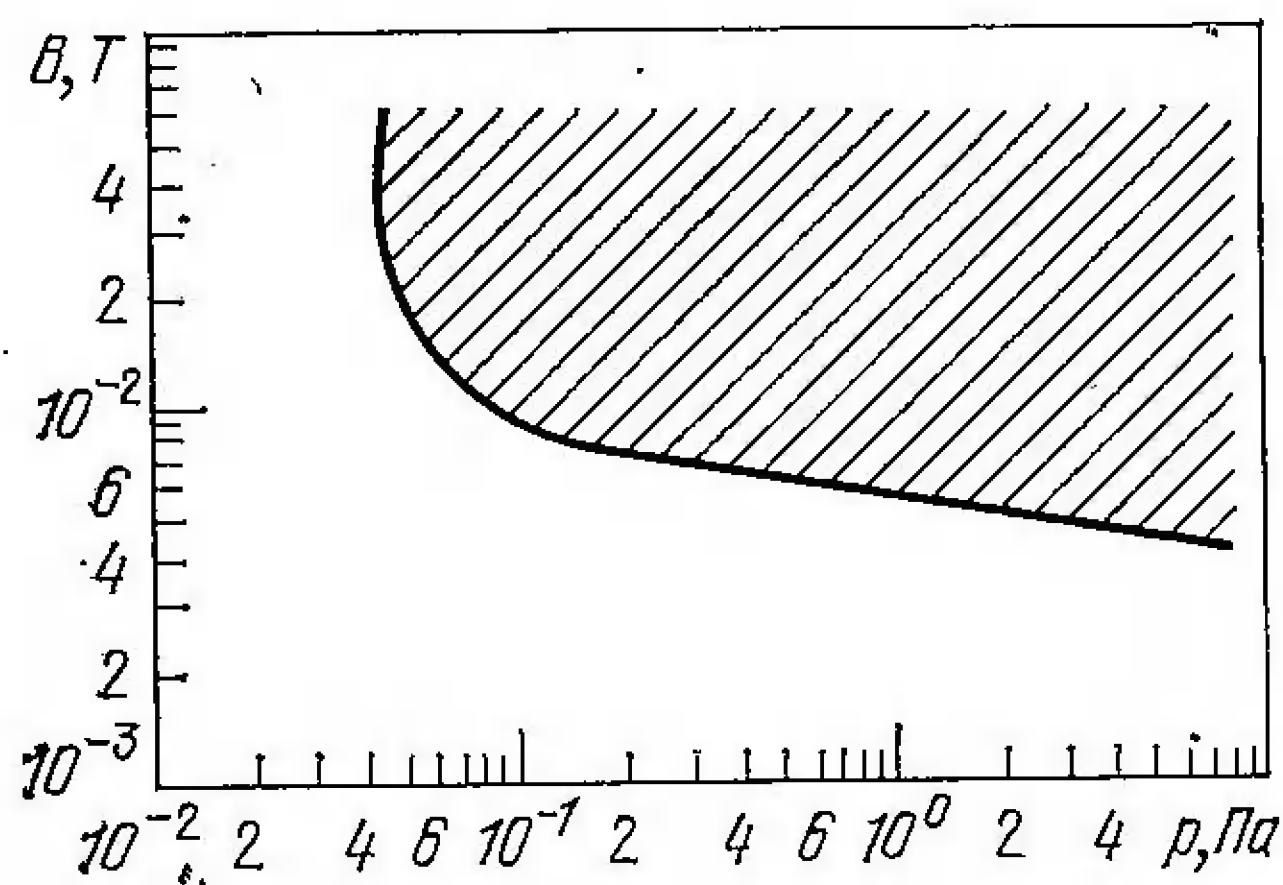


Рис. 20. Область значений давления и индукции магнитного поля, соответствующих условию существования стабильного разряда в цилиндрической магнетронной системе распыления

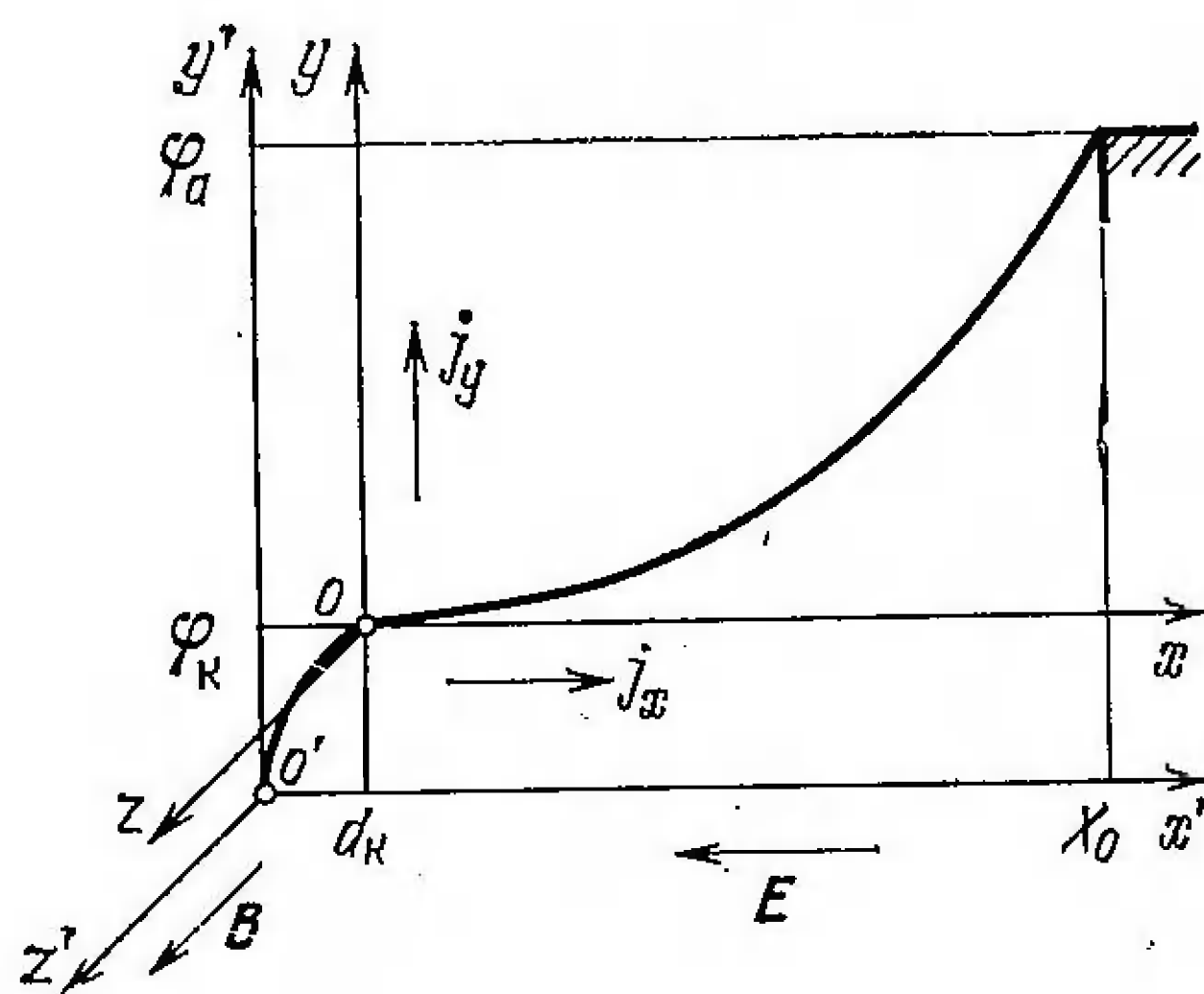


Рис. 21. Распределение потенциала в разрядном промежутке магнетронной системы распыления, принятое при выводе ее вольт-амперных характеристик

вторичный электрон совершает циклоидальное движение до тех пор, пока длина пройденного им пути не превысит среднюю длину свободного пробега электрона в газе при данном давлении. Затем с определенной вероятностью происходит ионизирующее столкновение электрона с атомом рабочего газа, после чего электрон удаляется от мишени на расстояние, примерно равное циклотронному радиусу;

в области ТКП происходит сравнительно небольшое падение напряжения, обусловленное необходимостью разгона вторичных электронов с мишени до энергий, при которых начинается эффективная ионизация рабочего газа; остальное напряжение падает в прианодной области (вблизи условного анода);

благодаря наличию достаточно сильного поперечного магнитного поля происходит накопление отрицательного заряда в прианодной области, в результате чего сильное электрическое поле возникает как в прикатодной, так и в прианодной областях, где и происходят в основном процессы ионизации атомов рабочего газа;

поскольку магнитное поле не оказывает существенного влияния на характер движения ионов, то последние не участвуют в процессе ионизации и сразу же после образования свободно ухо-

дят из зоны ионизации к мишени, образуя у ее поверхности положительный пространственный заряд, что позволяет не учитывать концентрацию ионов в прианодной области. Энергия бомбардирующего мишень иона зависит от того, в какой области плазмы он образовался. Средняя энергия ионов в МРС, как показали исследования, составляет примерно $W_i = 0,7eU_p$.

На основании предложенной модели выведены формулы (8) — (10) для расчета положения условного анода. Ограничившись анализом прианодной области плазмы, которая в сильном поперечном магнитном поле играет определяющую роль в поддержании разряда, можно в первом приближении рассмотреть стационарную задачу для плоского слоя (рис. 21). Ось ox направим поперек слоя, ось oy — вдоль, а магнитное поле — по оси oz . Считая, что преобладающим механизмом переноса электронов к аноду по оси ox является электрический дрейф, определяемый классической поперечной подвижностью электронов в магнитном поле, и пренебрегая ионным током в слое, поскольку концентрация ионов мала, можно записать исходную систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} j_x &= ebn_e \frac{d\varphi}{dx}; \\ j_y &= \omega_e \tau_e j_x; \\ \frac{dj_x}{dx} &= e \nu_i n_e; \\ \frac{d^2 \varphi}{dx^2} &= en_e / \epsilon_0; \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} b &= e \tau_e / (1 + \omega_e^2 \tau_e^2) m_e; \\ \nu_i &= n_0 \langle \sigma_i v_e \rangle; \\ \tau_e &= 1 / n_0 \langle \sigma_0 v_e \rangle; \\ \omega_e &= e B / m_e, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где j_x и j_y — плотности тока электронов, А/м²; b — поперечная подвижность электронов; n_e и n_0 — концентрация электронов и нейтральных частиц, м⁻³; φ — электрический потенциал, В; ν_i — частота ионизационных столкновений электронов с нейтральными частицами, с⁻¹; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; σ_i — сечение ионизационных столкновений, м²; σ_0 — сечение столкновений электрона с нейтральными атомами, м²; v_e — скорость электрона, м/с.

Рассматривая сильные магнитные поля ($\omega_e \tau_e \gg 1$) и полагая, что электроны обладают энергией, существенно большей потенциала ионизации (это позволяет считать частоту ионизации постоянной и не зависимой от энергии [4]), можно решить систему уравнений (16) с граничными условиями $\varphi = 0$, $d\varphi/dx = E_0$ при $x = 0$ и получить выражение для ВАХ

$$I = C (U^2 - 1,5 U U_0 + 0,5 U_0^2), \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где } C &= N(p + D); & N &= \frac{4 \varepsilon_0 S_K \alpha(B)}{X_0^3 G B^2}; \\ D &= (S_c/S_n) G B; & G &= \frac{e k T}{m_e \langle \sigma_0 v_e \rangle}; \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

U_0 — минимальный потенциал, при котором существует разряд (потенциал гашения разряда), зависящий от давления рабочего газа и величины индукции магнитного поля, В; C , N , D — коэффициенты, зависящие от индукции магнитного поля; S_K — площадь распыляемой поверхности катода, м²; $\alpha(B)$ — параметр, определяющий изменение классической подвижности электронов в неоднородном магнитном поле; X_0 — координата условного анода магнетронной системы, м; S_c и S_n — площади сечения плазменного тороида и его поверхности соответственно, м²; T — температура рабочего газа, К.

Считая поверхность условного анода цилиндрической, можно найти

$$\left. \begin{aligned} S_c &= \pi R_0^2 (1 - \operatorname{arctg} n/90^\circ) + n X_0^2 (1 - n^2)/2; \\ S_n &= 2 \pi R_0 (1 - \operatorname{arctg} n/90^\circ) L; \\ R_0 &= X_0 (n^2 + 1)/2, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где R_0 — радиус цилиндрической поверхности условного анода, м; $n = l/X_0$, где l — половина ширины зоны распыления, м; L — длина зоны распыления, м.

Формулы (18) — (20) определяют взаимосвязь между рабочими (I , U , p , B) и конструктивными (X_0 , S_K , L , l , S_c , S_n) характеристиками МРС.

Следует отметить, что формула (18) была выведена при начальных условиях, когда $\varphi = 0$ при $x = 0$, т. е. без учета катодного падения потенциала. Если же учитывать катодное падение потенциала U_K , то формула (18) принимает вид

$$I = C [U^2 - 1,5 U U_0 + 0,5 U_0^2 - 0,5 U_K (U - U_0)]. \quad (21)$$

При малых же U_K формула (21) преобразуется в (18).

Формулы для ВАХ содержат параметры $\alpha(B)$ и $U_0(B, p)$, которые не определяются аналитически. Их можно найти, аппроксимируя экспериментальные ВАХ с помощью зависимости (18) или (21). Результаты такой аппроксимации по формуле (18) свидетельствуют о хорошем соответствии теории и эксперимента (рис. 22). С наибольшей точностью аппроксимируются ВАХ при малых давлениях и больших магнитных полях. При уменьшении индукции и увеличении давления наблюдается отклонение экспериментальных точек от теоретических кривых в областях малых токов и напряжений. Это связано, очевидно, с тем, что в данном случае нарушается условие, допускающее достаточно высокие энергии электронов и постоянство частоты ионизации, а также существует значительное катодное падение потенциала.

По результатам аппроксимации ВАХ найдены зависимости $U_0=f(p)$ и $U_0=f(B)$. Зависимость потенциала гашения разряда от давления при достаточно сильных полях ($B \geq 0,06$ Т) представлена на рис. 23 (кривая 2). При $B < 0,06$ Т минимальное напряжение разряда становится также функцией B (кривая 1) и зависимости $U_0=f(p)$ перемещаются в область более высоких напряжений (кривые 3 и 4).

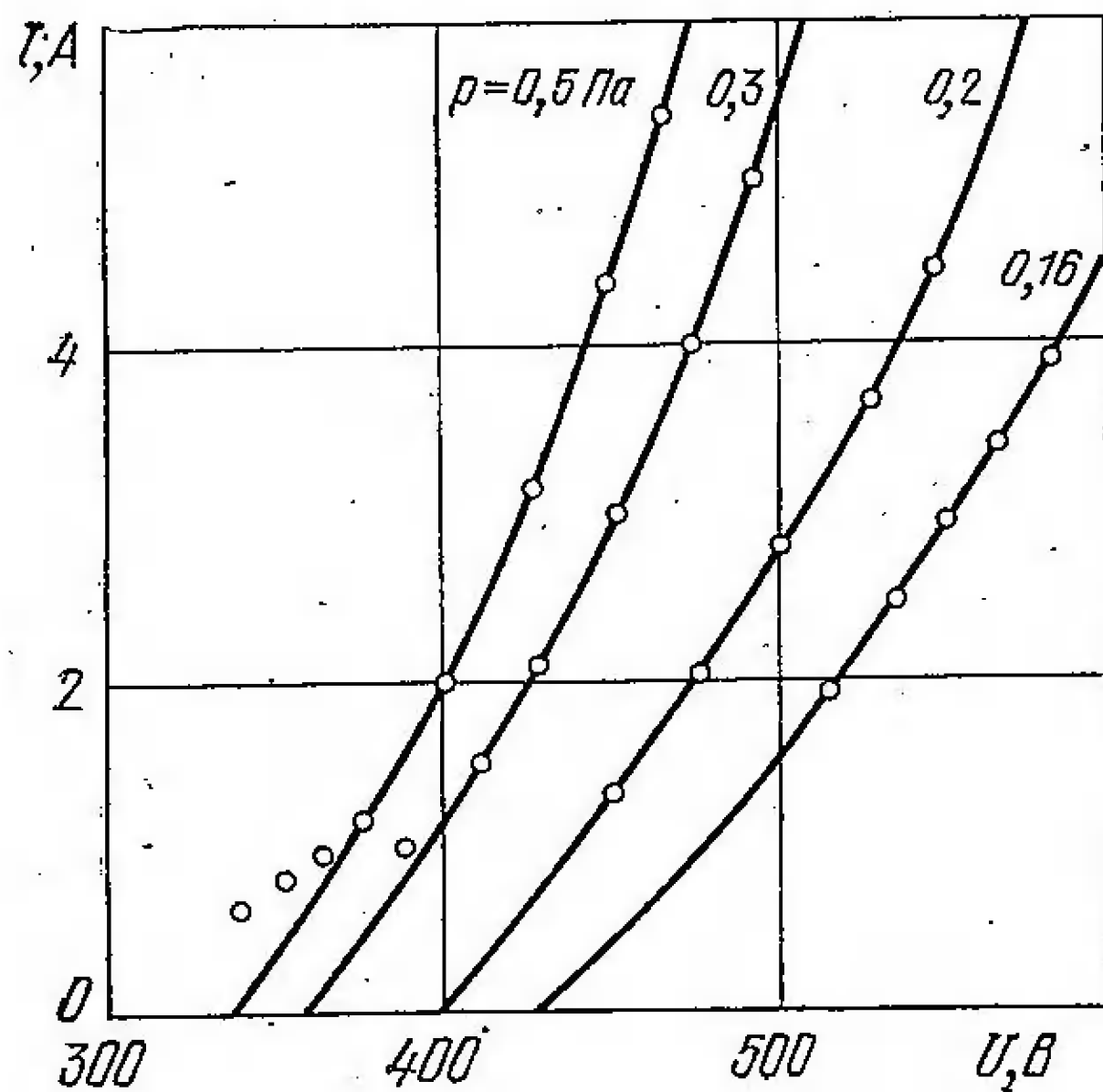


Рис. 22. Аппроксимация экспериментальных данных (кружки) расчетными (сплошные линии) вольт-амперными характеристиками при индукции магнитного поля 0,08 Т и различном давлении аргона

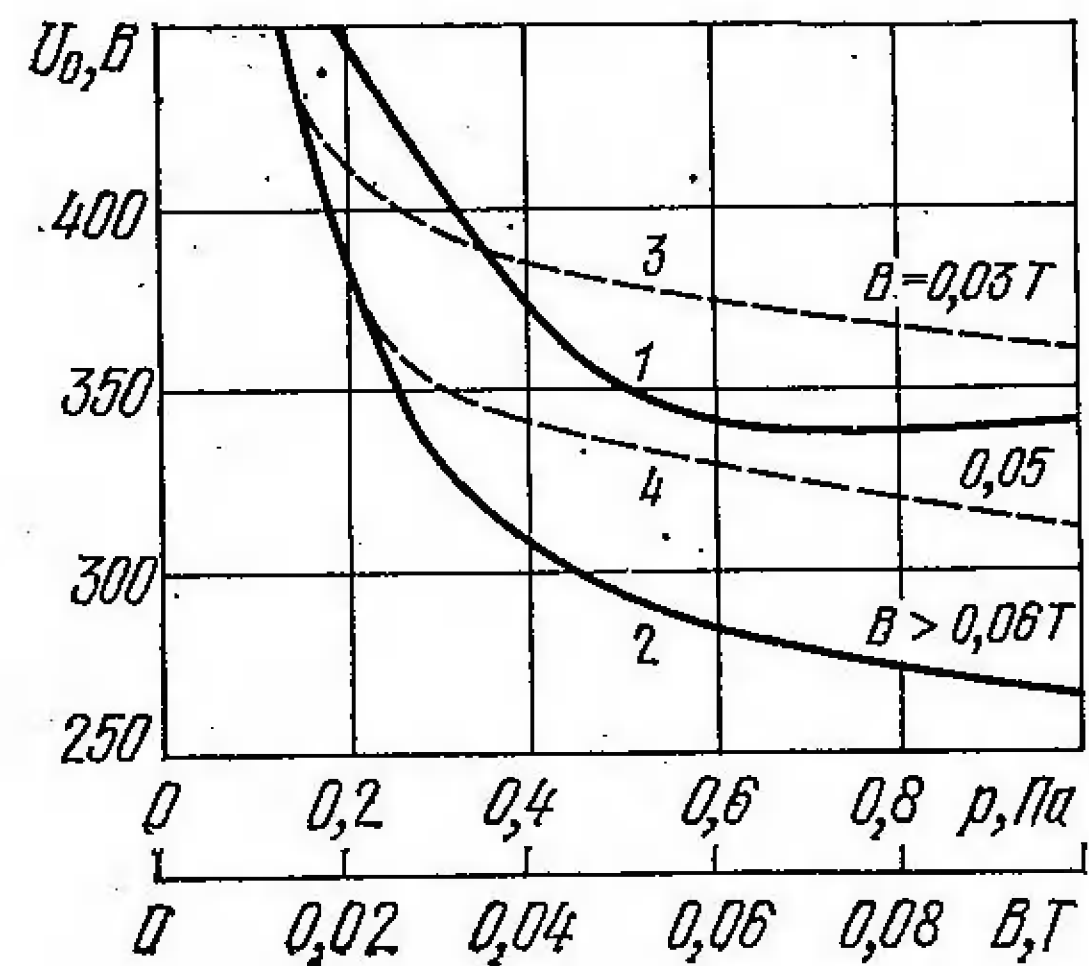


Рис. 23. Зависимость минимального напряжения разряда от индукции магнитного поля при $p=0,25$ Па (кривая 1) и давления аргона при различной индукции магнитного поля (кривые 2—4)

Результаты исследований показали, что скорость ионизации нейтральных частиц электронами плазмы $\langle \sigma_i v_e \rangle$ составляет 10^{-12} м³/с, что примерно в 1,5 раза выше, чем в разряде Пеннинга. Было также установлено, что за счет неоднородности полей подвижность электронов поперек магнитного поля на три порядка превышает классическую подвижность в однородных скрещенных полях.

На основе полученных аналитических зависимостей и экспериментальных данных предлагается методика (рис. 24), которой определяется последовательность расчета параметров процесса распыления и осаждения пленки в зависимости от конструктивных и рабочих характеристик магнетронных распылительных систем. (Параметры мишени выбираются согласно методике, приведенной на рис. 34.) Расчет ведется методом последовательных приближений исходя из допустимой плотности мощности (θ_{\max}) для распыляемого материала. Задаваясь значениями индукции магнитного поля, рабочего давления и предполагаемого рабочего напряжения, определяем границу эффективной области плазмы X_0 . Затем последовательно по указанным формулам определяем ко-

эффиценты G , D , N и C , после чего находим ток разряда, соответствующий выбранному рабочему напряжению. Определяем плотность мощности на мишени, и если она отличается от допустимой, корректируем рабочее напряжение.

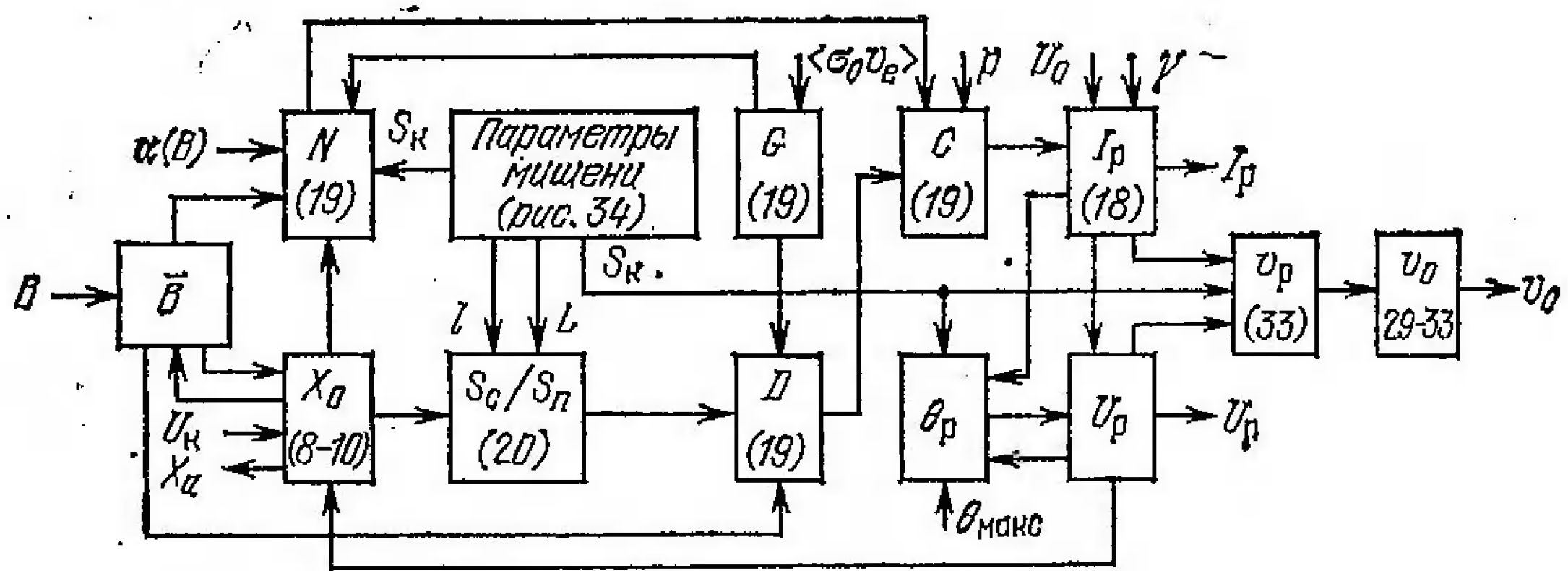


Рис. 24. Методика выбора и расчета рабочих и конструктивных параметров магнетронных распылительных систем. (В скобках указаны номера расчетных формул.)

В результате расчета получаем допустимые рабочий ток и напряжение разряда (они определяют характеристики источника питания для МРС с выбранными размерами мишени). Затем рассчитываем скорость распыления и определяем максимальную скорость осаждения пленки на заданном расстоянии с требуемой равномерностью.

Данная методика применима для приближенных оценок и содержит эмпирические параметры. Можно произвести и обратный расчет, т. е. задать характеристики процесса распыления и осаждения материала и определить рабочие характеристики магнетронной системы (давление в камере, индукцию магнитного поля и др.).

Энергетическая эффективность. Оценить эффективность распылительной системы можно по трем основным критериям: эффективности процесса плазмообразования, процесса распыления и энергетической эффективности системы в целом [25].

Энергетическая эффективность процесса плазмообразования оценивается исходя из условия самостоятельности разряда:

$$ez U_p \kappa_1 \kappa_2 \gamma / W_0 = 1, \quad (22)$$

где κ_1 — отношение энергии, затраченной электронами на ионизацию, к полной энергии, полученной от электрического поля; κ_2 — отношение количества ионов, достигающих мишени, к общему количеству образующихся ионов; γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии. Преобразуя формулу (22), можно эффективность процесса плазмообразования $\eta_{\text{п}}$ выразить в виде

$$\eta_{\text{п}} = \kappa_1 \kappa_2 = W_0 / ez U_p \gamma. \quad (23)$$

Приняв для разряда в аргоне $W_0 = 4,8 \cdot 10^{-18}$ Дж, $\gamma = 0,1$ (для металлов) и $U_p = 500$ В, получим для однозарядных ионов $\eta_{\text{п}} = 0,6$. Для обычной диодной системы при $U_p = 3$ кВ эффективность про-

цесса плазмообразования в 6 раз ниже. Минимальное рабочее напряжение для МРС, определенное при максимальной эффективности $\eta_{\text{п}}=1$, составляет 300 В. Более высокие значения U_p на практике объясняются не только тем, что $\kappa_1 < 1$ и $\kappa_2 < 1$, но и перзахватом вторичных электронов мишенью, который снижает эффективность коэффициента ионно-электронной эмиссии. Для увеличения эффективности магнетронных распылительных систем необходимо повышать эффективность магнитной ловушки ($\kappa_1 \rightarrow 1$) и создавать ионы как можно ближе к распыляемой поверхности для исключения их рассеяния ($\kappa_2 \rightarrow 1$).

Энергетическая эффективность процесса ионного распыления (η_p) определяется массой вещества (m_p), которая распыляется в единицу времени с единицы площади, отнесенной к плотности мощности θ_p , затрачиваемой на реализацию процесса распыления:

$$\eta_p = m_p / \theta_p. \quad (24)$$

Величина $\theta_p = j_i U_i$, где j_i — плотность ионного тока на поверхности распыляемого материала; U_i — напряжение, ускоряющее ионы. Величина $W_i = e U_i$ соответствует энергии бомбардирующих материал ионов.

В случае распыления материала однозарядными ионами $m_p = K(W_i) A j_i / (N_A e)$, где $K(W_i)$ — коэффициент распыления материала ионами с энергией W_i ; A — относительная атомная масса распыляемого материала, кг/моль; $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ атом/моль — число Авогадро. Подставляя выражения для θ_p и m_p в формулу (24), получаем

$$\eta_p = [K(W_i) / W_i] (A / N_A). \quad (25)$$

Отсюда энергетическая эффективность процесса распыления зависит от энергии бомбардирующих ионов, которая для различных распылительных систем может меняться в широком диапазоне: от $(4,8-8) \cdot 10^{-17}$ Дж (300—500 эВ) для магнетронных до $(3,2-5,6) \times 10^{-16}$ Дж (2—3,5 кэВ) для диодных. Зависимость η_p от W_i будет определяться зависимостью $K(W_i) / W_i$ от W_i .

Из приведенных на рис. 25 теоретических и экспериментальных зависимостей $K(W_i) / W_i$ и η_p для меди и кремния от энергии ионов аргона видно, что максимум η_p имеет место при $W_i = (3,2-8) \cdot 10^{-17}$ Дж (200—500 эВ). Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 25, наблюдаются при распылении любых материалов и являются общими энергетическими характеристиками процесса распыления.

Значение энергии ионов W_i^* , которое соответствует максимальной энергетической эффективности процесса распыления материала, может быть определено на основании данных [26]:

$$W_i^* = 515 a^2 Z_i Z_a (m_i + m_a) / m_a, \quad (26)$$

где $a = 0,8853 a_0 (Z_i^{2/3} + Z_a^{2/3})^{-1/2}$ — характерный радиус экранирующего электронного облака по модели Томаса—Ферми; $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ — радиус атома водорода по Бору; Z_i , Z_a , m_i , m_a —

соответственно атомные номера и массы бомбардирующего иона и материала мишени.

Ниже приведены рассчитанные по формуле (26) значения W_i^* для некоторых материалов:

Материал	C	Al	Si	Ti	Cr	Ni	Cu	Ge	Nb	Mo	Ta	W	Pt	Au
$a, \times 10^{-11}$ м	1,47	1,33	1,29	1,19	1,18	1,15	1,14	1,12	1,06	1,06	0,93	0,93	0,92	0,91
$W_i, \times 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж	310	320	330	330	340	360	350	360	380	390	440	450	460	450

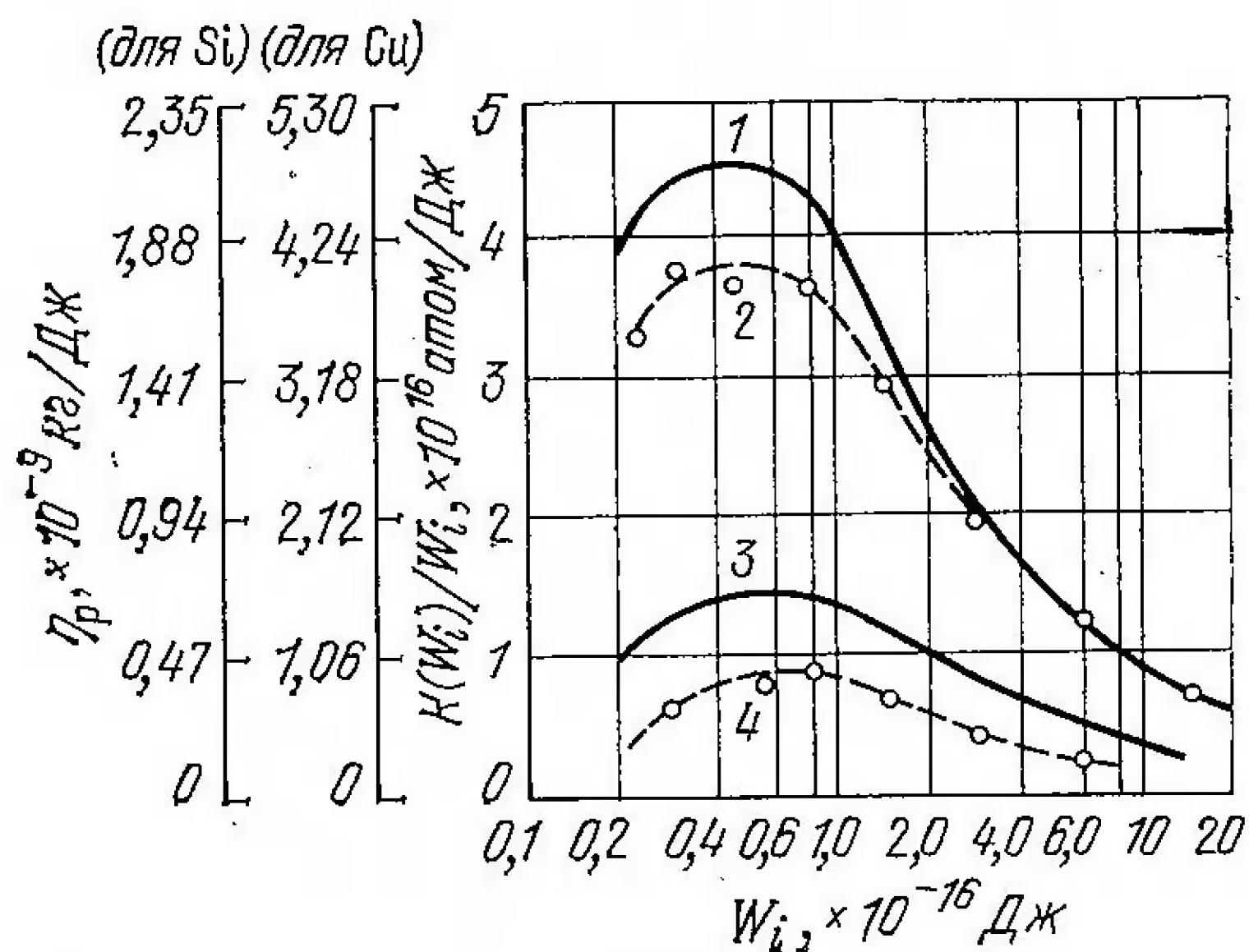


Рис. 25. Теоретические (сплошные линии) и экспериментальные (штриховые линии) зависимости отношения коэффициента ионного распыления к энергии иона и эффективности процессов ионного распыления меди (кривые 1, 2) и кремния (кривые 3, 4) от энергии ионов аргона

Энергетическая эффективность системы ионного распыления (η_c) определяется отношением массы вещества m_c , распыляемого в единицу времени, к мощности Θ_c , подводимой к системе;

$$\eta_c = m_c / \Theta_c. \quad (27)$$

Подставляя в эту формулу $m_c = \eta_p I_i U_i$, где I_i — ионный ток на поверхности распыляемого материала (мишени), получаем

$$\eta_c = \eta_p I_i U_i / \Theta_c, \quad (28)$$

откуда следует, что энергетическая эффективность распылительной системы определяется произведением энергетической эффективности реализуемого в ней процесса ионного распыления на коэффициент преобразования подводимой к системе мощности, в непосредственно затрачиваемую мощность на процесс распыления.

Для диодных и магнетронных систем на постоянном токе $\Theta_c = I_p U_p$, $I_p = I_i (1 + \gamma)$. Для ВЧ систем Θ_c не может быть выражена через произведение тока разряда на напряжение и измеряется с помощью специальных устройств [27].

В магнетронных распылительных системах с ВЧ потенциалом на мишени (обычно частотой 13,56 или 27 МГц), которые используются для распыления непроводящих материалов в аргоне или реактивной среде, вследствие низкого импеданса плазмы можно получить высокую плотность мощности при низком приложенном ВЧ потенциале. Например, удельная мощность 2 Вт/см² достигается при автоматическом смещении потенциала на мишени около 360 В, в то время как в обычных ВЧ распылительных системах — при 3,5 кВ [28]. Значение U_i в обычных ВЧ системах со-

ставляет примерно 0,75 амплитудного, а в магнетронах — около $0,7U_p$. Для триодных распылительных систем Θ_c складывается из мощности, идущей на накал термокатода, мощности дугового разряда и мощности, выделяемой на мишени, которая определяется произведением ионного тока мишени и напряжения на ней. В распылительных системах с автономными ионными источниками и ионно-лучевых системах, в которых ускоряющее ионы напряжение прикладывается не к мишени, а к ускоряющим электродам, энергия ионов может быть в 1,3—1,5 раза меньше произведения заряда ионов на ускоряющее напряжение. Кроме того, ионный ток на мишень зависит от расстояния между областью плазмы и мишенью. Поскольку это расстояние наибольшее у систем с автономными ионными источниками, то энергетическая эффективность их наименьшая. Магнетронные системы обладают максимальной эффективностью на постоянном токе, так как в них максимальная энергетическая эффективность процесса ионного распыления сочетается с высоким коэффициентом преобразования подводимой к системе мощности.

В табл. 3 приведены рабочие и энергетические характеристики различных распылительных систем.

Скорости распыления материалов. Процесс ионного распыления материалов количественно характеризуется коэффициентом распыления, определяемым как число атомов, выбиваемых из материала мишени одним ионом. Значение этого коэффициента зависит от множества факторов: энергии, массы и атомного номера бомбардирующих ионов, массы и атомного номера распыляемых атомов, угла падения ионов, температуры поверхности, качества ее обработки и др. В настоящее время наиболее полная и законченная теория ионного распыления аморфных и поликристаллических материалов разработана Зигмундом [26]. Им получены формулы для определения энергетической эффективности процесса, расчета коэффициента распыления в зависимости от энергии ионов, которые применимы при любых энергиях ионов, причем расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными.

Экспериментально установлено, что существенное влияние на коэффициент распыления оказывает давление рабочего газа (он начинает уменьшаться, когда давление превысит некоторое пороговое значение, зависящее от массы и энергии атомов и ионов), а также геометрии распылительной системы (в основном расстояния от мишени до плоскости конденсации). Это объясняется увеличением вероятности возвращения распыленных атомов на мишень при увеличении давления вследствие процессов обратной диффузии и обратного рассеяния (отражения). Под обратной диффузией следует понимать возвращение на мишень распыленных атомов, имеющих среднюю кинетическую энергию, равную средней кинетической энергии атомов рабочего газа. Такое возвращение может происходить с расстояний, значительно превышающих длину свободного пробега распыленных атомов λ_a . Обратное рассеяние представляет собой возвращение распыленных атомов на ми-

Рабочие и энергетические характеристики распылительных систем

Вид распылительной системы	Рабочее давление, Па	Рабочее напряжение, кВ	Энергия бомбардирующих ионов $W_i \cdot 10^{16} \times 10^{-16}$ Дж	Ионный ток I_i , А	Мощность, подводимая к системе Θ_c , кВт	Коэффициент преобразования мощности $\beta = I_i U_i / \Theta_c$	Энергетическая эффективность (по меди)	
							процесса распыления $\eta_p, \times 10^{-9}$ кг/Дж	распылительной системы $\eta_c, \times 10^{-9}$ кг/Дж
Диодная на постоянном токе	1,3—13	3,0—5,0	2,0—3,5	0,5—0,8	2,0—5,0	0,5—0,6	0,9—1,4	0,5—0,7
ВЧ диодная	0,6—6,6	(1,0—2,0)*	0,7—1,5	1,0—2,0	3,0—5,0	0,3—0,6	1,6—2,5	0,5—1,0
Триодная	(0,6—6,6) · 10 ⁻¹	1,0—2,0	1,0—2,0	3,0—5,0	10—15	0,3—0,7	1,4—2,1	0,6—1,0
Триодная с локализацией плазмы магнитным полем	(1,3—13) · 10 ⁻²	1,0—2,0	1,0—2,0	10—15	35—40	0,3—0,7	1,4—2,1	0,6—1,0
С автономным ионным источником	(0,6—6,6) · 10 ⁻¹ (в источнике) (1,3—13) · 10 ⁻³ (в камере)	1,0—3,0	1,0—3,0	0,2—0,5	8,0—10	(0,3—1,5) × 10 ⁻¹	1,0—2,1	(0,6—1,5) × 10 ⁻¹
Магнетронная на постоянном токе	(1,3—6,6) · 10 ⁻¹	0,4—0,8	0,3—0,5	15—20	8—15	0,6—0,7	3,0—3,8	2,1—2,3
ВЧ магнетронная	(1,3—6,6) · 10 ⁻¹	(0,7—1,0)*	0,5—0,7	2,0—4,0	3,0—5,0	0,3—0,6	2,5—3,0	0,9—1,5

* Приведены амплитудные значения напряжения.

шень в результате рассеяния на атомах рабочего газа. Этот процесс происходит на расстояниях, не превышающих λ_a , и характеризуется различием кинетических энергий и масс соударяемых частиц. Если масса атомов распыляемого материала больше массы атомов рабочего газа ($m_a > m_r$), то основным процессом возвращения распыленных атомов на мишень является обратная диффузия. Оценить влияние этого процесса с достаточной точностью можно по формуле [29]

$$K(p) = K(W_i) \frac{2,3 \lambda_{a0}}{2,3 \lambda_{a0} + p_0 d - L_a}, \quad (29)$$

где $K(W_i)$ — истинный коэффициент распыления без учета обратной диффузии; λ_{a0} — длина свободного пробега распыленных атомов при единичном давлении и температуре 273 К; $p_0 = 273 p/T$ — давление газа, приведенное к $T = 273$ К; L_a — средняя длина направленного пробега распыленных атомов при единичном давлении газа; d — расстояние от мишени до поверхности конденсации.

Эта формула имеет физический смысл при $p_0 d > L_a$. При $p_0 d \leq L_a$ все распыленные атомы достигают поверхности конденсации и формула (29) принимает вид $K(p) = K(W_i)$. Ниже приведены рассчитанные для некоторых материалов значения средней длины направленного пробега атомов, распыленных ионами аргона с энергией 600 эВ [30]:

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

Если $m_a < m_r$, то основным процессом, определяющим возвращение частиц на мишень в области $p_0 d < L_a$, является обратное рассеяние. В этом случае зависимость коэффициента распыления от давления газа при условии изотропности рассеяния

$$K(p) = 0,5 K(W_i) [1 + \exp(-p_0 d / \lambda_{ат})], \quad (30)$$

где $\lambda_{ат}$ — средняя длина свободного пробега атомов при единичном давлении и температуре T .

В области $p_0 d > L_a$ распыленные частицы возвращаются на мишень как за счет обратного рассеяния, так и за счет обратной диффузии. Тогда

$$K(p) = 0,5 K(W_i) \frac{2,3 \lambda_{a0} [1 + \exp(-p_0 d / \lambda_{ат})]}{2,3 \lambda_{a0} + p_0 d}. \quad (31)$$

Оценка коэффициента распыления с учетом обратного рассеяния и диффузии распыленных частиц необходима для расчета скорости осаждения пленок в распылительных системах. Для выбора оптимального технологического режима важно уметь определить давление, при котором начинается процесс обратной диффузии. Выбор рабочего давления можно произвести, воспользовавшись формулой

$$p \leq L_a / d. \quad (32)$$

Так, при распылении меди в МРС при расстоянии между мишенью и подложкой 70 мм рабочее давление не должно превы-

шать 0,3 Па, в противном случае коэффициент распыления будет уменьшаться вследствие обратной диффузии распыленных атомов на мишень. Для определения скорости распыления материала мишени в [30] предложена формула

$$v_p = 10^9 [K(W_i) A / (N_A \rho)] [I_i / (ezS_K)] \cos \alpha, \quad (33)$$

где v_p — скорость распыления мишени, нм/с; ρ — плотность распыляемого материала, кг/м³; S_K — площадь распыляемой поверхности, м²; α — угол падения ионов на распыляемую поверхность по отношению к нормали.

Поскольку сомножитель в первых скобках — коэффициент объемного распыления материала, а сомножитель во вторых скобках — интенсивность ионной бомбардировки мишени, то для случая падения однозарядных ионов по нормали к поверхности формула (33) принимает вид

$$v_p = 6,25 \cdot 10^{27} K_{об} j_i, \quad (34)$$

где $K_{об} = K(W_i) A / (N_A \rho)$ — коэффициент объемного распыления, м³/ион.

Поскольку в диапазоне рабочих напряжений магнетронных систем коэффициент распыления практически линейно зависит от рабочего напряжения [26], то согласно формулам (33) и (34) скорость распыления (а следовательно, и скорость осаждения) должна линейно зависеть от мощности разряда, что и подтверждается экспериментально (см. рис. 8). Однако подробные исследования показали, что скорости осаждения существенно ниже, чем они должны быть при используемых в магнетронных распылительных системах плотностях тока, и это различие между расчетными и экспериментальными данными тем больше, чем выше плотности тока на мишени. Уменьшение скорости осаждения с ростом плотности тока объясняется в [31] явлением самораспыления, при котором атомы ионизируются и возвращаются обратно на мишень, способствуя ее распылению. Расчеты показывают, что при распылении алюминия поток его ионизированных атомов составляет не менее 18% полного тока на мишень, а при распылении меди при высоких плотностях тока на мишень переносится ионами меди до 45% ионного тока. Масс-спектрометрические исследования свидетельствуют о наличии в разряде одно- и двухзарядных ионов меди (двухзарядные составляли всего 1% однозарядных, и их вклад незначителен), причем ионизированные атомы меди осаждаются и на подложку, составляя до 7,5% потока нейтральных атомов. Поскольку вклад явления самораспыления в процесс распыления материалов достаточно существен, то для оценки v_p в магнетронных системах при точных расчетах в формулы (33) и (34) нужно ввести соответствующие корректировки.

Скорость осаждения и равномерность толщины пленки. Скорость осаждения в заданной точке подложки зависит не только от эмиссионных характеристик источника, но и от угла распыления ϕ , угла конденсации ψ и расстояния между точками распы-

ления и конденсации r . В общем случае толщина пленки в заданной точке на подложке

$$h = M \frac{\cos \varphi \cos \psi}{r^2} t,$$

где M — постоянный параметр, пропорциональный скорости распыления; t — время нанесения пленки.

При выводе формулы для расчета равномерности толщины пленки обычно делаются следующие допущения:

распределение распыленных атомов в пространстве подчиняется косинусному закону;

атомы распыляемого материала незначительно рассеиваются в результате столкновений с атомами газа;

распыленный атом осаждается в месте соударения с подложкой.

Для обеспечения условий равномерного осаждения пленки существуют два пути. Первый, наиболее широко используемый при методах термического испарения материалов, предусматривает перемещение подложки по сложной траектории относительно источника (планетарные внутрикамерные устройства). Расчет траектории движения достаточно сложен, сложны также внутрикамерные устройства, что затрудняет создание установок и линий непрерывного действия. Второй путь — разработка такой геометрии источника, которая обуславливает нанесение равномерной по толщине пленки на неподвижную или перемещающуюся по простейшей траектории (например, линейно) подложку. На базе таких источников могут быть созданы установки и линии непрерывного действия для получения пленочных покрытий.

Поскольку геометрия распыляемой поверхности в магнетронных системах очень разнообразна, то можно выбрать такую конфигурацию мишени, которая обеспечит требуемую равномерность распределения пленки по толщине на поверхности подложки заданной геометрии. Простейшей является коническая распыляемая поверхность (рис. 26). Из геометрических построений

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi (R, \alpha) &= [H_1 \cos \beta + (R - R_{\Pi} \cos \alpha) \sin \beta] / r; \\ \cos \psi_n (R, \alpha) &= H_1 / r, \quad \cos \psi_c (R, \alpha) = (R_{\Pi} - R \cos \alpha) / r; \\ r (R, \alpha) &= (H_1^2 + R_{\Pi}^2 + R^2 - 2 R_{\Pi} R \cos \alpha)^{1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

где $H_1 = \bar{H} + (\bar{R} - R) \operatorname{tg} \beta$; α — полярный угол; R_{Π} — расстояние от точки конденсации до центра подложки; β — угол конусности распыляемой поверхности мишени; \bar{H} — среднее расстояние от подложки до мишени; ψ_n — угол конденсации на горизонтальную плоскую поверхность; ψ_c — угол конденсации на вертикальную грань ступеньки; R — текущий радиус мишени; \bar{R} — средний радиус зоны распыления.

Толщина пленки при распылении конической поверхности

$$h(R, \alpha) = \frac{v_p}{\pi} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi (R, \alpha) \cos \psi (R, \alpha) \Pi (R) R}{r^2 (R, \alpha) \cos \beta} dR d\alpha, \quad (36)$$

где $R_1 = \bar{R} - l \cos \beta$ — внутренний радиус зоны распыления; $R_2 = \bar{R} + l \cos \beta$ — внешний радиус зоны распыления; l — половина ширины зоны распыления; $\Pi(R)$ — полином, учитывающий реальное распределение плотности ионного тока по радиусу мишени.

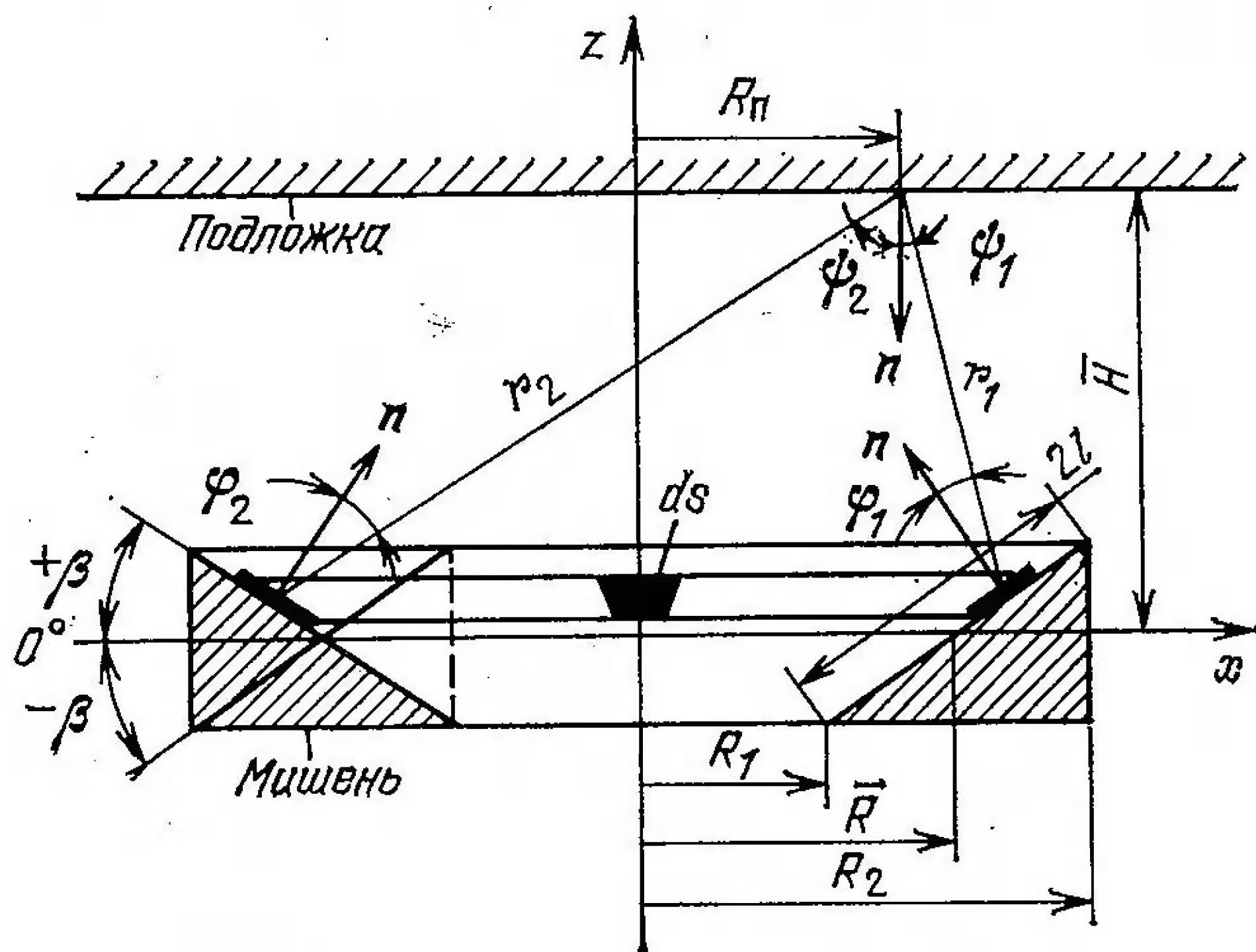


Рис. 26. Геометрические соотношения, характеризующие магнетронные системы распыления с конической мишенью

При распылении конической мишени экспериментальные данные по распределению ионного тока были аппроксимированы полиномом Лагранжа [32]

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

Для расчета толщины пленки по формуле (36) необходимо ввести ограничения, учитывающие условия затенения точки конденсации мишенью и неровностями на подложке (при покрытии ступенчатых профилей):

$$\cos \varphi > 0, \quad \cos \psi_n > 0, \quad \cos \psi_c > 0. \quad (37)$$

Расчет удобно вести в относительных единицах, поделив все линейные размеры на средний радиус зоны распыления \bar{R} .

Машинный расчет равномерности распределения пленки по толщине показал, что площадь покрытия с заданной равномерностью зависит от угла конусности мишени β и соотношения \bar{H}/\bar{R} , причем для каждого β существует вполне определенное значение \bar{H}/\bar{R} , при котором площадь пленки с заданной равномерностью покрытия максимальна (рис. 27). При отклонении от этого значения в меньшую сторону наблюдается утоньшение пленки в центре подложки, а в большую — на краях. Максимальная площадь с заданной равномерностью пленки по толщине, соответствующая приведенным на рис. 27 значениям β и \bar{H}/\bar{R} , определяется по графикам рис. 28.

Расчет скорости осаждения в зависимости от соотношения \bar{H}/\bar{R} (увеличения расстояния от мишени до подложки) показал, что v_0 почти линейно уменьшается с его увеличением при постоянном β (рис. 29). Изменение угла конусности при постоянном расстоянии между подложкой и мишенью ведет к появлению мак-

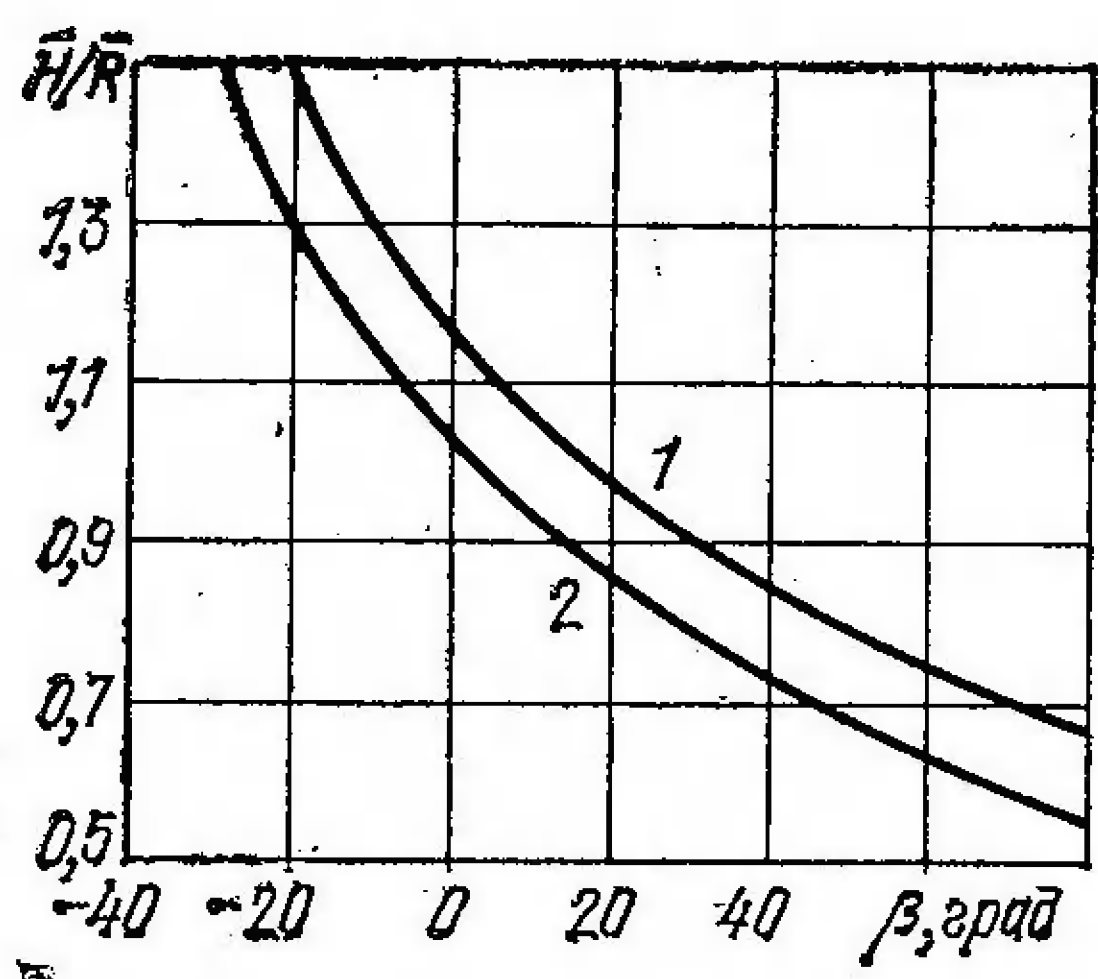


Рис. 27. Соотношение между углом конусности мишени и расстоянием от мишени до подложки для пленки с различной неравномерностью толщины: 1 — $\pm 2\%$; 2 — $\pm 5\%$

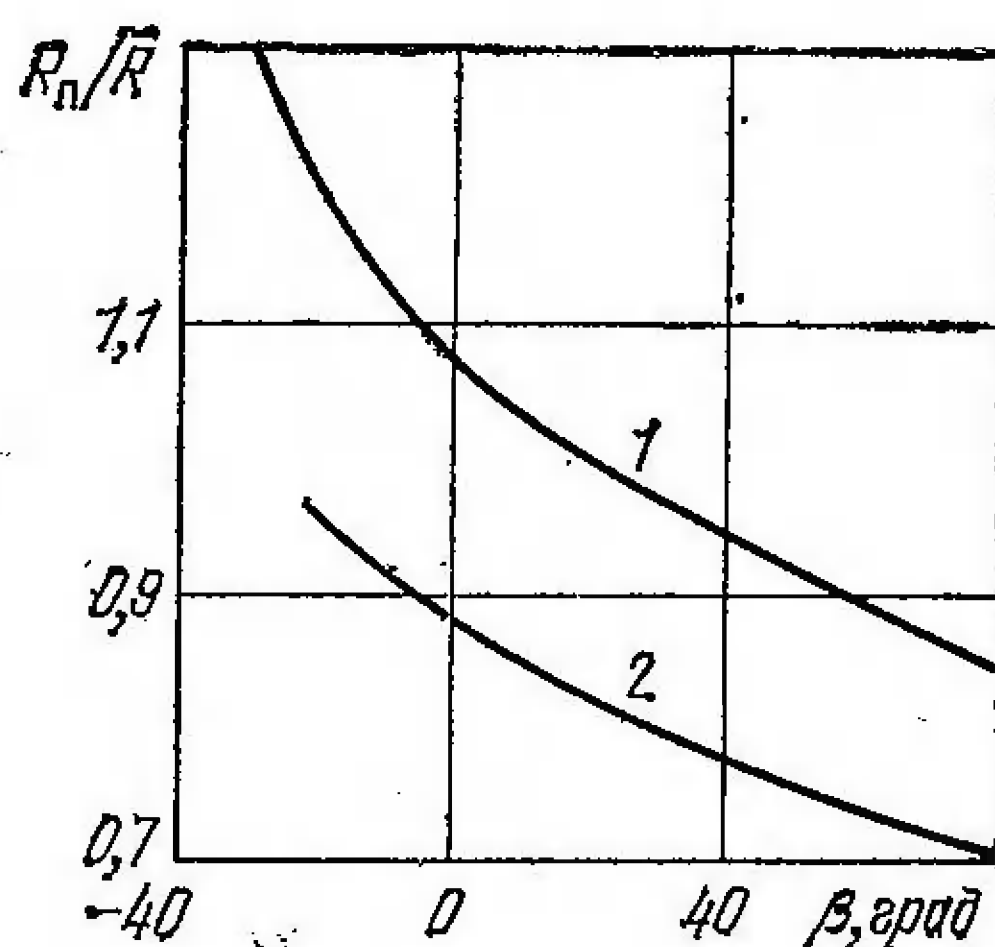


Рис. 28. Зависимость площади пленки от угла конусности мишени при различной неравномерности толщины пленки: 1 — $\pm 5\%$; 2 — $\pm 2\%$

симула зависимости $v_0(\beta)$, который соответствует значениям $\beta = 30 \div 45^\circ$ для всего исследованного диапазона отношений $\bar{H}/\bar{R} = 0,6 \div 1,5$ (рис. 30). С увеличением \bar{H}/\bar{R} с 0,6 до 1,0 угол β , соответствующий максимуму кривой, изменяется с 35 до 45° , а при дальнейшем увеличении \bar{H}/\bar{R} до 1,5 начинает уменьшаться и достигает 30° , причем с увеличением \bar{H}/\bar{R} максимум становится более

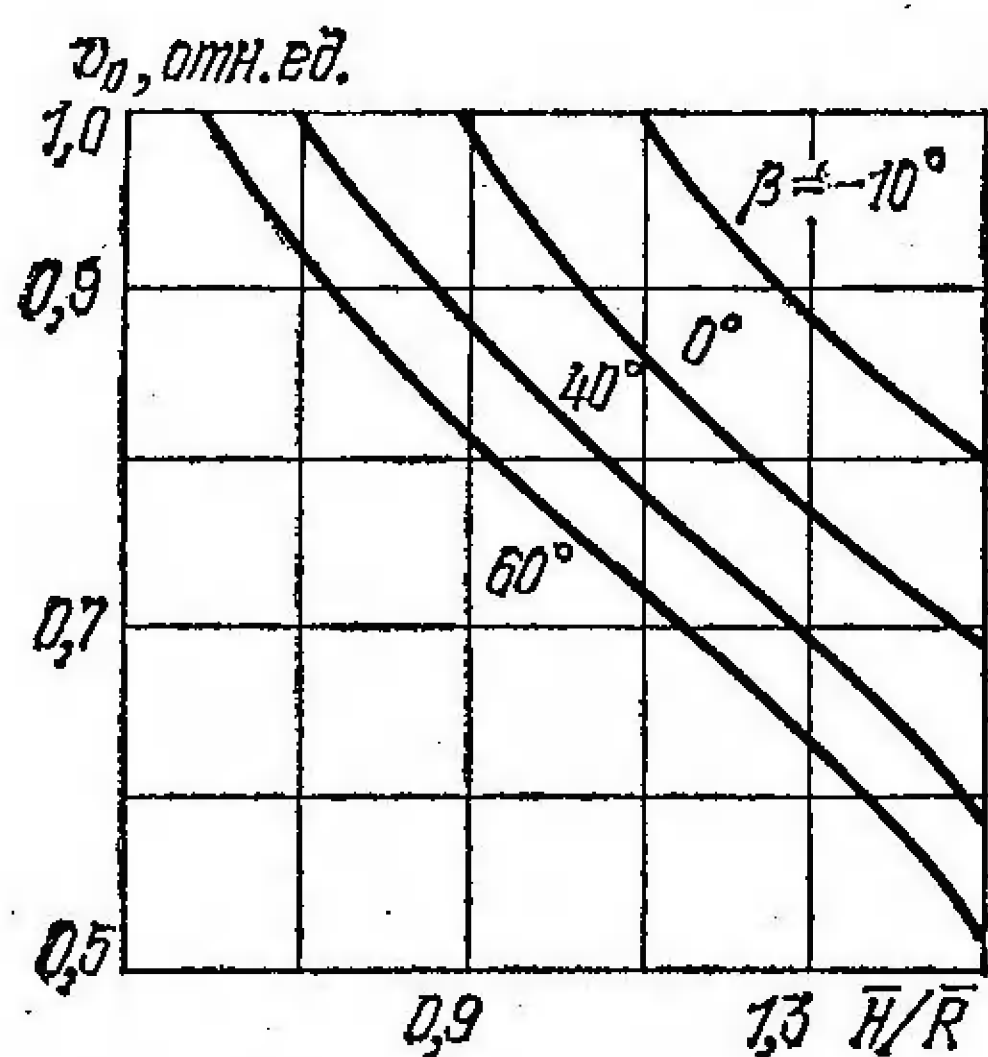


Рис. 29. Зависимость скорости осаждения от расстояния между мишенью и подложкой при $\bar{R} = 60$ мм и различных углах конусности мишени

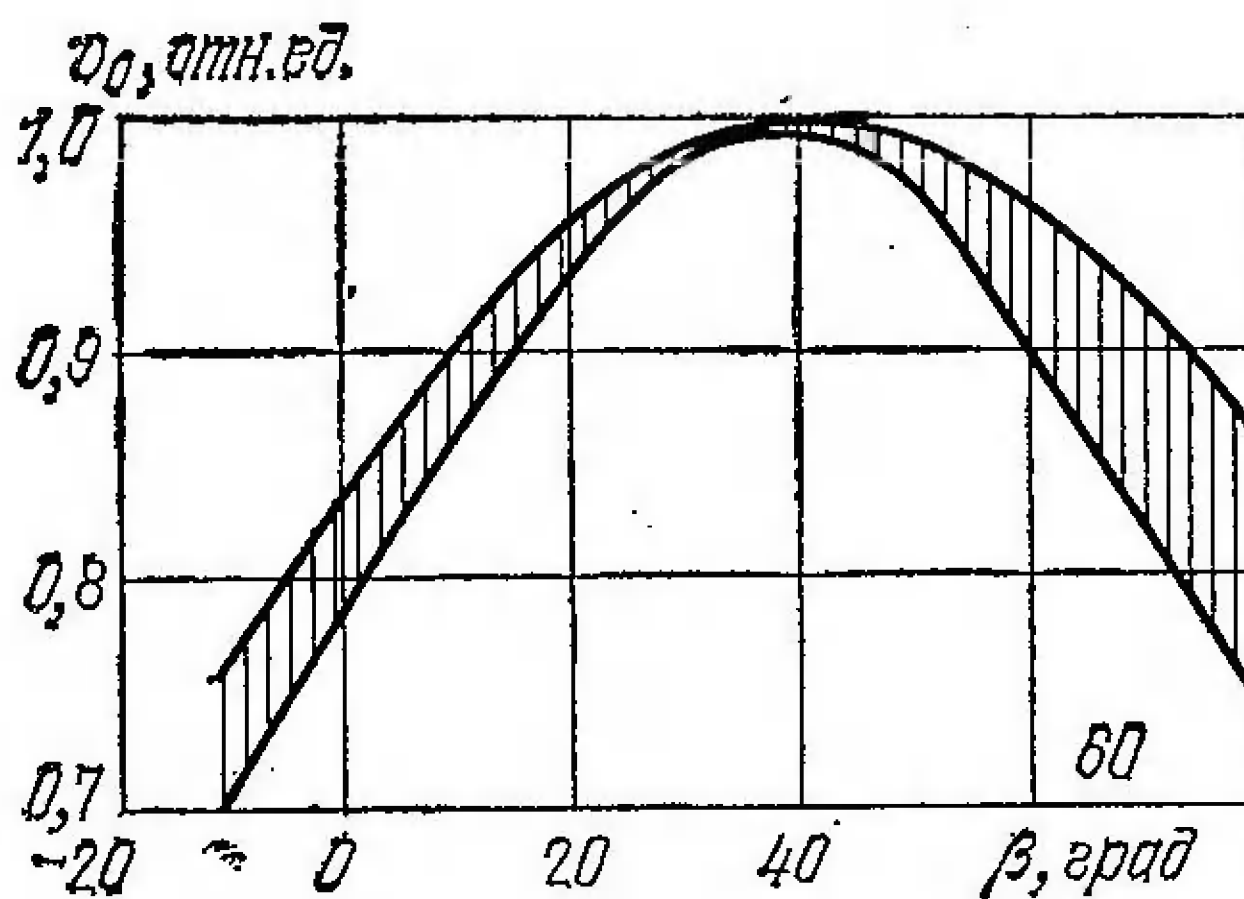


Рис. 30. Зависимость скорости осаждения от угла конусности мишени для значений $\bar{H}/\bar{R} = 0,6 \div 1,5$

острым. Поскольку зависимости $v_0(\beta)$ для различных \bar{H}/\bar{R} перекрываются между собой, то на рис. 30 они показаны заштрихованной областью.

Для достижения высокой производительности магнетронной системы необходимо выбрать такую конфигурацию мишени, которая обеспечивала бы не только высокую равномерность толщины пленки, но и большие скорости осаждения. На основе анализа приведенных зависимостей был построен график (рис. 31), показывающий связь между углом конусности мишени и отношением $\Delta R_{\text{п}}/\Delta v_0$, где $\Delta R_{\text{п}}$ — увеличение площади с заданной равномерностью покрытия, а Δv_0 — уменьшение скорости осаждения пленки. Из него видно, что с уменьшением β уменьшается скорость осаждения (поскольку меньшему β согласно рис. 27 соответствует большее \bar{H}/\bar{R} , т. е. растет расстояние от мишени до подложки, а следовательно, падает v_0) и увеличивается площадь с заданной равномерностью покрытия (см. рис. 28). Однако при $\beta < 45^\circ$ скорость осаждения уменьшается быстрее, чем увеличивается площадь пленки, и, начиная с $\beta < 20^\circ$, резко падает. Анализ показывает, что оптимальный угол конусности мишени составляет $(25 \pm 5)^\circ$, при котором пленка осаждается с высокими скоростями, а неравномерность ее по толщине не превышает $\pm 2\%$ на площади с радиусом не менее $R_{\text{п}} = 0,8\bar{R}$.

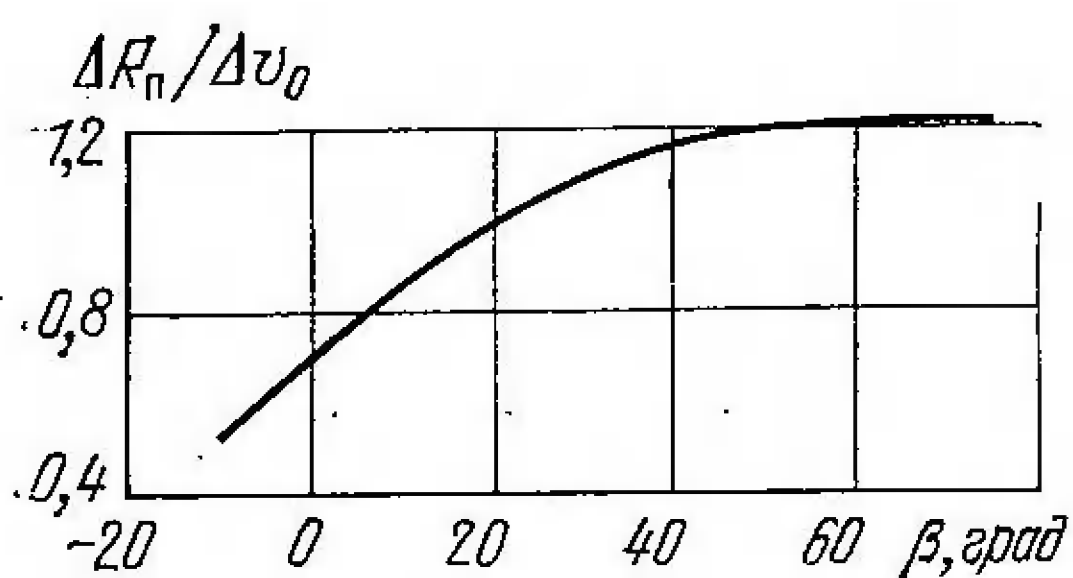


Рис. 31. Зависимость отношения $\Delta R_{\text{п}}/\Delta v_0$ от угла конусности мишени

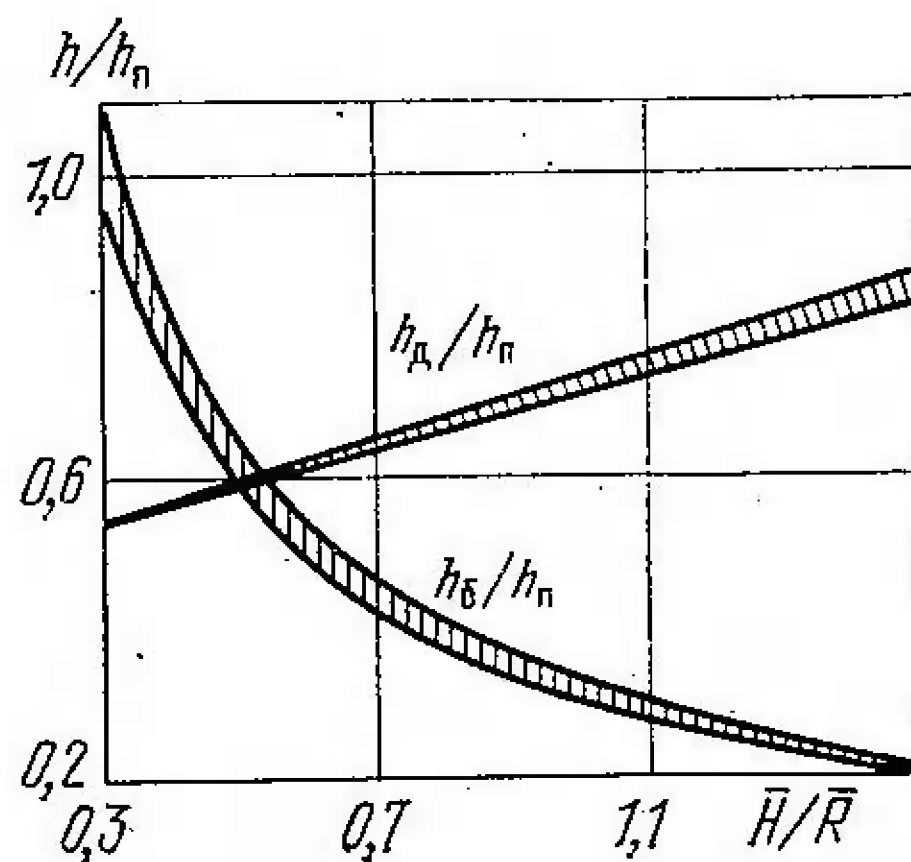


Рис. 32. Влияние расстояния между мишенью и подложкой на равномерность покрытия ступенчатых профилей при использовании мишеней с конусностью от -50 до $+80^\circ$

При исследовании равномерности осаждения пленки на рельефной поверхности была выбрана ступенчатая форма рельефа с вертикальными гранями. Для оценки равномерности толщины по профилю ступеньки рассчитывалась толщина пленки в трех характерных точках: на верхней горизонтальной плоскости ($h_{\text{п}}$), на вертикальной боковой грани на расстоянии половины ее высоты ($h_{\text{б}}$) и на дне ступеньки ($h_{\text{д}}$). Равномерность определялась по отношениям $h_{\text{б}}/h_{\text{п}}$ и $h_{\text{д}}/h_{\text{п}}$. Расчеты показали, что для ступеньки,

расположенной над центром мишени, равномерность толщины пленки практически не зависит от β , но существенно зависит от отношения \bar{H}/\bar{R} (рис. 32), причем эта зависимость наиболее сильно проявляется для вертикальной грани ступеньки.

Для смещенной от центра ступеньки увеличение \bar{H}/\bar{R} приводит к улучшению равномерности распределения конденсата по профилю, обращенному к центру, и ухудшению ее по противоположному профилю. Увеличение угла конусности мишени значительно улучшает равномерность пленки на боковой грани ступеньки, обращенной к центру мишени, и существенно ухудшает равномерность покрытия на дне ступеньки, обращенной к краю.

Проведенные исследования показывают, что для обеспечения высокой равномерности распределения пленки по толщине на боковой грани ступеньки следует выбирать небольшие значения \bar{H}/\bar{R} и большие β , а для качественного покрытия дна ступеньки требования к β и \bar{H}/\bar{R} противоположные. Однако ухудшение равномерности пленки на дне ступеньки с ростом β и уменьшением \bar{H}/\bar{R} не превышает допустимой величины, и для качественного покрытия профиля ступеньки целесообразно выбирать небольшие \bar{H}/\bar{R} и большие β , при которых, однако, достигается требуемая равномерность толщины пленки на планарной части подложки.

Исследования показали, что данные расчета равномерности распределения толщины пленок, проведенного по формулам (35)—(37), хорошо согласуются с экспериментальными результатами: отклонение экспериментальных точек от расчетных не превышает 10%.

На основании расчетных и экспериментальных зависимостей скорости осаждения алюминия от отношения \bar{H}/\bar{R} (рис. 33) проведена оценка влияния обратного рассеяния и диффузии распыленных атомов. Кривая 1 получена в результате расчета без учета рассеяния и обратной диффузии. Введение поправки на коэффициент распыления с учетом обратного рассеяния по формуле (30) приводит к зависимости 2, а учет обратной диффузии по формуле (31) — к зависимости 3. Сравнение этих зависимостей с экспериментальной показывает, что в случае распыления алюминия в аргоне наиболее точные результаты дает расчет с учетом обратного рассеяния, тем более что коэффициент конденсации распыленных атомов на практике меньше единицы, в отличие от принятого в расчетах максимального значения (при коэффициенте конденсации 0,8 кривые 2 и 4 совпадают).

Проведенные исследования позволяют предложить методику выбора геометрии мишени (с кольцеобразной зоной распыления) и положения подложки в системе распыления (рис. 34).

1. Учитывая конструктивные особенности магнетронной распылительной системы и зависимость рис. 31, выбираем угол конусности мишени (рекомендуемые значения $\beta = 20 \div 30^\circ$).

2. По рис. 27 определяем соответствующее выбранному β значение \bar{H}/\bar{R} с учетом требуемой равномерности распределения пленки по толщине.

3. По рис. 28 находим величину R_{Π}/\bar{R} , характеризующую максимальную площадь пленки с заданной равномерностью толщины, соответствующую выбранному β .

4. Исходя из размеров обрабатываемой подложки определяем размер мишени (\bar{R}), а затем положение подложки (\bar{H}) из соотношений R_{Π}/\bar{R} и \bar{H}/\bar{R} .

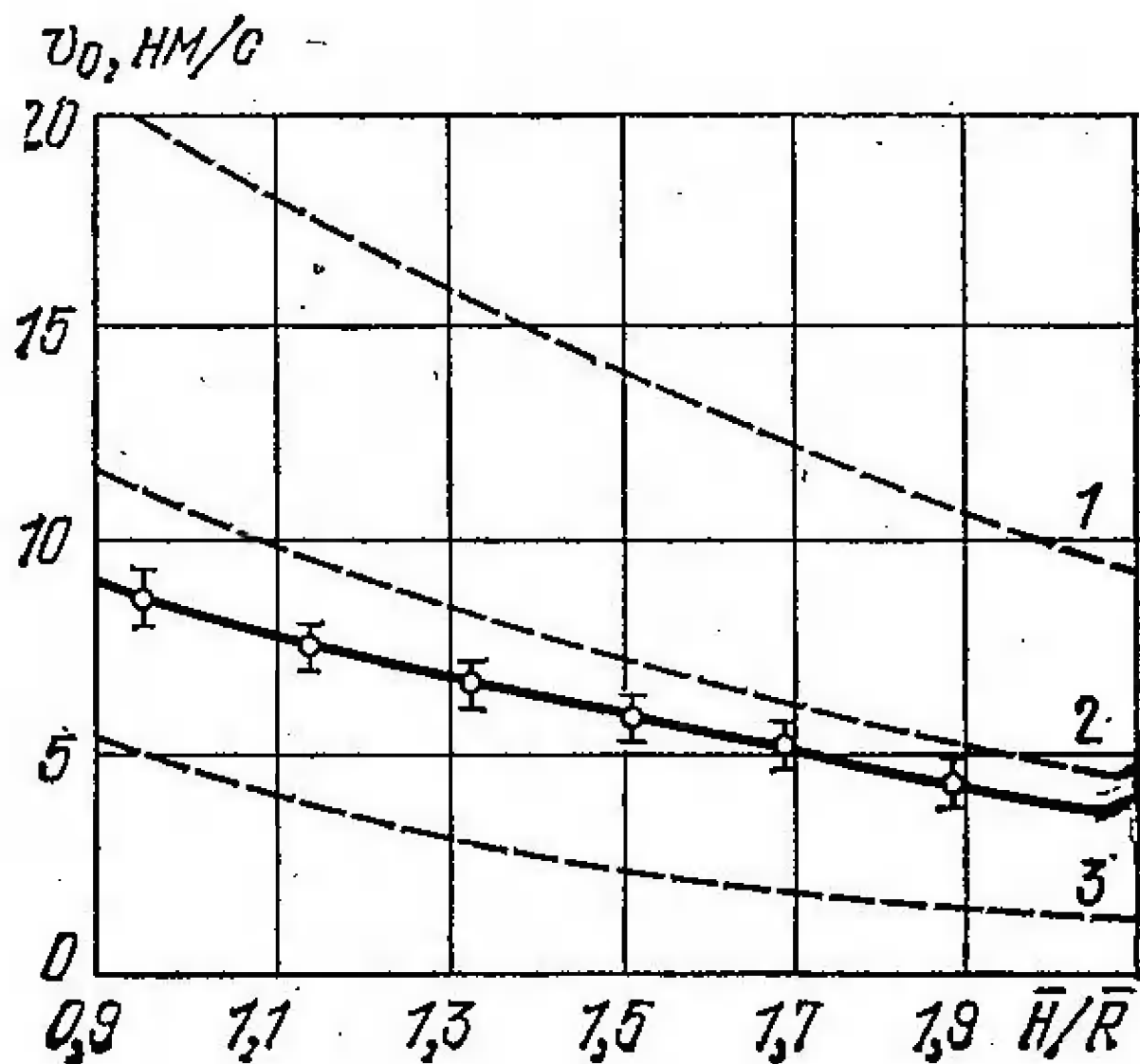


Рис. 33. Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальная (сплошная кривая) зависимости скорости осаждения алюминия от расстояния между мишенью и подложкой для магнетронной системы с параметрами мишени $\bar{R}=53$ мм; $l=17$ мм; $\beta=30^\circ$

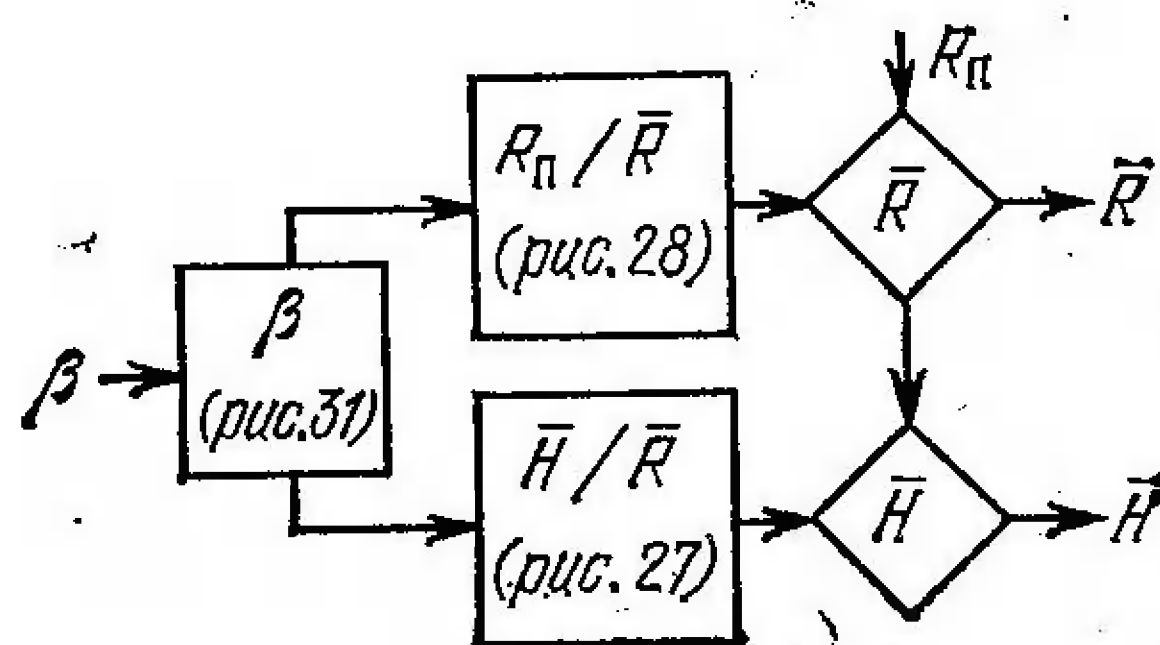


Рис. 34. Методика расчета равномерности пленки по толщине и выбора положения подложки в магнетронной распылительной системе с кольцеобразной зоной распыления

Таким образом, в магнетронных распылительных системах выбором геометрии мишени можно обеспечить условия нанесения равномерных по толщине пленок на неподвижные подложки. Для достижения высокой равномерности можно использовать и обычные планетарные внутрикамерные устройства, применять специальные профилированные экраны при линейном перемещении подложек относительно магнетронной системы или создавать несколько зон распыления на мишени.

Глава третья

◆ КОНСТРУКЦИИ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Прообразом современных магнетронных распылительных систем диодного типа с коаксиальной конструкцией электродов являются устройства, описанные в [24]. Катод представляет собой цилиндрический стержень, расположенный в центре камеры, а подложки располагаются по цилиндрической поверхности анода во-

жруг катода. Коаксиальные конструкции электродов, имея в основном аналогичные с планарными конструкциями рабочие характеристики, позволяют значительно увеличить (в 3—5 раз) производительность за счет увеличения площади одновременно обрабатываемых подложек. Кроме того, в этих системах на порядок меньше интенсивность бомбардировки подложек вторичными электронами, что достигается наличием аксиального магнитного поля и заземленных экранов по торцам цилиндрического катода. Еще более снижает бомбардировку подложек вторичными электронами наличие между катодом и держателем подложек цилиндрического сетчатого анода (рис. 35,а). При длительной работе температура подложек в такой системе не превышает 320 К. Но в то же время из-за сетчатого анода (иногда его называют улавливающим электродом) уменьшается скорость осаждения пленки.

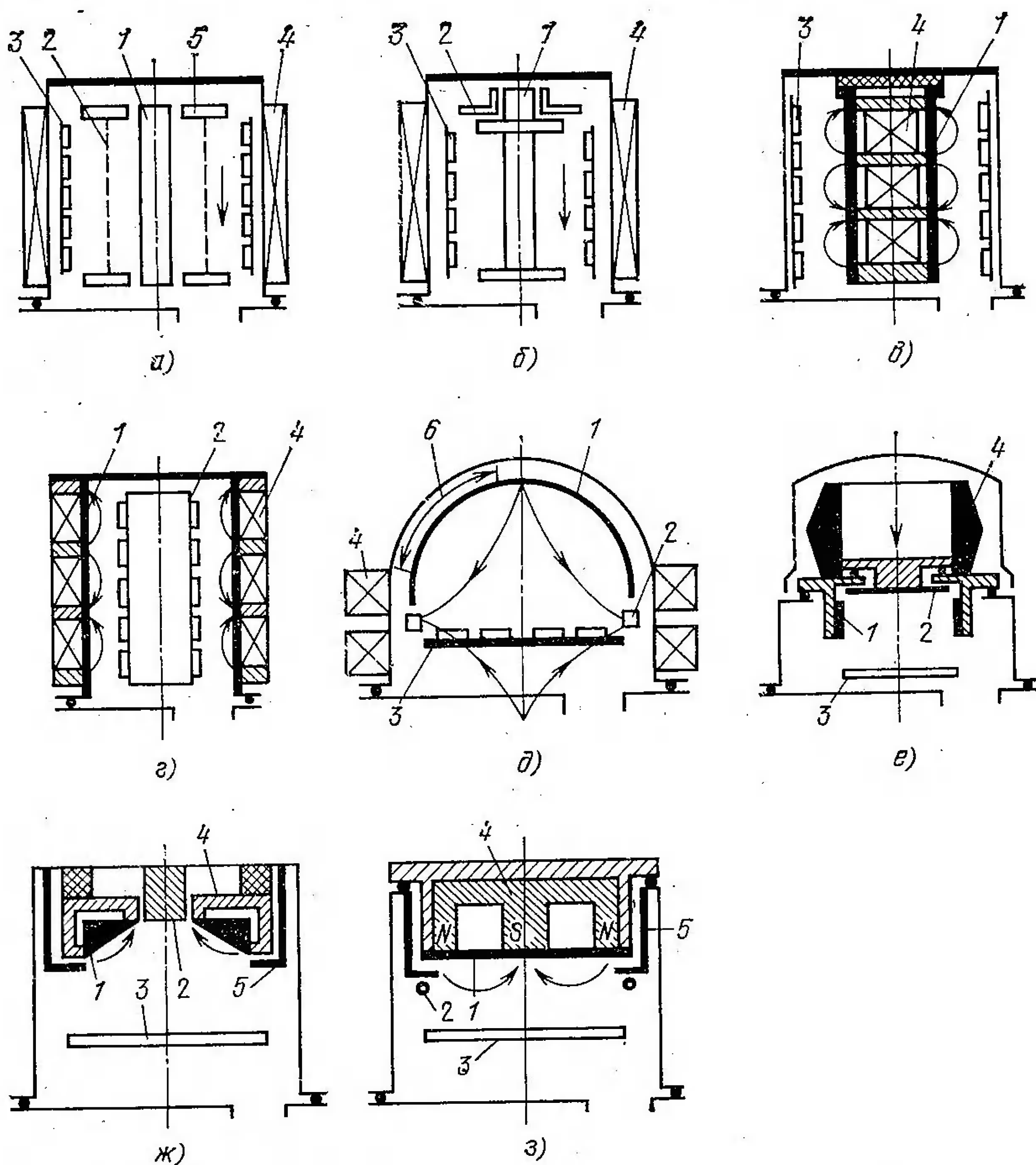


Рис. 35. Конструктивные схемы магнетронных систем распыления:
 1 — катод-мишень; 2 — анод; 3 — подложкодержатель; 4 — магнитная система;
 5 — экран; 6 — зона распыления. (Стрелками показано направление силовых линий магнитного поля.)

Усовершенствование коаксиальных систем в целях увеличения скорости осаждения привело к созданию катода в виде цилиндра с дисками по торцам (рис. 35,б). Такая конструкция позволяет значительно увеличить интенсивность разряда благодаря осцилляции электронов вдоль поверхности катода между его торцевыми дисками, достичь плотностей тока 300 А/м^2 и скоростей осаждения до 17 нм/с . Однако существенным недостатком этой системы является низкая равномерность распределения пленки по толщине, связанная с неравномерным распылением мишени: более сильным в центральной части и слабым у торцевых дисков, что обуславливается неравномерным распределением плотности ионного тока вдоль поверхности мишени. Исследования характеристик такой системы и их зависимости от геометрии катода проведено в [33].

Наиболее эффективными магнетронными системами коаксиального типа являются конструкции, приведенные на рис. 35,в,г. Катод из распыляемого материала выполняется в виде трубы. Магнитная система устанавливается либо внутри трубы (при этом распыляется внешняя поверхность катода, см. рис. 35,в), либо вокруг нее (распылению подвергается внутренняя поверхность катода, см. рис. 35,г). Плазма локализуется у распыляемой поверхности с помощью кольцевого арочного магнитного поля. Подложки располагаются вокруг катода (при внешнем распылении) или внутри вдоль его оси (при внутреннем распылении), причем в последнем случае достигается более высокий коэффициент использования материала мишени. Для приведенных систем характерны плотности тока 600 А/м^2 и достаточно высокая равномерность наносимых покрытий [33].

На рис. 35,д показана магнетронная система, состоящая из полусферического вогнутого катода, дискового подложкодержателя под ним, кольцевого анода, а также двух электромагнитных катушек, создающих квадрупольное магнитное поле в области разряда. При зажигании разряда перед катодом образуется кольцеобразная область, в которой магнитное и электрическое поля пересекаются под прямым углом. В этой области наиболее высокая степень ионизации рабочего газа, вследствие чего катод на кольцевом участке между экватором и полюсом интенсивно распыляется. Таким образом, описанная МРС имитирует кольцевой источник распыляемого материала. При использовании медного катода параметры разряда критичны к колебаниям давления, величине и геометрии магнитного поля и меняются при увеличении температуры катода во время распыления [34]. Поэтому, несмотря на хорошую адгезию медных пленок к стеклянным подложкам, большую скорость осаждения (до 17 нм/с) и довольно высокую равномерность распределения пленки по толщине (96—97%), применение этой МРС ограничено из-за невысокой стабильности и воспроизводимости параметров разряда, а также сложности выполнения полусферического катода.

На рис. 35,е приведена конструкция с цилиндрическим полым катодом [35]. Магнетронная система распыления выполнена в виде автономного источника распыляемого материала, который может быть пристыкован к любой вакуумной камере, причем в вакууме находятся только катодный и анодный блоки, а вся остальная часть источника, в том числе и магнитная система, располагается вне камеры. Исследования показали, что данная конструкция магнетронной системы имеет ряд недостатков: значительная часть распыляемого материала перераспределяется внутри источника и не попадает на подложки; высокая неравномерность распределения конденсата по толщине не позволяет осаждать пленки на большие площади без использования планетарных механизмов вращения подложек; недостаточно эффективна магнитная система, которая не обеспечивает в полной мере защиту подложек от бомбардировки заряженными частицами.

Магнетронная система с коническим катодом обеспечивает более полное использование распыляемого материала (рис. 35,ж) [36]. Кроме того, магнитная система дает возможность сконцентрировать магнитное поле у распыляемой поверхности катода, что позволяет вдвое увеличить плотность тока на катоде и достигнуть более высоких скоростей осаждения. Однако размещение магнитной системы в вакуумной камере вносит дополнительные загрязнения в рабочий объем установки. Хотя в системе с коническим катодом достигается более равномерное нанесение пленок, для увеличения площади одновременно обрабатываемых подложек с высокой равномерностью распределения конденсата по толщине также необходимо использовать планетарные внутрикамерные устройства.

Дальнейшее развитие магнетронных распылителей привело к созданию планарных систем (рис. 35,з), в которых эффект экранирования потока распыленных атомов полностью устранен. Магнитная система монтируется в водоохлаждаемом держателе и не вносит загрязнений в рабочую камеру. Планарные магнетронные системы позволяют создать в области распыления еще более высокие плотности тока и достичь скоростей осаждения, сравнимых со скоростями, характерными для методов термического испарения в высоком вакууме. В то же время недостатком такой системы является то, что распылению подвергается узкая кольцеобразная область мишени и коэффициент использования материала составляет 26% объема мишени [37].

В настоящее время известно множество конструктивных вариантов магнетронных распылительных систем [38, 39], но наибольшее распространение в промышленности получили системы с мишенями конической и плоской форм. Конструкции магнетронных систем должны обеспечивать высокую скорость распыления, минимальное отрицательное воздействие на обрабатываемые структуры, высокий коэффициент использования материала мишени, возможность распыления разнообразных материалов, нанесение пленочных покрытий на большие площади с минимальной

неравномерностью по толщине, высокую надежность работы, большой срок службы и др. Большинство из этих требований удовлетворяется правильным выбором конструкции магнитной системы и формы мишени.

Магнитная система, являющаяся одним из основных конструктивных элементов магнетронной системы, должна формировать у поверхности мишени поле заданной конфигурации и величины с минимальным рассеянием для создания эффективной магнитной ловушки для электронов. Исследования по макетированию магнитных полей позволили выявить наиболее целесообразные варианты конструкции магнитной системы с точки зрения простоты и возможности получения магнитного поля требуемой геометрии и величины.

Магнитная система, изображенная на рис. 36,а, является достаточно простой и обеспечивает эффективную локализацию плазмы. В этой конструкции можно использовать наборные магнитные

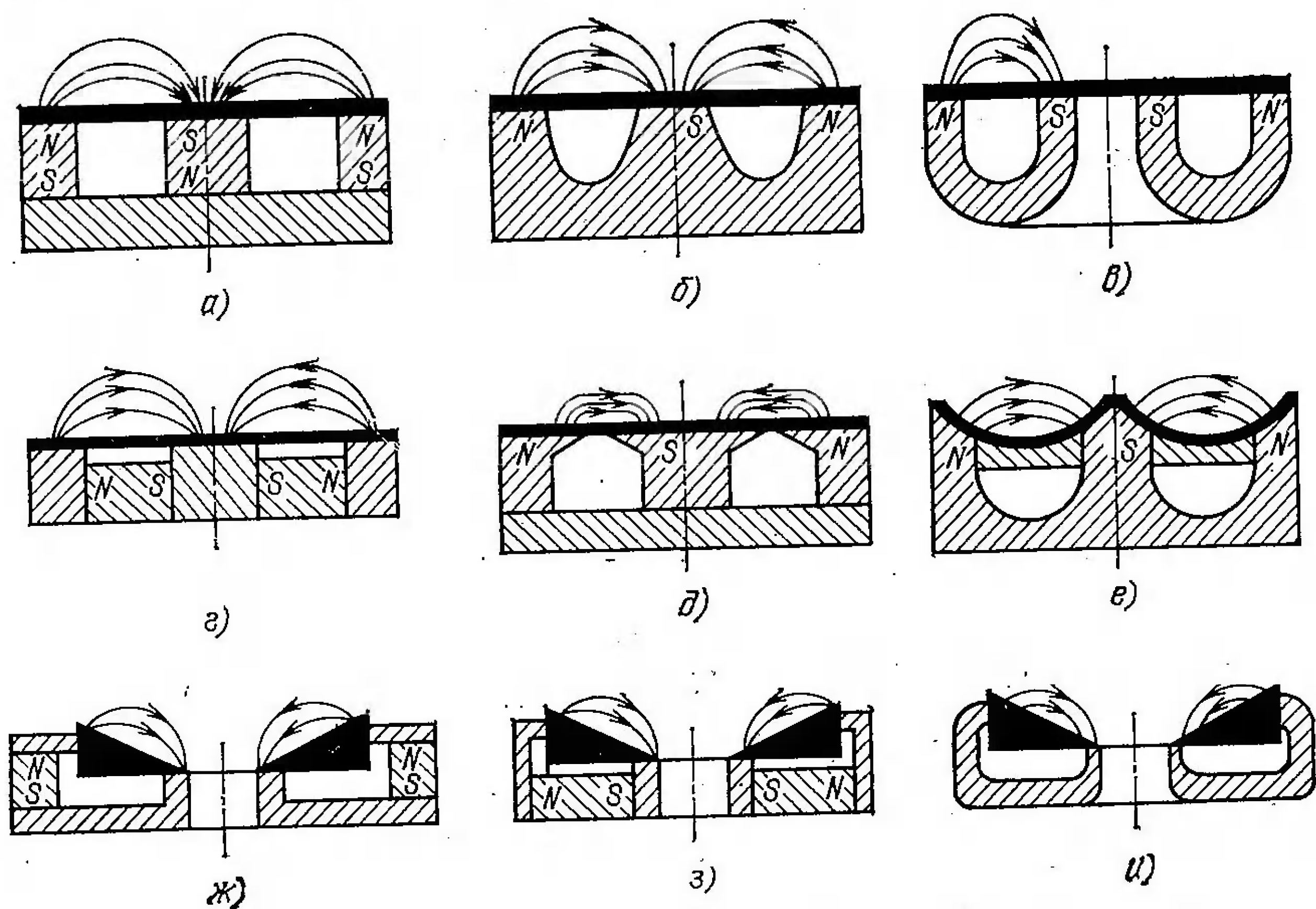


Рис. 36. Конструкция магнитных систем магнетронных распылителей

блоки, перекрывая их сверху общим полюсным наконечником. Более эффективно сконцентрировать поле в рабочем зазоре с минимальными потерями позволяет магнитная система, приведенная на рис. 36,б. Однако она представляет собой магнит специфической формы и требует специального изготовления. Аналогичный эффект достигается при использовании магнитов подковообразной формы (рис. 36,в). Магнитную систему можно сделать более компактной, если использовать кольцевые магниты с радиальным намагничиванием (рис. 36,г), но изготовление таких магнитов достаточно сложно. Кроме того, приведенная конструкция харак-

теризуется значительным рассеянием магнитного поля снизу катодного блока. Форму магнитного поля можно изменять, используя полюсные наконечники определенной геометрии. Для создания в прикатодной области сильного магнитного поля, силовые линии которого почти параллельны распыляемой поверхности (что необходимо для более равномерного распыления поверхности мишени), можно использовать магнитную систему, показанную на рис. 36,д. Однако в такой конструкции при сильно развитых наконечниках индукция магнитного поля резко уменьшается с увеличением расстояния от мишени, поэтому эффективное распыление достигается только для достаточно тонких мишеней. В случае толстых мишеней не следует сильно увеличивать площадь полюсных наконечников. Максимальная степень локализации плазмы характеризует магнитную систему, изображенную на рис. 36,е. Несмотря на некоторую сложность изготовления, она является одной из самых эффективных. Для магнетронных распылительных систем с конической мишенью обычно используется магнитная система, приведенная на рис. 36,ж. Она хотя и недостаточно эффективна, поскольку поле рассеивается по периметру системы, но проста в изготовлении. На рис. 36,з показана аналогичная система с использованием радиальных магнитов. Наибольшая эффективность достигается в системе, в которой рассеяние поля отсутствует (рис. 36,и), однако она требует изготовления магнита специальной формы.

Форма мишени обуславливается видом распыляемого материала и геометрией магнитной системы. Мишень должна обеспечивать высокий коэффициент использования ее материала (что особенно важно, поскольку распыление мишени неравномерно, а стоимость мишени высока), хороший электрический и тепловой контакты с водоохлаждаемым держателем, удобство замены, минимальное экранирование магнитного поля. На рис. 37 показаны некоторые конструктивные варианты конических мишеней. Обычная коническая мишень (рис. 37,а) проста в изготовлении, ее форма удобна для нанесения на нее слоя толщиной до 2,5 мкм при исследовании процесса распыления дорогостоящих материалов, она равномерно нагревается, что исключает расплавление поверхности при распылении легкоплавких материалов. Однако рабочее давление при такой мишени достаточно высокое (1 Па), а главное, по мере ее распыления сильно меняются электрические характеристики разряда, что не обеспечивает воспроизводимости параметров процесса осаждения пленки. При использовании мишени, показанной на рис. 37,б, эти недостатки устраняются. Однако образующаяся по мере распыления материала глубокая и достаточно узкая выемка уменьшает срок службы мишени и коэффициент полезного использования распыляемого материала. Мишень на рис. 37,в наиболее пригодна для промышленного применения и обеспечивает максимальное использование распыляемого материала, причем за весь срок службы мишени характеристики процесса остаются неизменными, что позволяет его полностью

автоматизировать. Правда, эта мишень сложна в изготовлении. На рис. 37,г показана мишень для распыления магнитных материалов. Боковая стенка мишени тонкая (до 1,5 мм), и магнитное поле проникает через нее, окружая нижнюю распыляемую часть мишени, толщина которой во избежание экранирования не должна превышать 6 мм. Такую мишень можно сделать составной из тонкостенного кольца и диска. Рабочее давление 0,5 Па, напряжение 500 В, ток 8 А.

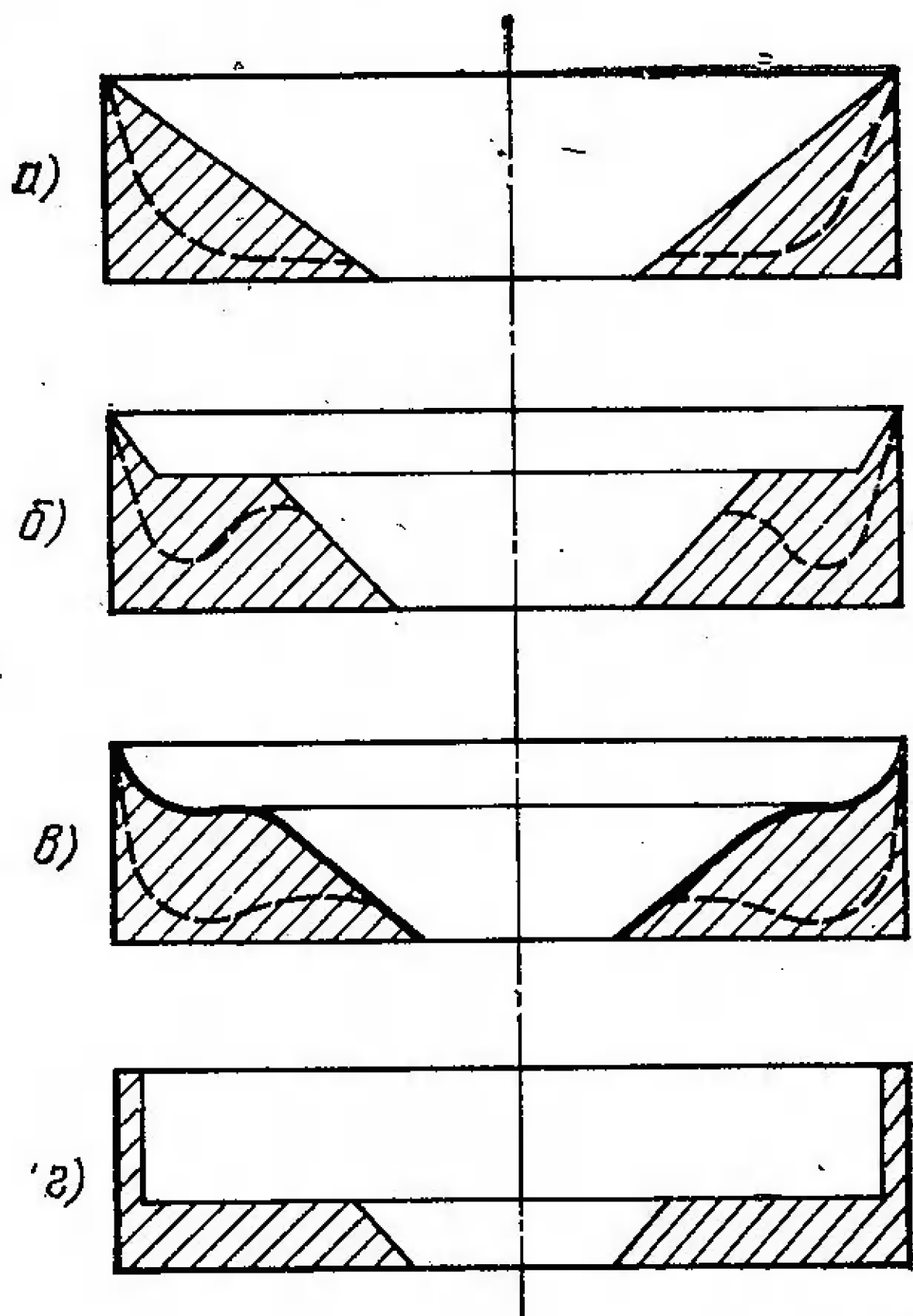


Рис. 37. Формы конических мишеней

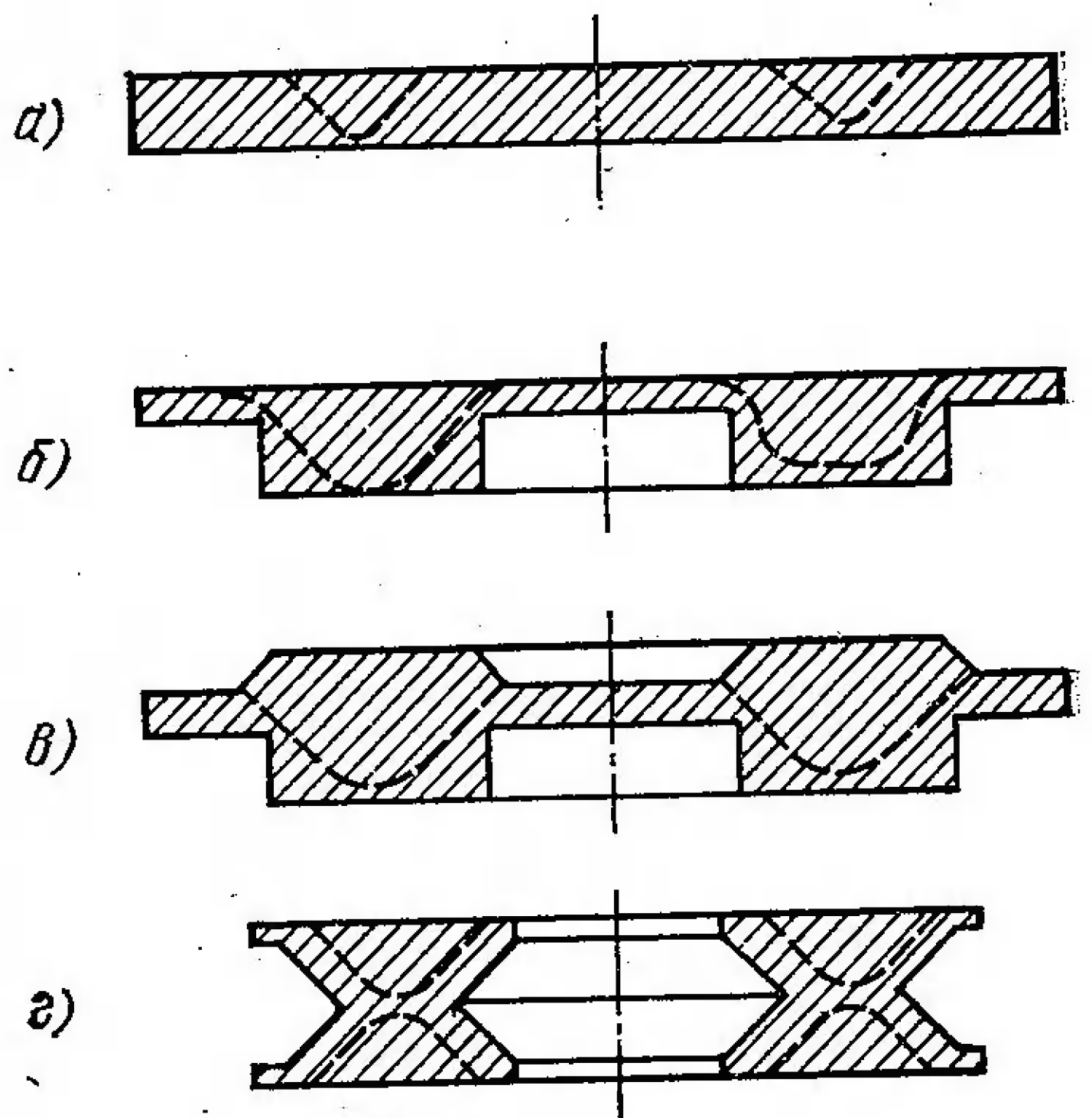


Рис. 38. Формы плоских мишеней

Следует отметить, что конические мишени не требуют специального крепления, поскольку они самоуплотняются в водоохлаждаемом держателе вследствие их расширения при нагревании, обеспечивая в дальнейшем надежные тепловой и электрический контакты, что особенно важно при распылении легкоплавких материалов. При разработке магнетронных систем с плоскими мишенями наиболее остро встает проблема их охлаждения. Значительные плотности тока на распыляемой поверхности приводят к неравномерному разогреву мишени, что приводит к ее короблению, а в местах плохого контакта с держателем — к ее расплавлению. При этом традиционный метод крепления винтами неэффективен. Большой эффект дает приклеивание мишени к держателю с помощью специальных проводящих клеев, однако наличие локальных областей перегрева при недостаточном охлаждении может вызвать сильное газовыделение и разрушение клеевого слоя. Надежным и эффективным способом крепления мишеней является пайка с помощью припоев на основе олова, индия или их спла-

вов. В то же время крепление мишеней с помощью клеев и припоев затрудняет замену мишеней, а сами клеи и припой могут влиять на состав газовой среды вакуумного рабочего объема. Поэтому чаще предпочтение отдается тем формам мишени, которые обеспечивают надежный тепловой контакт с водоохлаждаемым держателем и легко снимаются.

В последнее время эта проблема решена и для плоских мишеней, конструктивные варианты которых приведены на рис. 38. В отличие от традиционной плоской формы (рис. 38,а), мишень выполняется с утолщением в области зоны эрозии (рис. 38,б), а в держателе делается канавка аналогичной формы. Такая мишень в процессе разогрева обеспечивает хороший тепловой контакт за счет ее термического расширения. Помимо хорошего охлаждения при этом достигается и более высокий коэффициент использования распыляемого материала по сравнению с равнотолщинной мишенью. Еще выше этот эффект для мишеней, показанных на рис. 38,в и г (до 70 и 90% соответственно).

Типичные конструкции магнетронных распылительных систем с плоскими мишенями приведены на рис. 39. В простейшем случае (рис. 39,а) система включает в себя магнитный блок, вмонтированный в водоохлаждаемый корпус, являющийся одновременно и держателем мишени. Вокруг корпуса располагается анод в виде цилиндра или медной трубки с проточной водой, установленной по периметру мишени вблизи ее. Анод обычно заземляется. Для более полного устранения бомбардировки подложек вторичными электронами катодный блок окружается заземленным экраном, а по периметру мишени и в центре устанавливаются изолированные аноды, имеющие небольшой (до 50 В) положительный потенциал относительно земли. Аноды перекрывают места входа и выхода силовых линий магнитного поля и улавливают

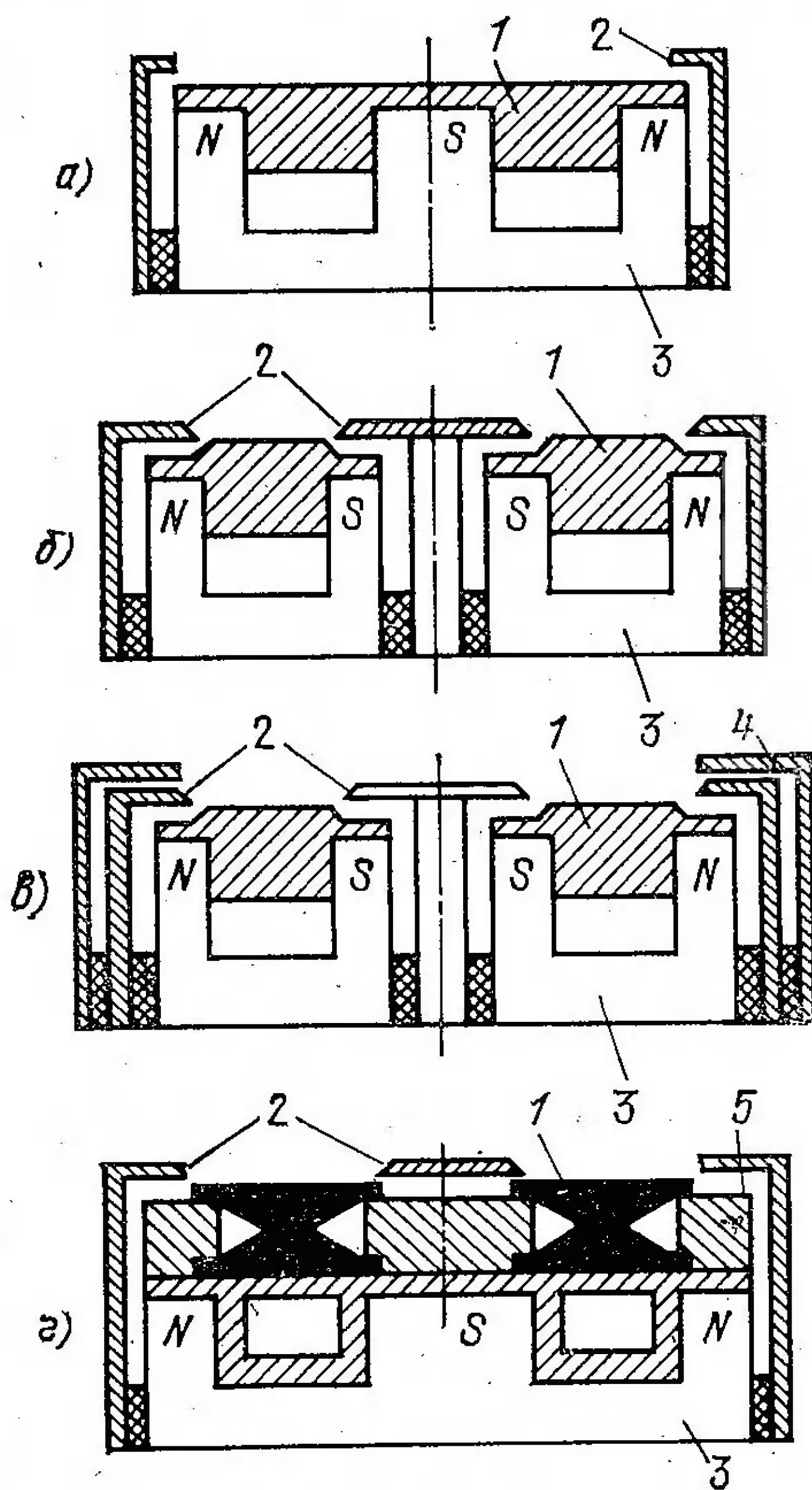


Рис. 39. Конструкции магнетронных распылительных систем с плоскими мишенями:

1 — мишень; 2 — анод; 3 — магнитная система; 4 — дополнительный электрод; 5 — полюсные наконечники

рассеиваемые вдоль силовых линий вторичные электроны, оставляя открытой только ту область мишени, где силовые линии параллельны распыляемой поверхности и скорость распыления максимальна (рис. 39,б). Экранирование слабо распыляемых участков мишени улучшает свойства получаемых пленок [40]. При изготовлении чувствительных к радиационным воздействиям приборов целесообразно дополнительно улавливать летящие в сторону подложки ионы, которые, например, могут образоваться в результате ионизации распыленных атомов мишени. В этом случае над поверхностью положительного анода устанавливается дополнительный отрицательный электрод (рис. 39,в). На рис. 39,г представлена конструкция магнетронной распылительной системы, использующей мишень специальной формы — четыре составные части из стержней с заданным профилем сечения, расположенных вдоль прямоугольной зоны распыления. Каждая часть крепится к центру и по периметру брусками из магнитного материала, которые являются в данном случае полюсными наконечниками, выводящими силовые линии магнитного поля от полюсов магнитной системы на поверхность мишени. Это позволяет распылять достаточно толстые мишени [41]. После распыления половины материала мишени она переворачивается и производится распыление остальной части, что обеспечивает повышение коэффициента использования материала мишени до 90%.

Типичная конструкция магнетронной распылительной системы с конической мишенью показана на рис. 40,а. Магнитная система

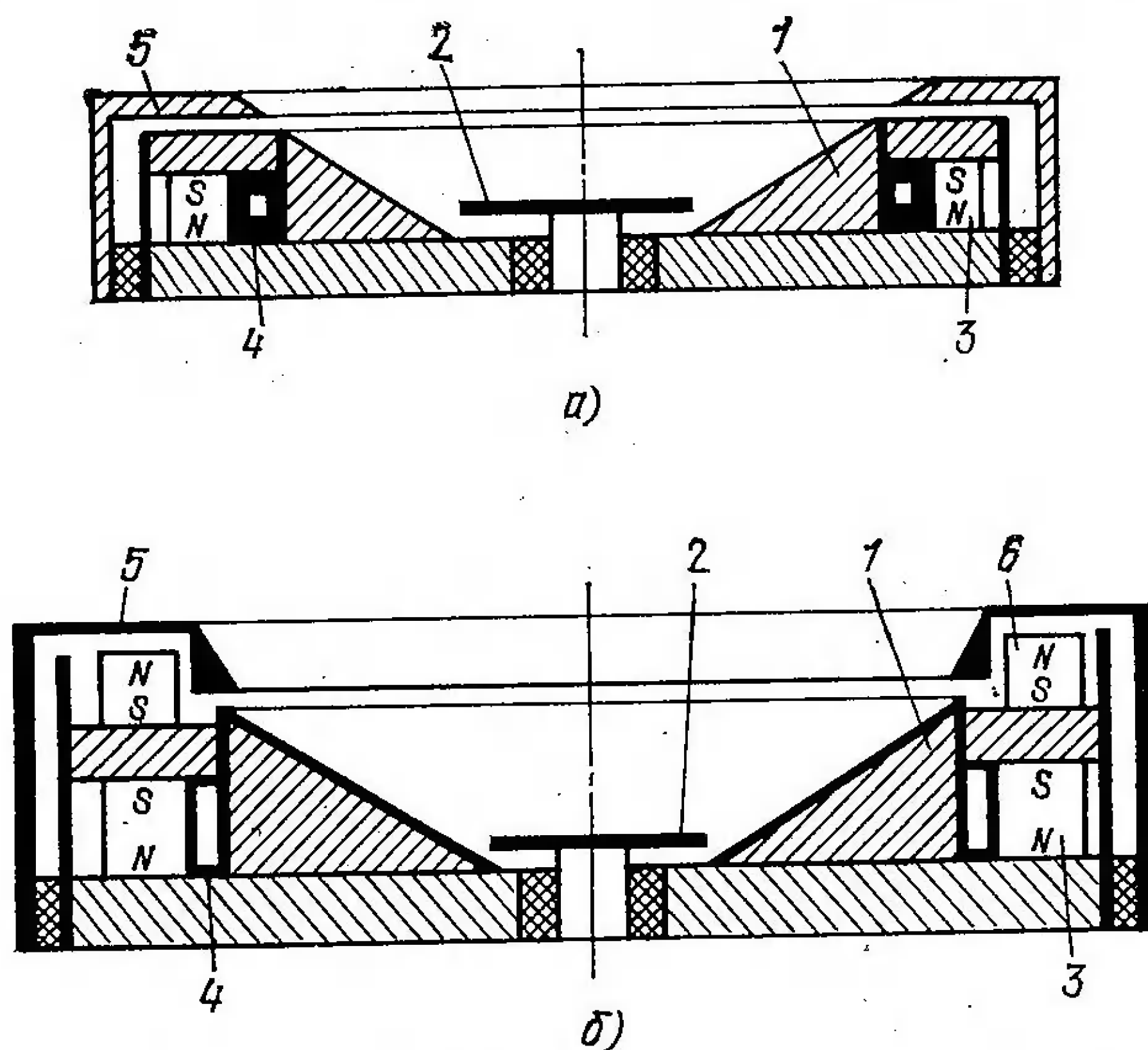


Рис. 40. Конструкции магнетронных распылительных систем с конической мишенью:

1 — мишень; 2 — анод; 3 — магнитная система; 4 — водоохлаждаемый держатель; 5 — экран; 6 — дополнительный магнит

с держателем и мишенью помещается в заземленный корпус, который играет роль дополнительного анода. Основной анод располагается в центре, и на него может быть подано положительное смещение. Недостатком такой магнетронной системы является сложность изготовления магнитной системы, обеспечивающей фокусировку силовых линий магнитного поля между полюсными наконечниками. Обычно наблюдаются искажение и рассеяние силовых линий у верхнего внешнего полюсного наконечника, что затрудняет локализацию плазмы в центральной наиболее толстой части мишени. Положительного результата можно достигнуть, используя дополнительную магнитную систему, расположенную над верхним полюсным наконечником непосредственно под дополнительным анодом (рис. 40, б).

Для магнитной системы могут быть использованы электромагниты, однако это влечет за собой увеличение габаритов, необходимость стабилизированного электропитания постоянным током и электрической изоляции в условиях интенсивного водяного охлаждения. Поэтому в промышленных условиях целесообразно применять постоянные магниты, а электромагниты — при экспериментальных исследованиях для выбора оптимальной величины магнитного поля применительно к конкретным условиям и конструкции магнетронной распылительной системы.

С коэффициентом использования распыляемого материала тесно связана проблема равномерности распыления мишени. Выше были показаны пути повышения коэффициента использования распыляемого материала выбором мишени определенной геометрии. Однако существует еще один путь — применение сканирующего магнитного поля.

Существуют два способа перемещения магнитного поля по поверхности мишени: элек-

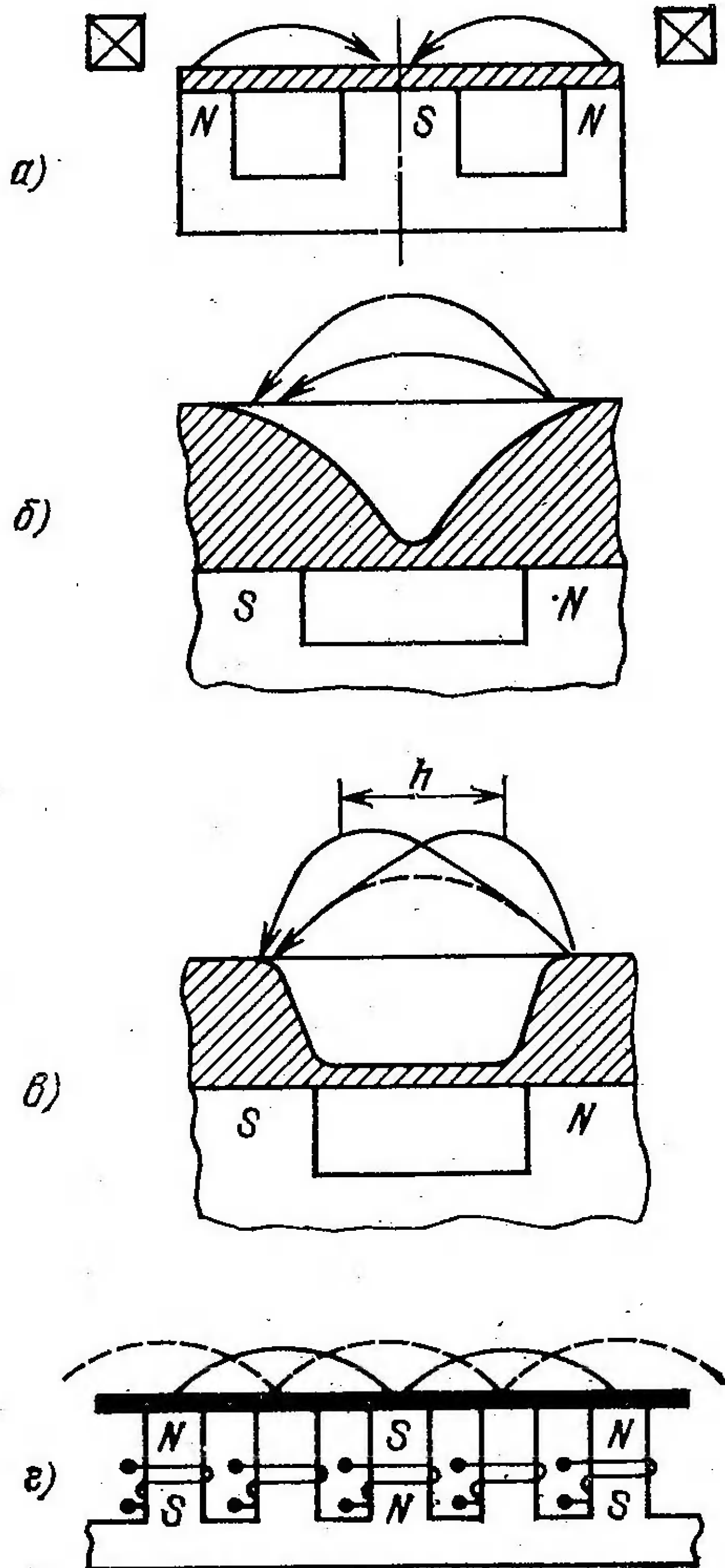


Рис. 41. Конструкции магнетронных распылительных систем с переменным магнитным полем

ромагнитный и механический. В первом случае вокруг мишени устанавливают электромагнит, который создает дополнительное переменное магнитное поле, перпендикулярное поверхности мишени (рис. 41,а). При неподвижном постоянном поле арочной конфигурации профиль зоны распыления имеет вид, показанный на рис. 41,б. Использование дополнительного переменного поля производит деформацию основного поля: вершина арки начинает смещаться от средней линии, в результате чего происходит симметричное смещение зоны максимальной эрозии, и профиль распыления становится почти прямоугольным (рис. 41,в). Равномерность распыления мишени можно значительно увеличить, используя многоячеистую электромагнитную систему, питающуюся от сети переменного тока (рис. 41,г).

Методы механического сканирования плазмы по мишени перемещением магнитной системы весьма разнообразны и реализуются в основном при использовании постоянных магнитов. Правда, конструкции подобных магнетронных систем достаточно сложны. Вращательное или возвратно-поступательное перемещение магнитной системы обеспечивает равномерное распыление почти всей поверхности плоских и цилиндрических мишеней (рис. 42), при-

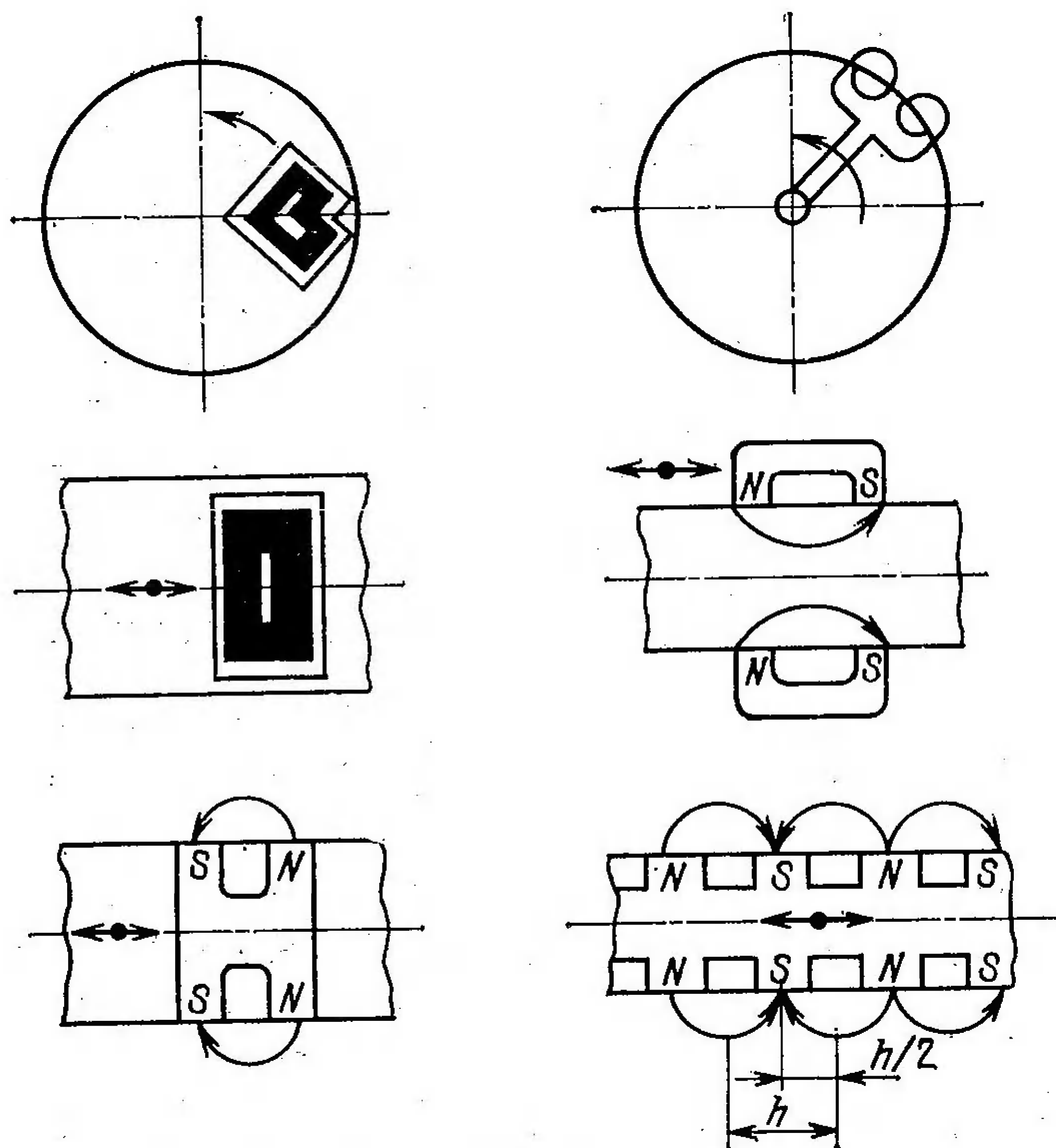


Рис. 42. Магнетронные распылительные системы с механическим сканированием магнитного поля

чем для цилиндрических мишеней целесообразно использовать многополюсные магнитные системы. В этом случае достаточно колебательного движения магнитного блока с амплитудой, равной половине расстояния между соседними зонами максимальной эрозии.

Решение проблемы равномерности распыления мишени обеспечивает получение пленок равномерной толщины. С этой целью магнетронные системы могут быть использованы в комбинации со стандартными планетарными внутрикамерными устройствами, что позволяет осаждать пленки, неравномерность толщины которых не превышает $\pm 2\%$, однако при этом скорости осаждения значительно снижаются. Для достижения высокой производительности в процессе нанесения пленки подложка обычно должна располагаться на расстоянии 50—80 мм от распыляемой поверхности. При этом в магнетронных системах с плоской мишенью высокую равномерность пленки можно получить при использовании специальных профилированных экранов, конфигурация которых подбирается эмпирически: На рис. 43, а показана форма экрана, используемого при нанесении

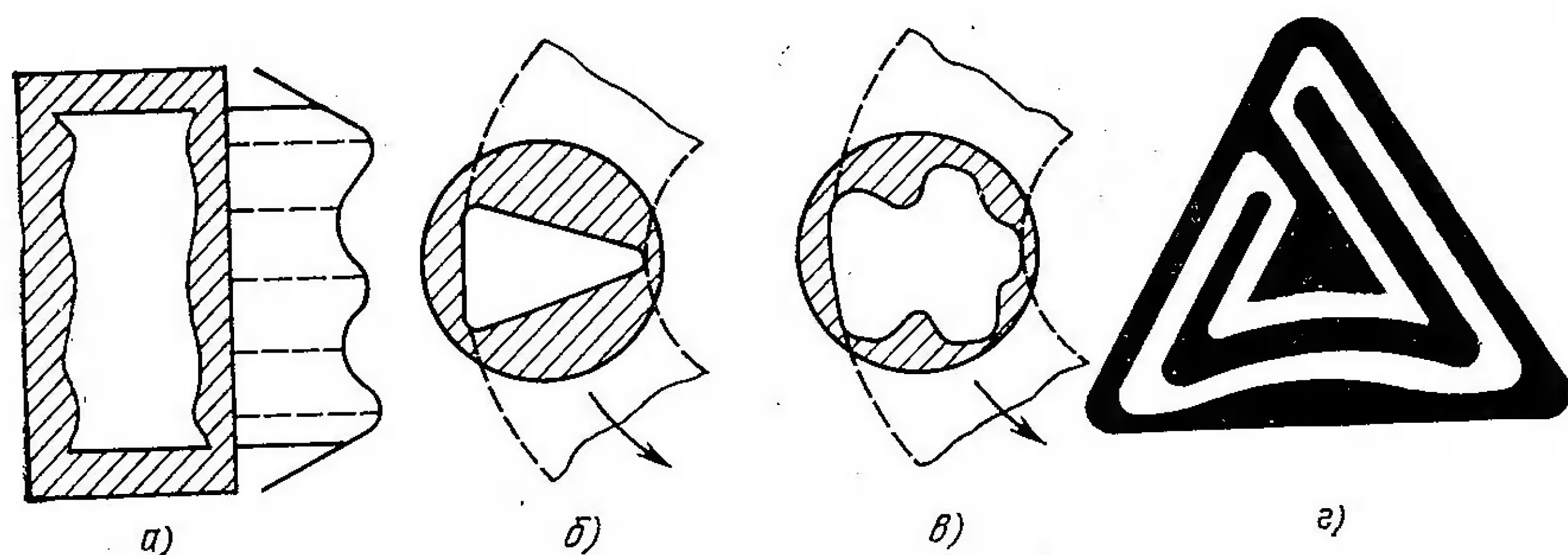


Рис. 43. Формы профилированных экранов (а—в) и плоской мишени для магнетронной системы со сложной конфигурацией магнитной системы (г) (зона распыления не закрашена), предназначенных для получения высокой равномерности пленки по толщине на подложках, расположенных на кольцевом подложкодержателе

пленки на линейно перемещаемые поперек прямоугольной мишени подложки. В системах с дисковой мишенью и кольцевым вращающимся подложкодержателем форма профилированного экрана может иметь вид, приведенный на рис. 43, б и в. Однако применение экранов приводит к уменьшению эффективной скорости осаждения, накоплению на них осаждаемого материала, который необходимо периодически удалять. В большинстве случаев целесообразно изменить геометрию мишени и магнитной системы. В качестве примера на рис. 43, г показана форма мишени и зоны распыления в магнетронной распылительной системе, используемой для нанесения пленки на подложки, расположенные на вращающемся кольце шириной 200 мм.

Магнетронные системы широко используются в промышленных вакуумных установках для нанесения тонкопленочных покрытий. В частности, системы с коническими мишенями устанавливаются вместо электронно-лучевых испарителей в стандартные установки периодического действия с планетарными внутрикамерными устройствами. Иногда устанавливается несколько магнетронных распылительных систем для получения многослойных покрытий в едином вакуумном цикле. Магнетронные системы с плоской мишенью обычно используются в установках полунепрерывного и

непрерывного действия. Более того, появление и развитие распылительных систем, обеспечивающих высокие скорости осаждения материалов, дали новый импульс для разработки установок непрерывного действия, поскольку магнетронные системы позволяют полностью автоматизировать процесс нанесения пленок. Обычно в таких установках используются магнетронные распылители с мишенью прямоугольной формы, а подложки перемещаются линейно поперек мишени с помощью специальных транспортирующих устройств.

Типичная конструкция установки с магнетронной системой показана на рис. 44. Подложки загружаются в шлюзовую камеру и затем с помощью транспортера перемещаются в вакуумную камеру, в которой устанавливаются устройства предварительного

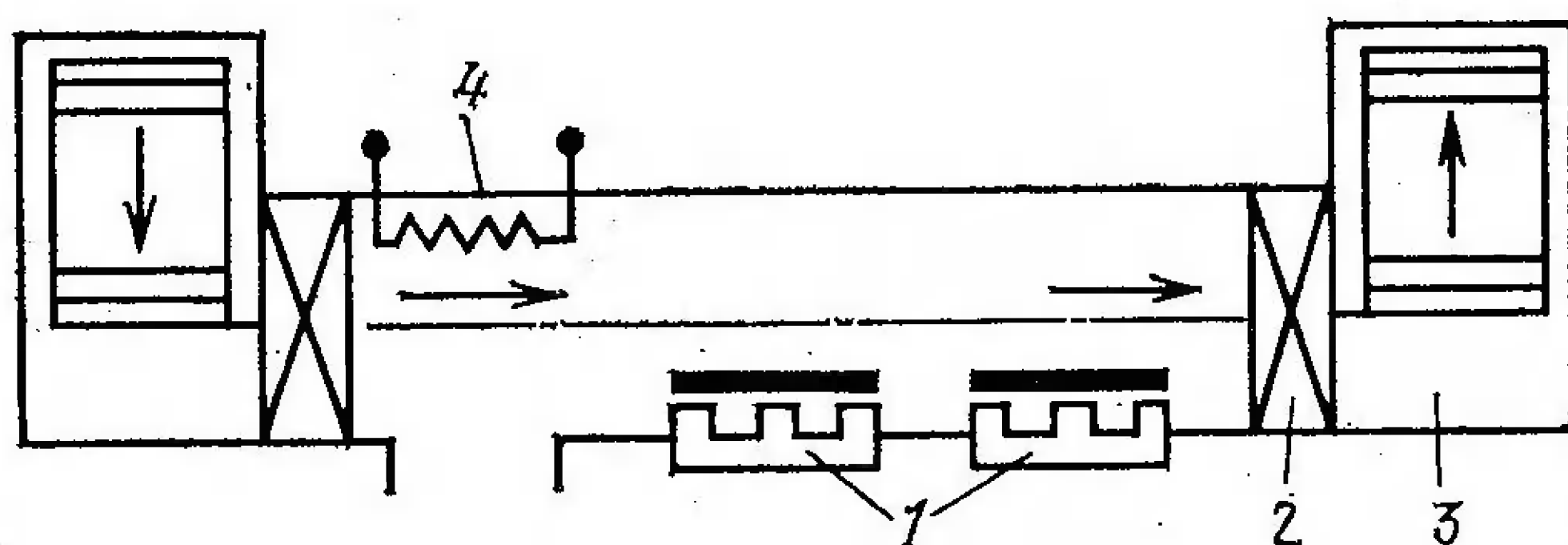


Рис. 44. Схема установки с магазинной загрузкой-выгрузкой подложкодержателей:

1 — магнетронный распылитель; 2 — шлюзовой затвор; 3 — шлюзовая камера; 4 — позиция нагрева

нагрева и очистки подложек, а также одна или несколько магнетронных распылительных систем. После нанесения пленки подложки поступают в шлюзовую камеру выгрузки, откуда извлекаются оператором. Рабочая камера может быть выполнена в модульном исполнении по числу необходимых рабочих позиций, а магнетронные распылители могут располагаться как вверху, так и снизу камеры. В первом случае не требуется крепления подложек, и они просто кладутся на транспортирующее устройство. Однако здесь не исключена возможность загрязнения подложки отслоившейся с элементов распылителя пленки. Во втором случае отслоившаяся пленка не может упасть на подложки, но требуется их специальное крепление в держателе. Возможно и вертикальное положение магнетронной распылительной системы и подложек. В установке периодического действия барабанного типа (рис. 45) подложки закрепляются на внешней поверхности вертикально расположенного вращающегося барабана. Магнетронные распылители с прямоугольными мишенями устанавливаются на крышке рабочей камеры вертикально вдоль образующей барабана на расстоянии в несколько сантиметров. Установка обладает высокой производительностью благодаря высоким скоростям осаждения и большому числу одновременно обрабатываемых подложек. Возможна также установка магнетронных систем рас-

пыления внутри барабана. В этом случае подложки закрепляются на его внутренней поверхности [42].

Форма и размеры магнетронных систем могут быть самыми разнообразными. Имеются сведения о конструкциях с мишенями длиной 2 м и шириной до 20 см [15]. При использовании мишеней большой площади с целью более равномерного их распыления создается несколько зон распыления. Например, известны системы с дисковыми мишенями диаметром более 60 см, в которых создавалось до шести зон распыления в виде концентрических колец, при этом коэффициент использования материала мишени достигал 80%. Для повышения производительности в установках непрерывного действия можно применять прямоугольные магнетронные системы с несколькими зонами распыления, каждая из которых будет представлять собой линейные источники распыляемого материала, поперек которых перемещается подложка. Естественно, что увеличение распыляемой площади требует приложения больших мощностей, и на упомянутую выше мишень размером 200×20 см, используемую при производстве зеркал и в автомобильной промышленности, нужно подавать мощность до 100 кВт.

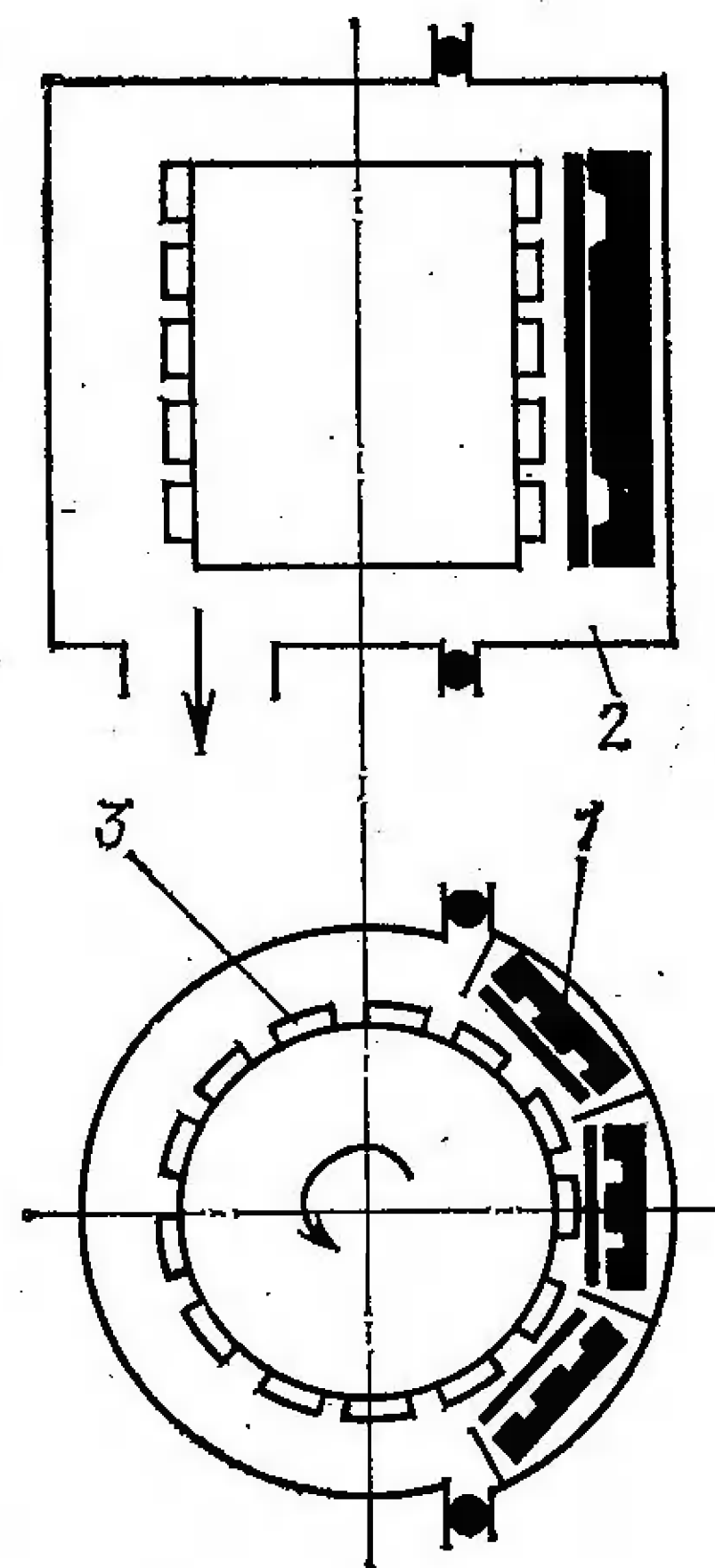


Рис. 45. Схема установки периодического действия барабанного типа:

1 — магнетронный распылитель; 2 — дверца вакуумной камеры; 3 — барабан с подложками

Важным вопросом при разработке вакуумных установок с магнетронными системами распыления является выбор откачных средств и конструкции вакуумной системы. Это диктуется особенностями процесса распыления, для проведения которого необходимо совместить два противоречивых требования: обеспечить низкий уровень загрязняющих примесей (к которым относятся в первую очередь реактивные газы и углеводороды), для чего нужна предварительная высоковакуумная откачка рабочей камеры; проводить процесс при достаточно высоком давлении рабочего газа (0,5—1) Па, не свойственном большинству высоковакуумных насосов, и больших газовых потоках.

Использование непрогреваемых рабочих камер, со стенок которых происходит интенсивное газовыделение, заставляет проводить непрерывную «промывку» рабочего объема инертным газом для удаления загрязняющих примесей. В стационарном режиме при хорошем перемешивании потоков инертного газа Q и загрязняющих примесей G давление последних $p_3 = [G/(G+Q)]p$. Но так как $Q \gg G$, то $p_3 \approx (G/Q)p$, откуда видно, что p_3 составляет G/Q -ю часть полного давления аргона p . Поскольку величина G обычно точно неизвестна, то за «показатель качества», или «добротность» вакуумной системы предлагается принимать отношение p/Q и для получения малого значения этой величины работать при большом потоке инертного газа [43]. Однако это требует высокой производительности вакуумной системы и используемых в ней откачных средств. К тому же для удаления загрязняющих примесей необходимо, чтобы поток имел вязкостный характер и обязательно проходил через зону разряда [44]. Указанный выше показатель «добротности» не учитывает таких важных факторов системы, как наличие загрязнений в самом инертном газе, а также геттерирующее действие рас-

пыляемого материала, который, осаждаясь на водоохлаждаемых стенках рабочего объема, может выполнять роль дополнительного насоса со скоростью откачки S_{Π} , в ряде случаев близкой к скорости откачки насоса S_{H} [45].

Считая, что концентрация загрязняющих примесей в аргоне составляет N_3 , общее их давление

$$p_3 = (G + N_3 p S_{\text{H}}) / (S_{\text{H}} + S_{\Pi}). \quad (38)$$

Проведя соответствующие преобразования, получим

$$p_3 = N_3 p + (G - N_3 p S_{\Pi}) / (S_{\text{H}} - S_{\Pi}). \quad (39)$$

Если натекание загрязняющих примесей отсутствует, стенки распылительной системы хорошо обезгажены и интенсивно охлаждаются проточной водой, а распыляемый материал обладает высокими геттерирующими свойствами ($N_3 p S_{\Pi} > G$), то минимального значения p_3 можно достигнуть в статическом режиме, когда $Q=0$.

Быстрота геттерной откачки может быть существенно повышена при использовании большой площади мишени, увеличении скорости распыления и применении специальных водоохлаждаемых экранов, на которые осаждается пленка (рис. 46, а). Достоинством статического режима (который, однако, эффективен только в том случае, если осаждаемый материал обладает сильно геттерирующими свойствами) является то, что можно перекрыть впускной патрубок насоса, прекратив тем самым поток загрязняющих примесей из насоса в распылительную систему.

Если конструкция системы предусматривает вакуумную блокировку (рис. 46, б), при которой аргон поступает непосредственно в распылительную камеру, вытекая затем через щели в рабочий объем установки, откачанной до высокого вакуума, то, несмотря на кажущееся отличие этой системы от системы с водоохлаждаемым экраном (см. рис. 46, а), минимальное p_3 в этом случае так-

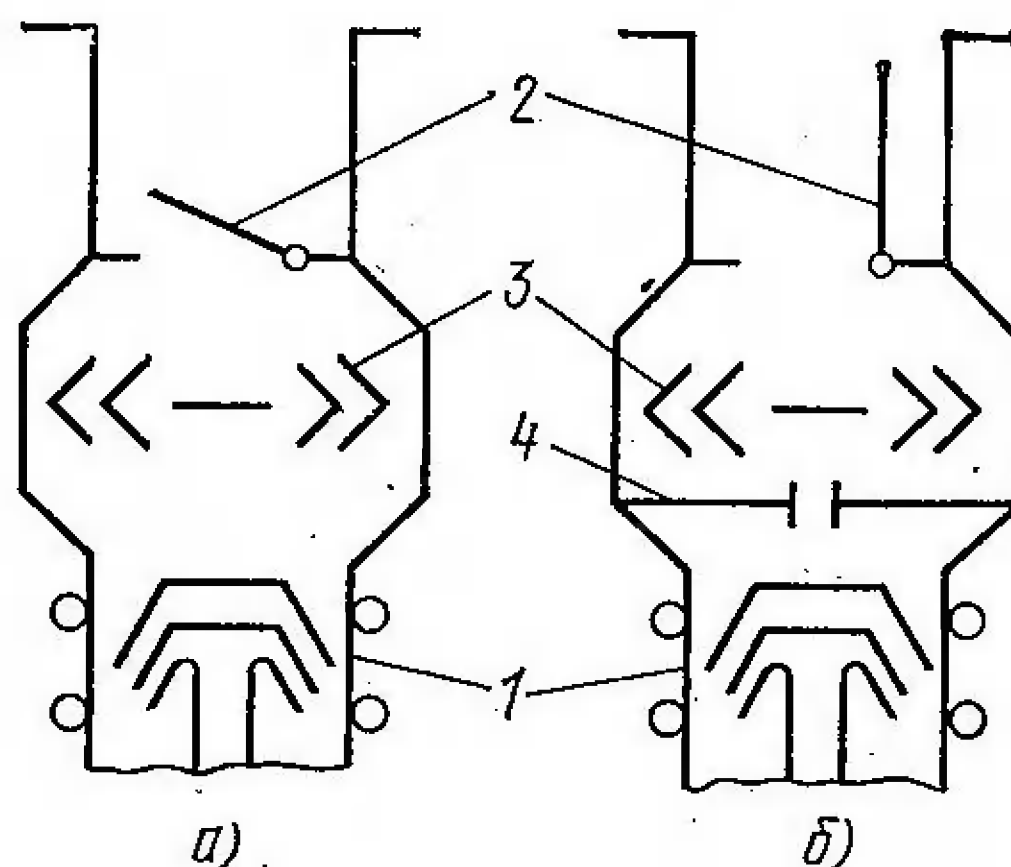
же получается при режиме откачки, близком к статическому. Однако при наличии вакуумной блокировки обеспечить статический режим гораздо труднее из-за значительного перепада давлений между распылительной камерой и рабочим объемом установки.

В производственных условиях при использовании распылительных систем открытого типа (рис. 46, в), когда $G \gg N_3 p S_{\Pi}$, оптимальным является динамический режим откачки, при котором уменьшение p_3 достигается за счет увеличения S_{H} , а следовательно, и величины Q . Если магнетронная распылительная система используется в установке непрерывного действия (рис. 46, г), когда давление в боковых (вспомогательных) камерах значительно ниже, чем давление в рабочей камере, и в последнюю помимо основного потока загрязнений со стенок распылительной системы непрерывно вводится поток загрязнений, сопровождающий движущуюся ленту конвейера с подложками, то в этом случае также предпочтителен динамический режим откачки [46].

Основными видами откачных средств, используемых в установках с магнетронными распылительными системами, являются диффузионные, турбомолекулярные и криогенные насосы. При переходе от режима высоковакуумной откачки ($p=10^{-3}\div 10^{-4}$ Па) к режиму распыления ($p\approx 0,5$ Па) существенное значение имеет правильный выбор места дросселирования газового потока. Иногда дросселирование производится частичным перекрытием затвора, расположенного над азотной ловушкой (рис. 47, а). Однако такое дросселирование не рационально, поскольку вызывает увеличение концентрации загрязняющих примесей.

Рис. 47. Различные способы дросселирования газового потока: частичное перекрытие затвора (а), использование постоянной диафрагмы с отверстием (б):

1 — диффузионный насос; 2 — затвор; 3 — азотная ловушка; 4 — диафрагма с отверстием



Так, если при полностью открытом затворе эффективная скорость откачки равна $S_{н1}$, а затем при его частичном перекрытии становится $S_{н2}$, то одновременно в $S_{н1}/S_{н2}$ раз возрастает давление загрязняющих примесей в рабочем объеме установки, что в ряде случаев недопустимо. Поэтому дросселирование потока надо производить ниже азотной ловушки (рис. 47, б), что позволяет сохранить скорость откачки паров воды (которые являются основной компонентой остаточной среды в непрогреваемых установках) на прежнем уровне и тем самым снизить давление загрязняющих примесей в 15—20 раз. При этом время высоковакуумной откачки рабочего объема установки за счет постоянного дросселирования газового потока увеличивается незначительно (примерно в 1,5 раза) [47].

В последние годы для откачки в установках с магнетронными системами все шире начинают применяться турбомолекулярные насосы, характерной особенностью которых является стабильная скорость откачки в широком интервале давлений (от 10^{-1} до 10^{-6} Па). Однако для этих насосов характерна избирательность откачки, в частности у них низок коэффициент компрессии по легким газам, в первую очередь по водороду, что ограничивает возможность достижения высокого вакуума. Наличие водорода в качестве остаточного газа может значительно повлиять на качество пленок, получаемых с помощью магнетронных систем. Исследования показали, что для обеспечения достаточно эффективной откачки водорода при использовании турбомолекулярных насосов в установках с большими потоками рабочего газа на выходе насоса необходимо устанавливать механический форвакуумный насос с высокой производительностью, причем соотношение скоростей откачки турбомолекулярного и механического насосов должно быть не выше 20 : 1 [48]. Кроме того, для увеличения эффективности откачки воды рекомендуется над входом турбомолекулярного насоса устанавливать криогенную ловушку. При этих двух условиях указанный насос применим в качестве откачного средства в области среднего вакуума и при больших потоках газа.

Весьма перспективными для откачки вакуумных установок с магнетронными распылительными системами считаются криогенераторы. Исследования показывают, что по характеристикам откачки они аналогичны турбомолекулярным насосам, однако полностью исключают наличие в рабочем объеме углеводородов [49]. При работе с большими потоками газа на криопанели криогенератора нарастает слой сконденсированных остаточных газов и эффективность откачки начинает падать. Обычно максимальное рабочее давление для криогенератора составляет 0,13 Па, и работа при более высоких давлениях требует дросселирования и наличия дополнительной азотной ловушки. Специально разработанный для магнетронной системы криогенератор имеет двойную криопанель: централь-

ная ее часть, имеющая температуру 20 К, окружена панелью с температурой 80 К. Основной поток аргона и паров воды откачивается внешней панелью, а более легкие газы конденсируются на центральную. Такая конструкция позволяет вести эффективную откачку при давлении инертного газа до 0,4 Па без использования азотной ловушки и дросселирования и сохранять состав остаточных газов на одном уровне в течение длительного (до 7 ч) процесса распыления [50].

При выборе средств откачки следует также иметь в виду и экономическую сторону вопроса. По стоимости диффузионный насос наиболее дешевый, а криогенный — самый дорогой. Однако стоимость эксплуатационных затрат наименьшая у турбомолекулярного насоса, у криогенного она в 1,3 раза выше, а эксплуатация диффузионного насоса обходится в 1,9 раза дороже, чем турбомолекулярного [48].

Глава четвертая

◆ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Потенциальные возможности применения магнетронных распылительных систем в настоящее время еще далеко неполностью выяснены и реализованы. Наиболее ярко достоинства этих систем проявляются при осаждении пленок металлов и сплавов, получении оптических покрытий, пассивирующих диэлектрических пленок (при использовании ВЧ напряжения), получении магнитных пленок, а также пленок сверхпроводящих материалов. С помощью магнетронных систем можно получать нитриды, карбиды, оксиды, сульфиды, селениды и другие соединения.

Получение пленок металлов и сплавов с помощью магнетронных распылительных систем нашло наиболее широкое применение в производстве интегральных схем для формирования омических контактов к кремнию, межсоединений и контактных площадок, а также электродов затвора МДП-структур. Для этих целей используются, как правило, пленки алюминия.

Качество алюминиевой металлизации в значительной мере зависит от скорости осаждения алюминиевой пленки на подложку. Чем больше скорость осаждения, тем больше величина зерна, более совершенна кристаллическая структура пленки, тем ниже ее удельное сопротивление, меньше сказывается эффект электромиграции и, как следствие, токоведущие дорожки и омические контакты имеют больший срок службы. Ориентированный рост пленок алюминия на неокисленных поверхностях кремния достигается при скорости осаждения не менее 15 нм/с. Однако крупнозернистая структура пленок уменьшает разрешающую способность операции травления и не позволяет получить тонкий рисунок топографии вследствие неравномерности травления краев элементов схем.

Более эффективным методом создания качественной алюминиевой металлизации является использование сплавов алюминия с добавками кремния и меди. Добавка меди снижает электромиграцию и подавляет эффект образования бугорков на поверхности осаждаемой пленки, а добавка кремния обеспечивает высокое качество контакта между кремниевой подложкой и пленкой алюминия. Получение такой металлизации с помощью резистивного или электронно-лучевого испарения затруднено из-за плохой воспроизводимости состава сплава, поскольку скорости испарения его компонентов различаются в сотни раз. Испарение компонентов из разных источников также не решает этой проблемы.

Получение пленок алюминия и его сплавов при высоких скоростях осаждения и хорошей воспроизводимости состава является одной из основных обла-

стей применения магнетронных распылительных систем в настоящее время [51, 52], хотя до сравнительно недавнего времени ионное распыление не получало достаточно широкого распространения вследствие низких скоростей распыления ($<0,1$ нм/с) при средней мощности источника 500 Вт. Использованию более высоких мощностей препятствовали трудности охлаждения алюминиевой мишени, а также деградация пленок под воздействием высокоэнергетических вторичных электронов, эмиттируемых мишенью.

Пленки алюминия, осаждаемые в магнетронных системах со скоростью 15 нм/с при давлении аргона 2 Па и линейном перемещении подложек, имеющих температуру 120°C, после двух и более проходов над мишенью имели удельное сопротивление 2,7 мкОм·см, что близко к сопротивлению массивного образца (2,655 мкОм·см [53]). Как показали эксперименты, наиболее сильное влияние на кристаллическое строение пленок алюминия оказывает присутствие азота. Удельное сопротивление и отражательная способность значительно зависят от наличия воды в остаточной атмосфере и температуры подложек.

Аналогичные зависимости наблюдаются и для пленок сплавов алюминия с кремнием и медью. Так, наличие азота и кислорода в остаточной атмосфере стимулирует рост зерен в вертикальном направлении, что существенно снижает отражательную способность пленки (до 2—10% при содержании в аргоне 1% азота и до 10—20% при содержании 1% кислорода). Увеличивается в 1,5—2 раза удельное сопротивление пленки. Однако добавка 1% азота в аргон способствует получению мелкозернистых пленок (размер зерен 0,25 мкм). Самая крупнозернистая структура была у пленок, полученных в чистом аргоне. Наиболее качественные пленки с высокой отражающей способностью (90%), малым размером зерен (0,35 мкм) и низким удельным сопротивлением получены в смеси $\text{Ar}+1\% \text{H}_2$ с предварительной откачкой системы до давления ниже $9 \cdot 10^{-5}$ Па [54, 55]. Добавка водорода (до 55%) в аргоне не влияет на разряд и скорость осаждения при работе магнетронной распылительной системы как на постоянном токе, так и в ВЧ режиме, в то время как в обычных диодных распылительных системах добавка от 1 до 10% водорода приводит к уменьшению скорости распыления (соответственно на 10—50%) вследствие увеличения концентрации более легких ионов водорода. Это объясняется образованием в магнетронном разряде преимущественно сложных ионов AgH^+ , а ионы водорода составляют менее 1% ионов аргона [56].

Исследования электрофизических свойств пленок алюминия, полученных с помощью магнетронных распылительных систем, проведенные в [57], показали, что при температуре подложки во время осаждения 430—470 К пленки имеют преимущественную ориентацию $\langle 110 \rangle$ с осью текстуры, перпендикулярной подложке. При повышении температуры до 620 К кристаллиты приобретают слабо выраженную текстуру $\langle 311 \rangle$ или обладают беспорядочной ориентацией, причем для пленок характерна мелкокристаллическая структура, позволяющая получить хорошее разрешение на операции травления. Средний размер кристаллитов до термообработки 0,5 мкм. Термообработка при 750 К в течение 30 мин приводит к их лучшей огранке и образованию отдельных крупных кристаллитов с размером у основания более 3 мкм и высотой до 0,2 мкм над поверхностью пленки (при толщине пленки 1 мкм). Скорость травления таких пленок алюминия в стандартном травителе не отличалась от скорости травления аналогичных пленок, полученных с помощью электронно-лучевого испарения в высоком вакууме.

Также установлено [57, 58], что при индивидуальной обработке подложек с помощью магнетронных систем получают пленки с высокой равномерностью по толщине $\pm 2\%$. При этом на рельефных поверхностях подложек толщина пленки на вертикальных гранях высотой 1—2 мкм составляла не менее 0,7 ее толщины на горизонтальной плоскости, а у основания ступенчатых профилей не наблюдались разрывы и микротрещины, которые характерны для пленок нанесенных с помощью электронно-лучевых испарителей на подложки, расположенные даже на сложных планетарных внутрикамерных устройствах. Все это свидетельствует о перспективности использования магнетронных распылительных систем в производстве ИС с многослойной и многоуровневой металлизацией, для которого характерна сложная рельефная поверхность с множеством ступенчатых профилей различной конфигурации.

При использовании магнетронных распылительных систем в сочетании с планетарными внутрикамерными устройствами необходимо учитывать требования к расположению системы распыления относительно планетарного механизма, поскольку диаграмма направленности потока распыленных атомов с поверхностного кольцеобразного источника отличается от косинусной. Если электронно-лучевой испаритель устанавливается на расстоянии 250 мм от стандартного планетарного устройства с сегментными подложкодержателями с радиусом сферы 250 мм, то магнетронную систему необходимо размещать на расстоянии 25 мм от планетарного устройства. При этом неравномерность пленки по толщине на одновременно обрабатываемых 75 пластинах диаметром 75 мм не превышает $\pm 6\%$, покрытие ступеньки качественнее, чем при испарении, и утоньшение пленки на боковой грани не превышает 0,5.

Получение низкоомных высокостабильных контактов к кремнию. Для этой цели используют распыление мишени из сплава $\text{Al}+1,5\%\text{Si}$. При осаждении пленок из данного сплава стехиометрия сохранялась на уровне $\pm 0,1\%$, в то время как при одновременном испарении из двух источников предельно достигнутая стехиометрия $\pm 0,3\%$. Сопротивление контактов, полученных с помощью магнетронной системы, меньше, чем контактов из силицида платины, созданных другими методами [16].

Использование магнетронных распылительных систем резко сказалось на повышении технического уровня производства ВЧ транзисторов, где предъявляются особые требования к металлизации. Для увеличения надежности транзисторов, обеспечения хорошего омического контакта, адгезии слоя металла к подложке и стабильности удельного сопротивления используется сплав $\text{Al}+2\%\text{Si}+4\%\text{Cu}$. Получить пленки заданного состава можно, распыляя материал из указанного сплава или проводя одновременное осаждение его компонентов, распыляемых из трех различных источников. Магнетронные системы распыления позволяют реализовать оба метода, причем в первом случае обеспечивается постоянство концентрации компонентов в пленке на протяжении всего срока службы мишени из сплава вне зависимости от толщины осаждаемой пленки, а во втором случае — легкость регулирования состава сплава, хорошая воспроизводимость процесса, простота контроля и управления процессом осаждения, что позволяет в 1,5—2 раза увеличить срок службы приборов [59], причем если при металлизации с помощью электронно-лучевого испарения дефекты контактов составляют 10—15%, то при использовании магнетронной системы этой проблемы не существует.

Удельное сопротивление и размер зерна пленок алюминиевых сплавов приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Металлизация	Удельное сопротивление, мкОм·см	Размер зерна, мкм
Al	$2,7 \pm 0,05$	1,0—1,5
$\text{Al}+1,2\%\text{Si}$	$2,8 \pm 0,01$	0,7—1,0
$\text{Al}+4\%\text{Cu}$	$2,9 \pm 0,1$	0,15—0,4
$\text{Al}+1\%\text{Si}+$ $+0,5\%\text{Cu}$	$2,8 \pm 0,1$	0,3—0,5
$\text{Al}+1\%\text{Si}+$ $+0,5\%\text{Mg}$	$2,9 \pm 0,1$	0,3—0,7

Исследование пленок сплавов алюминия показало, что при содержании кремния более 1% и меди более 2% наблюдается неравномерное распределение этих компонентов по толщине пленки: концентрация их на границе раздела подложка—пленка и на поверхности пленки возрастает. Этот эффект тем заметнее, чем ниже скорости осаждения пленки. Для выравнивания концентрации по глубине пленки используется отжиг. Таким образом, контролируя характе-

ристики процессов осаждения и термообработки, можно добиться желаемого распределения компонентов сплава по толщине пленки [60].

Специфическим свойством магнетронных распылительных систем, которое делает их уникальными, является то, что распыление материалов с их помощью позволяет осаждать пленки с минимальным числом радиационных повреждений подложек и пленок. Исследование МОП-конденсаторов, полученных различными методами (с помощью магнетронного, электроно-лучевого распыления и термического испарения), показало, что по остаточным радиационным дефектам приборы, полученные с помощью МРС, не отличаются от структур, полученных термическим испарением. Некоторое количество положительных зарядов в пленках, вызываемых ультрафиолетовой радиацией из плазмы, эффективно удаляется с помощью отжига при сравнительно низких температурах (700 К в течение 10 мин). По сравнению с электроно-лучевым испарением магнетронные системы позволяют получать МОП-приборы с большей воспроизводимостью характеристик, причем пленки легче поддаются отжигу. Таким образом, радиационные дефекты при металлизации полупроводниковых структур с помощью магнетронных систем минимальны и легко устраняются отжигом при температурах, совместимых со стандартными операциями [16, 57].

Магнетронные распылительные системы используются для изготовления контактных площадок в производстве гибридных ИС и микросборок на их основе, формирования полосковых линий для ИС СВЧ диапазона, многослойных покрытий типа Cr—Cu—Au [61], применяющихся также в дисплеях на жидких кристаллах.

В связи с интенсивными исследованиями по применению многоуровневой металлизации ИС магнетронные системы используют для осаждения тугоплавких металлов, которые в меньшей степени, чем алюминий, подвержены электромиграции, поскольку имеют высокотемпературные эвтектики с кремнием. Наиболее предпочтительными из тугоплавких металлов для этих целей являются вольфрам и молибден. Исследования показывают, что, изменяя характеристики процесса осаждения, можно варьировать такие свойства покрытий, как внутреннее напряжение, удельное сопротивление и отражательная способность. Эти свойства пленок зависят, в частности, от рабочего давления, и для каждого металла существует определенное критическое давление, ниже которого в пленке возникают напряжения сжатия, а выше — напряжения растяжения. При этом сильно уменьшается отражательная способность и увеличивается удельное сопротивление пленки [62]. Критическое давление зависит и от рабочего газа, возрастая с уменьшением его атомной массы. Так, при распылении молибдена в ксеноне критическое давление последнего составляет 0,3 Па, а при использовании неона — увеличивается до 0,9 Па. В обратной от массы газа зависимости находится и его концентрация в получаемой пленке: при переходе от криптона к неону она увеличивается на два порядка. Критическое давление также растет с увеличением атомной массы распыляемого материала от 0,3 Па для хрома до почти 2 Па для тантала. Это связано с бомбардировкой пленки частицами, отраженными от распыляемой мишени. Более ярко это явление выражено в цилиндрической магнетронной системе. Чем менее массивны атомы бомбардирующего газа и более массивны атомы мишени, тем больше энергия и число отраженных от мишени частиц и длина их свободного пробега. Поэтому содержание более легких газов в пленке выше.

Металлизация на основе тугоплавких металлов используется в производстве биполярных приборов для создания диффузионных барьерных слоев W+10%Ti и многослойных структур типа W+10%Ti—Al и W+10%Ti—Au. С помощью магнетронных систем получают многослойные пленки Ti—Pt—Au при создании балочных выводов микросхем, пленки Ti—Ag для металлизации кремниевых элементов солнечных батарей и пленки NiCr—Al+6%Cu для производства мощных кремниевых приборов. При этом в несколько раз увеличивается производительность и повышается качество пленок по сравнению с методами, используемыми промышленностью в настоящее время для этих же целей [63].

Исследования барьерных слоев W—Ti, полученных с помощью магнетронной системы распыления в сочетании с планетарным внутрикамерным устройством, показали, что содержание титана в пленке ниже, чем в мишени, но тем больше, чем больше мощность разряда. Так, при содержании в мишени 7% титана в

пленке его оказалось 3,4% при мощности разряда 1 кВт и 4% при мощности 8 кВт. Уменьшение содержания титана в пленке объясняется его более интенсивными (по сравнению с массивным вольфрамом) отражением и рассеянием на атомах аргона. Этот эффект подавляется при близком положении подложки относительно мишени в установках конвейерного типа. От содержания титана сильно зависит удельное сопротивление пленки. На его величину влияют также добавки кислорода или азота, причем предпочтительней использование добавок азота, так как он, в отличие от кислорода, не ухудшает травимости пленки и улучшает на три порядка ее барьерные свойства. Варьируя парциальным давлением азота, скоростью осаждения и мощностью разряда, можно управлять удельным сопротивлением пленок W—Ti [63].

С помощью магнетронной распылительной системы может быть реализовано изготовление высококачественных металлизированных фотошаблонов нанесением хрома или окиси железа на стеклянные подложки. Как и при распылении тугоплавких металлов, существует критическая величина давления, при котором отсутствуют напряжения в пленке, а при увеличении давления увеличивается удельное сопротивление и уменьшается отражательная способность [64]. Предполагается, что внутренние напряжения в пленках хрома обусловлены бомбардировкой пленки энергетическими атомами и ионами — аналогично тем процессам, которые имеют место при распылении с потенциалом смещения на подложке.

Магнетронные распылительные системы находят применение не только в производстве полупроводниковых приборов, но и при изготовлении керамических электронных компонентов: керамических конденсаторов, пьезокерамических элементов для генераторов и резонаторов на основе керамических композиций циркония и титана, полосковых линий для СВЧ-структур и резистивных матриц на основе Al_2O_3 , а также варисторов и резисторов с положительным температурным коэффициентом на основе карбида кремния и окиси цинка. Для металлизации керамики используются пленки Cr/Cu, Cr/Ag, Cr/Au, Ag, InGa/Ag, Ti/Cu, NiCr/Cu, Al/Cu и др. Реализация высоких скоростей осаждения пленок с помощью магнетронной системы распыления с хорошей адгезией и равномерностью по толщине обеспечивает качественное покрытие шероховатых керамических поверхностей. Кроме того, вследствие небольшого теплового воздействия на подложку можно металлизировать пьезокерамику, температура которой во избежание растрескивания не должна превышать 390 К [65].

С помощью ВЧ магнетронного распыления получены толстые аморфные пленки бериллия, используемые при изготовлении полых сферических мишеней для лазерной плавки. При распылении в чистом аргоне при температуре стеклянной подложки более 470 К осаждаются кристаллические пленки бериллия, обладающие крупнозернистой структурой и неровной поверхностью. Добавка 1—2% азота и кислорода делает поверхность пленки более гладкой. При больших добавках примеси газов (от 5 до 20%) образуются гладкие аморфные пленки с высотой микронеровностей 160 нм при толщине пленки до 18 мкм. При осаждении бериллия на медную подложку при температуре 290 К и концентрации азота (или кислорода) 5% и более получены очень гладкие аморфные пленки с высотой микронеровностей до 36 нм. Магнетронное распыление позволяет получать плотные гладкие пленки бериллия толщиной 5—50 мкм с высотой микронеровностей на поверхности менее 100 нм [66].

Получение резистивных пленок. В производстве балластных сопротивлений для мощных полупроводниковых приборов, а также элементов памяти широко используется нихром. Распыление мишеней состава 60% Ni + 40% Cr с помощью магнетронной распылительной системы обеспечивает постоянство состава пленки, ее стабильность, минимальное изменение удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления. Контроль удельного сопротивления пленки можно вести с помощью резистивного датчика или кварцевого измерителя толщины, причем в последнем случае возможны полная автоматизация процесса и обеспечение воспроизводимости удельного сопротивления от цикла к циклу в пределах $\pm 11,5\%$. Распылением танталовой мишени в среде азота получены резисторы на основе нитридов тантала для гибридных ИС. При мощности 2 кВт в смеси 20% N_2 + 80% Ar скорость осаждения пленки превышала 6 нм/с, что более чем на порядок выше, чем в триодной системе, широко ис-

пользуемой для получения пленок нитридов. В то же время воспроизводимость параметров пленок и их стабильность выше при магнетронном методе. Процесс получения пленок тантала с помощью магнетронной системы распыления менее чувствителен к наличию активных газов в камере, что дает возможность получения пленок β -тантала при парциальном давлении азота более $2,7 \cdot 10^{-3}$ Па [42].

Магнитные пленки. Первоначально считалось, что магнитные материалы не могут эффективно распыляться в магнетронных системах из-за экранирования мишенью магнитного поля. В последнее время благодаря разработке мишеней специальной конструкции или использованию достаточно тонких мишеней получены высококачественные магнитные пленки ряда материалов, в частности аморфные магнитные пленки сплава $\text{Co}_{16}\text{Co}_{38}\text{Cu}_{47}$ для элементов памяти, причем состав пленки соответствовал составу мишени с точностью 0,5%, а характеристики пленки можно было изменять, управляя током разряда, рабочим давлением и потенциалом смещения на подложке (до 200 В). Скорость осаждения на расстоянии 150 мм при давлении аргона 1 Па достигала 2 нм/с [67].

Для получения высококачественных пленок пермаллоя необходимо, чтобы пленка не нагревалась выше 470 К. Это ограничивает применение ВЧ распыления, а плохая адгезия пленки, получаемой термическим испарением, требует подложки и введения специальных добавок в пленку. В магнетронных системах удастся получать пленки пермаллоя при низких температурах с хорошей адгезией и удельным сопротивлением 30—40 мкОм·см (при толщине 0,3 мкм) при распылении тонкой (менее 0,8 мм) мишени состава 81% Ni + 19% Fe [68].

Высококачественные сверхпроводящие пленки Nb_3Sn с температурой перехода 18,3 К получены распылением мишени идентичного состава при температуре подложки 1070 К, давлении 5 Па и скорости осаждения до 7 нм/с на расстоянии 75 мм от мишени [69]. При получении сверхпроводящих пленок ниобия и сплавов сложного состава для криотронных запоминающих устройств на основе эффекта Джозефсона магнетронные системы наиболее предпочтительны системам химического осаждения из паровой фазы и электронно-лучевого испарения. С помощью магнетронных систем получены сверхпроводящие ЗУ — распылением ниобия с последующим его окислением [70] — и возможно получение пленок Nb_3Ge .

Получение диэлектрических пленок. Бездефектные пленки SiO_2 , имеющие хорошую плотность и гладкую поверхность, получены при распылении кварца в смеси аргона и кислорода. Скорость осаждения при мощности 1,8 кВт составляла 1,2 нм/с, что сравнимо с химическим осаждением из паровой фазы. Поверхность пленок даже при толщине 15 мкм была гладкая, и пленки не имели внутренних напряжений. Диэлектрическая постоянная таких пленок близка к значению, характерному для термически выращенных пленок, а диэлектрическая прочность составляла 70—60% их прочности. Анализ вольт-фарадных характеристик конденсаторов на основе выращенных пленок показал, что при стабильном разряде и хорошем заземлении системы сдвиг тестовых характеристик не превышает 3,5 В. Кроме того, пленки SiO_2 , осажденные поверх алюминиевой металлизации, имеющей окна с вертикальными стенками, имеют хорошую равномерность по всему ступенчатому профилю [71].

Были получены также аморфные пассивирующие пленки Al_2O_3 распылением мишени того же состава, причем пленки имели хорошую адгезию вплоть до толщин 8 мкм, обладали высокой травимостью в обычных травителях и достаточной пропускной способностью по отношению к оптическим длинам волн, а также ультрафиолетовому и инфракрасному излучению. Диэлектрическая постоянная составила 9,96, удельное сопротивление — 10^{12} Ом·см, плотность — 2,97 г/см³. Ступенчатые профили довольно равномерно покрываются пленкой, трещины отсутствуют. Скорость осаждения достигала 6 нм/с на расстоянии 70 мм при удельной мощности на мишени 7 Вт/см². Исследования вольт-фарадных характеристик и плотности дефектов показывают, что такие пленки могут использоваться в производстве МОП-структур [72].

Получение оптических покрытий. Магнетронные системы распыления позволяют наносить пленки с высокой равномерностью по толщине на больших площадях. Например, на основе однослойных пленок алюминия получены зеркала, отражательная способность которых в видимой части спектра выше, чем у луч-

ших образцов, полученных методом испарения в высоком вакууме. Изготовлены также отражатели с переменным коэффициентом отражения: в качестве материала с низким коэффициентом отражения использовалась SiO_2 , получаемая с помощью ВЧ магнетронной системы, а с высоким коэффициентом отражения — TiO_2 , наносимая реактивным распылением в магнетронной системе на постоянном токе в смеси 85% $\text{Ar} + 15\% \text{O}_2$. Скорости осаждения были 2 и 0,4 нм/с соответственно. Отражательная способность достигала 96% [73].

Широкое применение в настоящее время получили пленки на основе SnO_2 и In_2O_3 , позволяющие получать проводящие прозрачные электроды, которые используются в дисплеях на жидких кристаллах, электролюминесцентных и газоразрядных приборах, а также в качестве покрытий панелей прецизионных измерительных приборов, окон видиконных трубок и других поверхностей, на которых нежелательно скопление зарядов. Эти пленки могут быть получены с помощью магнетронной распылительной системы двумя способами: распылением мишени состава $\text{In}_2\text{O}_3 + 9\% \text{SnO}_2$ [35] или реактивным распылением в среде кислорода мишени состава 90% $\text{In} + 10\% \text{Sn}$ [74]. При первом способе можно вести процесс как с использованием ВЧ напряжения, так и на постоянном токе. Отсутствие радиационного воздействия и перегрева подложек позволяет избежать разрушения пленок и получить низкие удельные сопротивления (220 мкОм·см). Разряд зажигается сначала на ВЧ при давлении аргона 0,7 Па, а после 2 мин. распыление можно вести на постоянном токе при давлении 0,3 Па, напряжении 500 В и токе 0,35 А. Пленки имеют хорошие электрофизические свойства и в 3 раза лучше травятся, чем пленки, полученные в обычной диодной системе. При втором способе распыление идет на постоянном токе, причем большое влияние на свойства пленок оказывает степень окисления, зависящая от температуры подложек и парциального давления кислорода. Распыление проводится при напряжении 500 В, рабочем давлении 0,8 Па (при парциальном давлении кислорода 0,06 Па), токе разряда до 0,5 А (при больших токах плавится мишень). Исследования показали, что качество получаемых пленок выше, чем при использовании других методов нанесения, причем можно осаждать пленки на такие чувствительные к нагреву материалы, как, например, майларовая пленка толщиной 25 мкм и пластики толщиной от 6 мкм до 6 мм.

Были проведены также исследования по получению пленок вышеуказанного состава ВЧ распылением при подаче на подложку потенциала смещения. Потенциал смещения оказывал существенное влияние на электрофизические свойства пленок. Пленки толщиной 80 нм с минимальным удельным сопротивлением 0,03 Ом·см получены при отрицательном потенциале смещения на подложке 160 В в смеси 30% $\text{O}_2 + 70\% \text{Ar}$ [75].

С использованием магнетронных распылительных систем могут быть более эффективно реализованы известные методы осаждения пленок.

Распыление с потенциалом смещения на подложке [67, 75]. С помощью смещения можно эффективно изменять характеристики получаемых пленок, причем напряжения в несколько вольт достаточно, чтобы плотность ионного тока на подложке составила 10 мА/см². При этом среди конденсирующихся на подложку частиц содержится от 5 до 40% ионов (для меди 4—6, для алюминия 10—15, для хрома 20—40%). С уменьшением рабочего давления процентное содержание ионов увеличивается. По достижении тока насыщения количество ионов на подложке при дальнейшем увеличении смещения почти не меняется, но растет их энергия, что и открывает возможности управления свойствами пленок. Однако при подаче смещения возрастают термические нагрузки на подложку (например, при смещении 300 В тепловая нагрузка на подложку увеличивается почти в 2 раза при нанесении пленки меди).

Реактивным распылением с помощью магнетронной распылительной системы можно получать нитриды, оксиды, карбиды, сульфиды, селениды и другие соединения таких материалов, как Al, Ti, Ta, Sn, In, Nb, Zr, V. Основной проблемой реактивного распыления является подавление электрических дуг, возникающих при пробое пленки диэлектрика, образующейся на поверхности мишени. Устранение дуг производится благодаря достижению высоких скоростей распыления, при которых изолирующий слой не успевает покрыть всю мишень, и использованию переменного напряжения, частота которого выбирается в зависимости от толщины пленки диэлектрика и ее диэлектрической проницаемости: чем

толще пленка и меньше диэлектрическая проницаемость материала, тем больше должна быть частота приложенного напряжения. Причиной пробоя диэлектрической пленки являются заряды, скапливающиеся на ее поверхности. При использовании переменного напряжения эти заряды компенсируются и пробоя пленки не происходит. В зависимости от материала диапазон частот переменного напряжения — от 400 Гц до 60 кГц, что не требует устройств согласования источников с нагрузкой.

Методом реактивного распыления меди в среде H_2S получены пленки полупроводникового соединения CuS [76], используемые в производстве фотоэлементов и солнечных батарей. Свойства пленок зависели от содержания серы, на которые оказывают влияние температура подложки и концентрация H_2S в рабочей смеси. Были получены два типа пленок — с высоким (100 Ом·см) и низким (0,01 Ом·см) удельным сопротивлением.

С помощью цилиндрической магнетронной распылительной системы созданы элементы солнечных батарей, характеризующиеся поглощающей способностью до 93% и излучающей способностью 2—4% при 300 К. Осаждение пленок карбидов или нитридов железа, хрома, никеля, молибдена, титана для этих элементов осуществлялось в среде C_2H_2 или SiH_4 . Покрытия с подслоем меди наносились на стеклянные трубки длиной до 1,5 м. Распылительная система представляла собой два центральных трубчатых катода (круглого или прямоугольного сечения, один медный, другой из металла покрытия), разделенных экраном и размещенных в камере длиной 2,5 м и диаметром 30 см. Подложки устанавливались на специальной карусели вокруг катодов (20 стеклянных трубок диаметром 22—30 мм или 10 трубок диаметром 50 мм) и вращались вокруг катодов и собственной оси. При получении пленки карбида железа использовался катод из нержавеющей стали. Вначале наносился адгезионный подслоя нержавеющей стали (40 нм), затем слой меди (320 нм) с высокой отражающей способностью, а потом реактивным распылением — пленка карбида нержавеющей стали (95 нм), причем напуск C_2H_2 постепенно увеличивали от 0 до 2,8 см³/с, создавая переход от чистой нержавеющей стали до диэлектрического карбида. Регулируя поток реактивного газа, можно получать многослойные поглощающие покрытия, которые обладают большей поглощающей способностью. Однако они менее стабильны. Эксперименты показали, что с помощью МРС можно получать качественные покрытия для элементов солнечных батарей с высокой стабильностью при повышенных температурах [77].

Метод ионно-термического осаждения. В [78] предложен метод так называемого переменного ионно-термического осаждения, когда на подложку направляется поток то нейтральных атомов, то ионов, что, по мнению авторов, позволяет получать пленки, в которых чередуются соответствующие слои, а также создавать на определенной глубине зарядовый слой. Магнетронная система считается наиболее подходящим ионизирующим устройством для этих целей. Эксперименты показали, что пленки, сформированные указанным способом, обладают лучшей отражательной способностью, более высокой коррозионной стойкостью и меньшей пористостью, чем пленки, полученные термическим испарением и обычным ионно-термическим осаждением.

Распыление материалов из жидкой фазы. По теоретическим расчетам, подтвержденным экспериментальными исследованиями, процесс ионного распыления происходит в приповерхностном слое металла толщиной 0,3—0,8 нм, и на него в диодной распылительной системе затрачивается менее 3% подводимой энергии. Остальная энергия переходит в основном в тепло, вследствие чего приходится интенсивнее охлаждать мишень. Аналогично обстоит дело и в магнетронных распылительных системах. Для материала в твердом состоянии максимально допустимая скорость распыления ограничивается его теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности у многих чистых металлов скачкообразно изменяет свою величину вблизи точки плавления, и в расплавленном состоянии к мишени можно подводить большие мощности, тем самым увеличивая скорость распыления. Более того, при повышении температуры расплава начинается процесс испарения. Таким образом, энергию, которая при распылении из твердой фазы теряется в виде тепла, можно использовать на дополнительную генерацию вещества его испарением, объединив процессы ионного распыления и термического испарения в единый распылительно-испарительный процесс.

Для осуществления этого процесса между плоским тиглем, изготовленным из тугоплавкого немагнитного материала, и водоохлаждаемой магнитной системой делают небольшой (2—3 мм) зазор, препятствующий отводу тепла от тигля в процессе расплытия мишени, которую помещают в тигель (рис. 48). Рабочий объем откачивают, затем напускают аргон, и между тиглем (выполняющим роль мишени) и анодом прикладывают напряжение, постепенно увеличивая плотность тока на мишени до такой величины, при которой начинается интенсивное расплавление находящегося в тигле материала. При определенной плотности

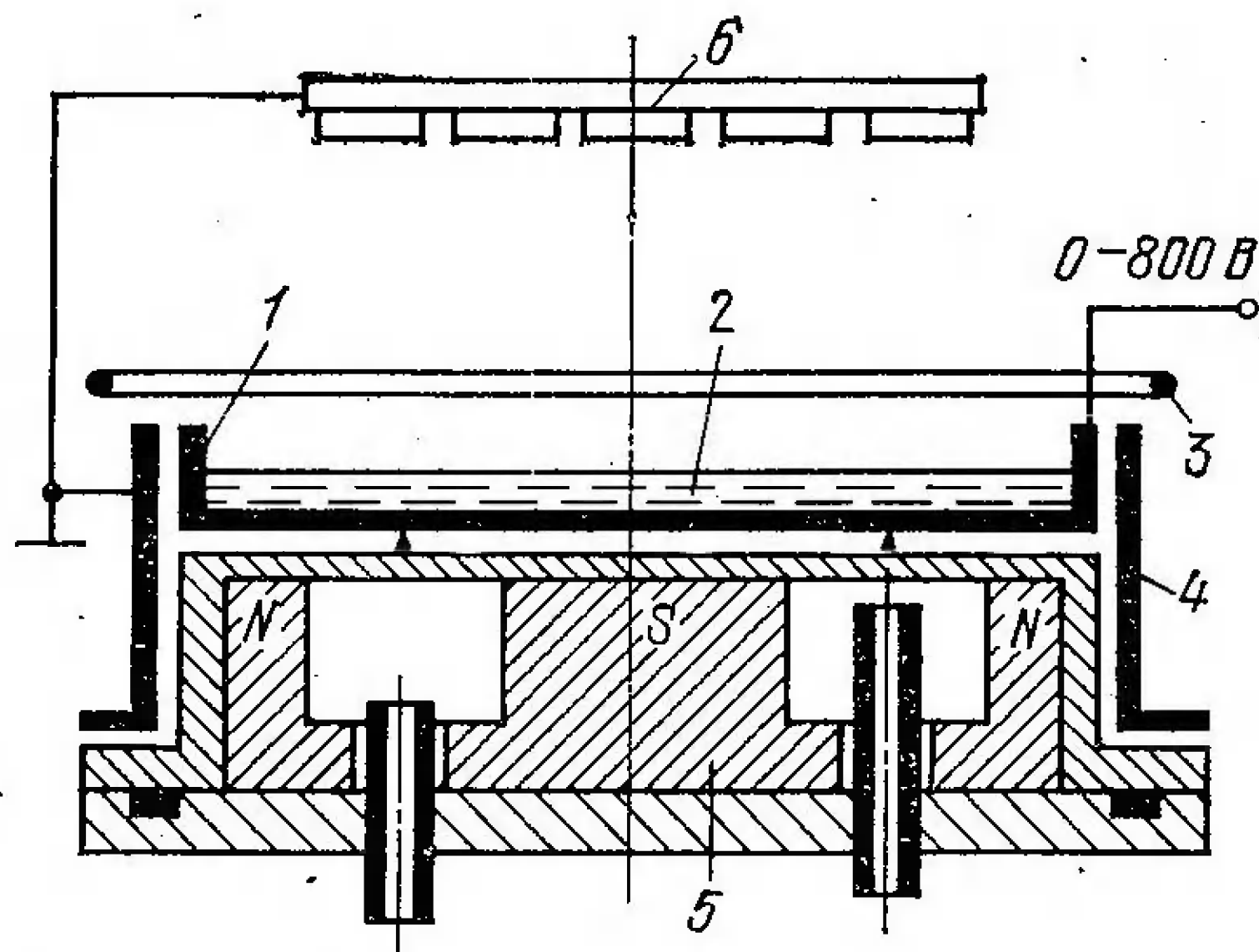


Рис. 48. Схема устройства для расплытия материалов из жидкой фазы:

1 — тигель; 2 — расплавленная мишень; 3 — анод; 4 — экран; 5 — магнитная система; 6 — подложкодержатель

тока начинается интенсивное испарение материала из расплава, причем при достижении высокой упругости паров расплаваемого материала (например, для меди при 1430°C давление паров составляет 13 Па) начинается процесс самораспыления. Тогда можно прекратить напуск аргона, что существенно снизит загрязнение пленки остаточными газами. Помимо высокой эффективности использования энергии распылительно-испарительная система позволяет достичь высоких скоростей осаждения, причем тенденция к фракционированию при расплытии сплавов выражена значительно слабее, чем при обычном термическом испарении. Так, при мощности источника питания 1,5 кВт, плотности мощности на мишени 40 Вт/см^2 , плотности ионного тока 70 мА/см^2 и расстоянии между мишенью и подложкой 50 мм скорость осаждения меди составляла 80 нм/с [79]. С увеличением мощности повышается скорость осаждения, и предельно допустимая мощность определяется током термоэмиссии из расплава, при котором разряд переходит в дугу.

На рис. 49 показано характерное изменение напряжения и тока разряда при постоянной мощности источника питания. После зажигания разряда по мере разогрева мишени ток резко падает, а напряжение возрастает вследствие уменьшения коэффициента расплытия, поскольку при температуре, близкой к точке плавления, расплаваемая поверхность становится однородной и плоской, возрастают межатомные связи, что и приводит к уменьшению коэффициента расплытия примерно в 1,5 раза [80]. После начала плавления мишени происхо-

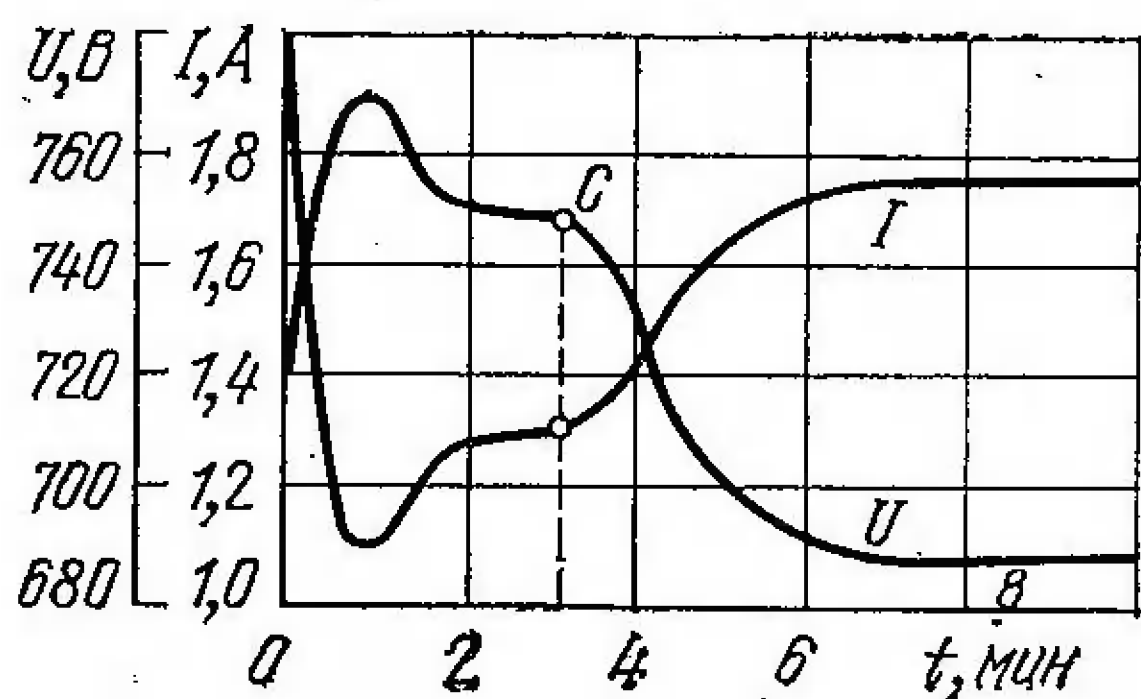


Рис. 49. Изменение напряжения и тока разряда во времени. Точка С соответствует началу плавления мишени

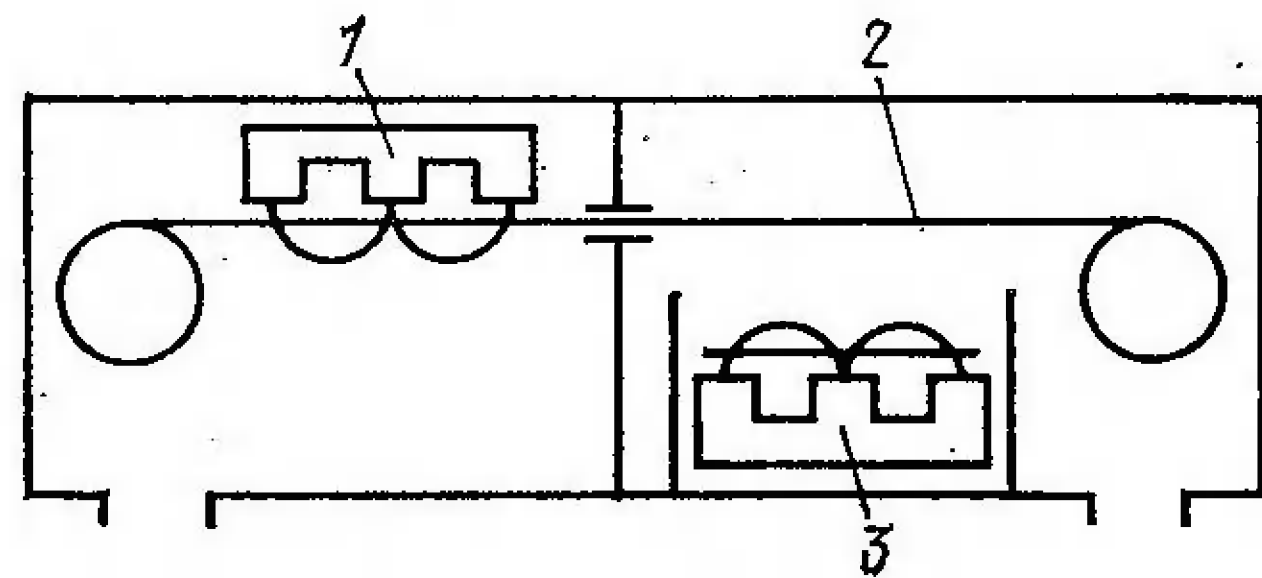


Рис. 50. Схема установки для нанесения покрытий с предварительной очисткой подложек:

1 — магнетронная система очистки; 2 — металлическая лента; 3 — магнетронная система нанесения пленки

ит обратный процесс: ток резко возрастает за счет дополнительной ионизации паров распыляемого материала и увеличения тока термоэмиссии из расплава и достигает насыщения после установления равновесной температуры в соответствии с подводимой мощностью, а напряжение уменьшается. При этом разряд стабильно горит при давлении 10^{-2} Па, т. е. на порядок более низком, чем при распылении из твердой фазы. При указанных выше условиях материал мишени под действием интенсивной ионной бомбардировки в течение 5—10 мин переходил в жидкое состояние, причем сначала плавилась зона локализации плазмы, затем центральная часть мишени и, наконец, краевая ее область.

Эксперименты показали, что на подложку кроме распыленных и испаренных атомов поступают также ионы. Это указывает на возможность реализации процессов распыления с потенциалом смещения на подложке и получения ионного покрытия. Например, подача на подложку отрицательного потенциала в 100 В позволяет вытянуть на нее поток ионов, составляющий 25% разрядного тока [81], что позволяет улучшить адгезию и другие характеристики пленок.

Традиционный вопрос — какому методу отдать предпочтение: термовакuumному испарению или распылению — сегодня уже не стоит на повестке дня. Созданный на основе магнетронной распылительной системы распылительно-испарительный процесс органически соединяет в себе достоинства испарения и распыления и вместе с тем свободен от многих присущих каждому методу в отдельности недостатков. Он обеспечивает скорость осаждения меди до 170 нм/с, а это свидетельствует о его пригодности для осаждения СВЧ микрополосковых линий, изготовления печатных плат и других изделий, где требуются высокие скорости осаждения и сравнительно большие толщины пленок. С помощью распылительно-испарительного процесса можно осаждать пленки толщиной 500 мкм без дефектов и термических напряжений.

Кроме того, МРС может применяться для очистки металлических поверхностей от загрязнений перед нанесением покрытия (рис. 50). При этом эффективность очистки по сравнению с диодной системой увеличивается в 3 раза, а требуемая мощность снижается в 7 раз [82].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плазменные ускорители/Под общей редакцией Л. А. Арцимовича. — М.: Машиностроение, 1973. — 256 с.
2. Карвалишвили Н. А., Жаринов А. В. Характеристики разряда низкого давления в поперечном магнитном поле. — ЖТФ, 1965, т. 35, № 12, с. 2194.
3. Саночкин Ю. В. Неустойчивость разряда низкого давления с замкнутым Холловским дрейфом. — ЖТФ, 1975, т. 45, № 3, с. 555—562.
4. Калашников В. И., Саночкин Ю. В. О структуре анодного электрического слоя в самостоятельном разряде с замкнутым дрейфом электронов. — Журнал прикладной механики и технической физики, 1976, № 2, с. 9—16.
5. Wasa K., Hayakawa S. Some features of magnetron sputtering. — Thin Solid Films, 1978, vol. 52, N 1, p. 31—43.
6. Данилин Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование разряда в магнетронных системах ионного распыления. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1977, вып. 3 (69), с. 37—44.
7. Данилин Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование магнетронных систем ионного распыления материалов. — Физика и химия обработки материалов, 1978, вып. 2, с. 33—39.
8. Данилин Б. С., Сырчин В. К., Тимофеев П. А. Исследование равномерности нанесения тонкопленочных слоев в магнетронных системах ионного распыления материалов. — Физика и химия обработки материалов, 1979, вып. 3, с. 108—112.
9. Thornton J. A. Magnetron sputtering: basic physics and application to cylindrical magnetrons. — J. Vac. Sci. Technol., 1978, vol. 15, N 2, p. 171.
10. Данилин Б. С., Мотузенко В. Получение пленок методом ионного покрытия. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, вып. 2, с. 37—62.

11. Блинов И. Г., Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Вакуумно-технические проблемы осаждения пленок в производстве ИС и пути их промышленной реализации. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1979, вып. 3, с. 51.
12. Данилин Б. С. Получение тонкопленочных слоев с помощью магнетронной системы ионного распыления. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, вып. 4, с. 87—105.
13. Kay E. Magnetic field effects on an abnormal truncated glow discharge and their relation to sputtered thin film growth. — J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, N 4, p. 760—768.
14. Thornton J. A. Recent developments in sputtering — Magnetron sputtering. — Metal Finishing, 1979, vol. 77, N 5, p. 83—87.
15. Van Vorous T. Planar magnetron sputtering: a new industrial coating technique. — Solid State Technol., 1976, vol. 19, N 12, p. 62—66.
16. Wilson R. W., Terry L. E. Application of high-rate E×B or magnetron sputtering in the metallization of semiconductor devices. — J. Vac. Sci. Technol., 1976, vol. 13, N 1, p. 157—164.
17. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. — М.: Высшая школа, 1967. — с. 318.
18. Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы. — М.: Мир, 1975, — с. 13.
19. Christophorou L. G. Atomic and molecular radiation physics. — N. Y.: Wiley-Interscience, 1971. — 35 p.
20. Green F. A., Chapman B. N. Electron effects in magnetron sputtering. — J. Vac. Sci. Technol., 1976, vol. 13, N 1, p. 165—168.
21. Thornton J. A. End-effects in cylindrical magnetron sputtering sources. — J. Vac. Sci. Technol., 1979, vol. 16, N 1, p. 79, 80.
22. Арефьев В. И. Низкочастотные неустойчивости разряда в скрещенных E-, H-полях. — ЖТФ, 1977, т. 47, № 3, с. 546—550.
23. Soxman E. J. Current-voltage relationships for an inverted magnetron type d. c. sputtering source: Au, Pt, Cu, Al and Ag with argon pressure as a parameter. — Proc. 7-th Int. Vac Congr. and 3-rd Int. Conf. Solid Surfaces, Vienna, 1977, p. 309—312.
24. Wasa K., Hayakawa S. Sputtering in crossed electromagnetic field. — IEEE Trans. on parts, mater. and pack., 1967, vol. 3, N 3, p. 70—76.
25. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Сырчин В. И. Энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов и систем для его реализации. — Физика и химия обработки материалов, 1979, № 2, с. 52—56.
26. Sigmund P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets. — Physical Review, 1969, vol. 184, N 2, p. 383—416.
27. Данилин Б. С., Качурин Ю. Е., Логунов В. И. Использование измерителей ВЧ мощности, применяемых в технике коротковолновой связи, для контроля процесса ВЧ ионного распыления. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1973, вып. 1, с. 82.
28. Lamont L. T., Turner F. T. The role of DC self-bias potential in the control of RF sputtering. — J. Vac. Sci. Technol., 1974, vol. 11, N 1, p. 47.
29. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Неволин В. К. Выбор оптимального давления рабочего газа и межэлектродного расстояния в диодных системах ионного распыления и травления. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1976, вып. 2 (62), с. 37—42.
30. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Расчет скорости ионного травления. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1974, вып. 4 (52), с. 35—37.
31. Hosokawa N., Tsukada T., Misumi T. Self-sputtering phenomena in high-rate coaxial cylindrical magnetron sputtering. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, vol. 14, N 1, p. 143—146.
32. Данилин Б. С., Сырчин В. И., Тимофеев П. А. Исследование равномерности нанесения тонкопленочных слоев в магнетронных системах ионного распыления материалов. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, вып. 1 (73), с. 26—32.
33. Tsukada T., Hosokawa N., Kobayashi H. Increase of substrate temperature in high rate coaxial cylindrical magnetron sputtering. — Jap. J. Appl. Phys., 1978, vol. 17, N 5, p. 787—796.

34. Mullaly J. R. Crossed field discharge device for high rate sputtering. — Research/Devel., 1971, vol. 22, N 2, p. 40—44.
35. Fraser D. B., Cook H. D. Film deposition with the sputter gun. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, vol. 14, N 1, p. 147—151.
36. Model S-500 Sputter gun. — Vacuum, 1975, vol. 25, N 5, p. 214.
37. Appareils de sputtering cathode magnetron. — Le vide, 1976, vol. 30, N 179, p. 1—64.
38. Орлов В. И. Применение ионно-плазменных процессов в производстве изделий электронной техники. — Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование, 1979, вып. 11 (671). — 44 с.
39. Минайчев В. Е., Одинокое В. В., Тюфаева Г. П. Магнетронные распылительные устройства (магнетроны). — Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование, 1979, вып. 8, 56 с.
40. Aronson A. J. Magnetron sputtering using the moving deposition mode. — NTG-Fachber, 1977, vol. 60, september 28, p. 20—25.
41. Class W. H. Deposition and characterization of magnetron sputtered aluminum and aluminum alloy films. — Solid State Technol., 1979, vol. 22, N 6, p. 61—68.
42. Joly J., Ranger J.-B. The use of magnetron sputtering for hybrid integrated circuits manufacturing. — NTG-Fachber, 1977, vol. 60, september 28, p. 15—19.
43. Shirn G. A., Patterson W. I. Vacuum systems for sputtering. — J. Vac. Sci. Technol., 1970, vol. 7, N 3, p. 453—456.
44. Lamont L. T. Some special pumping problems associated with the sputtering application. — J. Vac. Sci. Technol., 1973, vol. 10, N 1, p. 251.
45. Данилин Б. С. Вакуумная техника в производстве интегральных схем. — М.: Энергия, 1972. — 254 с.
46. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. О рациональном использовании откачных средств для установок ионного распыления и травления материалов. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1974, вып. 3 (51), с. 90—99.
47. Hofmann V. New orifice plate offers high film parity for thin film sputtering. — Electron. Pack. and Prod, 1973, vol. 13, N 1, p. 81.
48. O'Hanlon J. F. Turbomolecular pumps for high gas flow applications. — J. Vac. Sci. Technol., 1979, vol. 16, N 2, p. 724—727.
49. Dennison R. W., Gray G. R. Cryogenic versus turbomolecular pumping in a sputtering application. — J. Vac. Sci. Technol., 1979, vol. 16, N 2, p. 728—730.
50. Visser S., Scheer J. J. Twenty-kelvin cryopumping in magnetron sputtering systems. — J. Vac. Sci. Technol., 1979, vol. 16, N 2, p. 734—737.
51. Данилин Б. С., Минайчев В. Е., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. — Электронная промышленность, 1976, вып. 5 (53), с. 42—45.
52. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные системы ионного распыления материалов. — ПТЭ, 1978, № 4, с. 7—19.
53. McLeod P. S., Hughes J. L. Effects of sputter etching and process techniques on the properties of sputtered aluminum films. — J. Vac. Sci. Technol., 1979, vol. 16, N 2, p. 369—376.
54. Nowicki R. S. Influence of residual gases on the properties of dc magnetron-sputtered aluminum-silicon. — J. Vac. Sci. Technol., 1980, vol. 17, N 1, p. 384—387.
55. Maniv S., Westwood W. Discharge character for magnetron sputtering of Al on Ar and Ar/O₂ mixtures. — J. Vacuum Sci. Technol., 1980, vol. 17, N 3, p. 743—751.
56. Maniv S., Westwood W. Effect of H₂ on an argon discharge for planar magnetron sputtering. — J. Vac. Sci. Technol., 1980, vol. 17, N 1, p. 403—406.
57. Экспериментальное исследование пленок алюминия, осажденных в магнетронной системе ионного распыления/А. Ф. Андрушко, Б. С. Данилин, В. Е. Минайчев, В. П. Мотузенко, В. К. Сырчин. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1978, вып. 3 (75), с. 93—96.
58. Нанесение алюминиевых пленок на рельефные подложки в магнетронной системе распыления/Б. С. Данилин, В. Е. Минайчев, В. В. Одинокое, В. К. Сырчин — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1976, вып. 5 (65), с. 127—128.

59. Why CTC deposits Al/Si/Cu with varian S-gun sources. — Solid State Technol., 1976, vol. 19, N 12, p. 26, N 4, p. 13.
60. Denison D. R., Hartsough L. D. Summary abstract: copper distribution in sputtered Al/Cu films. — J. Vac. Sci Technol., 1980, vol. 17, N 1, p. 388.
61. Aronson A. J. Continuous deposition of chrome-gold and chrom-copper utilizing combined conventional R. F. diode and high rate planar magnetron. — Le vide, 1976, N 182, p. 176—179.
62. Hoffman D. W., Thornton J. A. Compressive stress and inert gas in Mo films sputtered from a cylindrical-post magnetron with Ne, Ar, Kr and Xe. — J. Vac. Sci. Technol., 1980, vol. 17, N 1, p. 380—383.
63. Hill M. Magnetron sputtered titanium-tungsten films. — Solid state Technol., 1980, vol. 23, N 1, p. 53—59.
64. Hoffman D. W., Thornton J. A. Internal stresses in sputtered chromium. — Thin Solid Films, 1977, vol. 40, p. 355—363.
65. Schiller S., Heisig U., Steinfeld R. et al. Metallization of ceramics for electronic components by magnetron-plasmatron coating. — Thin Solid Films, 1980, vol. 72, N 2, p. 312—326.
66. Burt R. J., Meyer S. F., Hsieh E. J. Radio frequency magnetron sputtering of thick film amorphous beryllium. — J. Vac. Sci. Technol., 1980, vol. 17, N 1, p. 407—410.
67. Albert P. A., Guarnieri C. R. Influence of biased magnetron deposition parameters on amorphous Gd-Co-Cu properties. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, vol. 14, N 1, p. 138—140.
68. Ni-Fe film deposited by sputter gun and applications to bubble devices/L. J. Tao, K. Y. Ahn, B. J. Lin, W. W. Molzen — Thin Solid Films, 1976, vol. 37, N 3, p. 423—427.
69. Wu C. T., Kampwirth R. T., Hafstrom J. W. High rate magnetron sputtering of high T_c Nb₃Sn films. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, vol. 14, N 1, p. 134.
70. Hansma P. K. A new method for fabricating niobium oxide barrier Josephson junctions. — J. Appl. Phys., 1974, vol. 45, N 3, p. 1472—1473.
71. Urbanek K. Magnetron sputtering of SiO₂ an alternative to chemical vapor deposition. — Solid State Technol., 1977, vol. 20, N 4, p. 87—90.
72. Nowicki R. S. Properties of rf-sputtered Al₂O₃ films deposited by planar magnetron. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, vol. 14, N 1, p. 127—133.
73. Hartsough L. D., McLeod P. S. High-rate sputtering of enhanced aluminum mirrors. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, Vol. 14, N 1, p. 123—126.
74. Clarke P. J. Magnetron dc reactive sputtering of titanium nitride and indium — tin oxide. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, vol. 14, N 1, p. 141, 142.
75. Reactive ion plating of metal oxides onto insulating substrates/R. P. Howson, J. N. Avaritsiotis, M. J. Ridge, C. A. Bishop — Thin Solid Films, 1979, vol. 58, p. 379—384.
76. Copper sulfid films deposited by cylindrical magnetron reactive sputtering/A. D. Jonath, W. W. Anderson, J. A. Thornton, D. G. Cornog. — J. Vac. Sci. Technol., 1979, vol. 16, N 2, p. 200—203.
77. Harding G. L., Window B. Graded metal carbide solar selective surfaces coated onto glass tubes by a magnetron sputtered system. — J. Vac. Sci. Technol., 1979, vol. 16, N 6, p. 2101—2104; 2105—2108.
78. Schiller S., Heisig U., Goedicke K. Alternating ion plating — a method of high-rate ion vapor deposition. — J. Vac. Sci. Technol., 1975, vol. 12, N 4, p. 858—864.
79. Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы/Б. С. Данилин, М. В. Какурин, В. Е. Минайчев, В. В. Одинокоев, В. К. Сырчин. — Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1978, вып. 2 (74), с. 84—87.
80. Windawi H. M. Effect of temperature on the sputtering yield of copper. — Surface Science, 1976, vol. 55, N 2, p. 573—588.
81. Schiller S., Heisig U., Goedicke K. Use of the ring gap plasmatron for high rate sputtering. — Thin Solid Films, 1977, vol. 40, p. 327—334.
82. Pretreatment of metallic substrates with the plasmatron/S. Schiller, U. Heisig, K. Steinfeld, K. Gehm — Thin Solid Films, 1978, vol. 51, p. 189—196.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	4
Глава первая. Развитие вакуумных методов получения тонкопленочных слоев	6
Глава вторая. Физические основы и методы расчета параметров магнетронных распылительных систем	10
Глава третья. Конструкции магнетронных распылительных систем	44
Глава четвертая. Применение магнетронных распылительных систем	60
Список литературы	69