УДК 539.235 002 5

Рассмотрены физические основы действия и конструктивные схемы магнетронных распылительных устройств (магратронов). Приведены основные сведения о технологических возможностях магратронов по нанесению тонких пленок. Описаны типичные конструкции установок для нанесения тонких пленок с использованием магратронов.

Использовано 87 отечественных и зарубежных источников (журнальные статьи, книги, патенты и др.) в основном за 1973—1979 гг.

Обзор предназначен для специалистов, занимающихся как конструированием технологического оборудования, так и изготовлением ИС и полупроводниковых приборов, может служить учебным пособием для студентов вузов по специальности «Полупроводниковое машиностроение».

Научный редактор

канд. техн. наук, профессор *И. Г. БЛИНОВ*

© ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «ЭЛЕКТРОНИКА», 1979

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 7 «Технология, организация производства и оборудование»

ВЫПУСК 8 (659)

МАГНЕТРОННЫЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА (МАГРАТРОНЫ)

(по данным отечественной и зарубежной печати за 1973—1979 гг.)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . 2
Физические основы магратронов . . . 4
Принцип действия . . . 4
Механизм разряда в магратроне . . . 5
Локализация плазмы в магратроне . . . 8
Токи в плазме магратрона . . . 10
Вольт-амперные характеристики . . . 12
Напряжение зажигания разряда . . . 14
Рабочие параметры магратронов . . . 14
Технологические аспекты . . . 16
Наносимые материалы . . . 16
Скорость осаждения . . . 17
Распределение толщины пленок . . . 22
Явления на подложке . . . 25
Адгезия пленок и распыление со смещением . . . 27
Распыление из жидкой фазы . . . 29
Конструкции магратронов . . . 30
Магратроны с цилиндрическим катодом . . . 30
Магратроны с коническим катодом . . . 32
Планарные магратроны . . . 34
Магратроны с подвижным магнитным полем . . . 36
Охлаждение мишеней в магратронах . . . 38
Установки с магнетронными распылительными устройствами . . . 39
Классификация . . . 39
Установки периодического действия . . . 40
Установки полунепрерывного действия . . . 45
Установки непрерывного действия . . . 47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . 51
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . 53

ЦНИИ «Электроника» 1979

Фунд. нен. Дворцовая библиотека
КАЗАНСКОГО
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
им. С. М. Кирова

ВВЕДЕНИЕ

Получение высококачественных и воспроизводимых по параметрам тонкопленочных слоев — один из базовых технологических процессов микроэлектроники, от совершенства которого во многом зависит качество изготовления ИС в целом. Поэтому совершенствование традиционных методов и разработка новых является актуальной задачей техники и технологии нанесения пленок.

Современные тенденции в выборе методов осаждения пленок с заданными свойствами основываются в первую очередь на показателях экономической эффективности и производительности, а также на возможности простого управления процессом и его автоматизации в производственных условиях. В соответствии с этим наиболее перспективным методом следует считать осаждение пленок, стимулируемое плазмой, или так называемое ионно-плазменное распыление.

Среди широкого класса устройств для генерации потока осаждаемых частиц на основе эрозии электродов в вакуумном разряде особое место занимают магнетронные распылительные устройства. В настоящее время они становятся основным технологическим инструментом для осаждения тонких пленок методом распыления материалов ионной бомбардировкой.

Дело в том, что наиболее распространенные и освоенные в тонкопленочной технологии микроэлектроники диодные системы ионного распыления (катодное распыление) характеризуются серьезными ограничивающими факторами, основными из которых являются: низкие скорости осаждения пленок (до 20—100 нм/с); бомбардировка подложек (структур) высокоэнергетическими вторичными электронами (до 3—5 кэВ); сравнительно высокое давление рабочих газов в процессе распыления (1—10 Па).

Появившиеся в последние годы магнетронные распылительные устройства, представляющие собой развитие диодной системы ионного распыления, устранили вышеперечисленные ограничения и подтвердили перспективность ионного распыления как промышленного и широкоуниверсального метода нанесения тонких пленок.

Физической основой принципа действия магнетронного распылительного устройства, как и диодной системы, является разновидность классического самостоятельного аномального тлеющего разряда в разреженном газе. Отличительная особенность магнетронных распылительных устройств состоит в наличии кольцеобразной замкнутой зоны скрещенных неоднородных электрических и магнитных полей, локализующих разрядную плазму в прикатодной области. Это принципиальное нововведение привело, по существу, к созданию нового типа устройств ионного распыления и позволило значительно превзойти технические параметры и расширить технологические возможности обычных диодных и других разновидностей распылительных систем, а именно:

— повысить в несколько десятков раз скорость осаждения материалов, приблизив ее к скорости термовакуумного осаждения;

— понизить на порядок рабочее давление, что резко уменьшает загрязнение пленок газовыми включениями;

— исключить интенсивную бомбардировку подложек высокоэнергетическими электронами, т. е. устранить неконтролируемый нагрев подложек и повреждение структур;

— обеспечить нанесение пленок алюминия и его сплавов с большими скоростями распыления.

Кроме того, такие устройства, обеспечивающие длительный ресурс работы, дают возможность создания установок полунепрерывного и непрерывного действия, удобных для эксплуатации в промышленных условиях.

Все это делает актуальным вопрос о внедрении и дальнейшем развитии техники и технологии нанесения пленок в производстве ИС с использованием магнетронных распылительных устройств.

Многие ведущие зарубежные фирмы создали и выпускают широкую гамму оборудования на основе магнетронных распылительных систем.

Магнетронные распылительные устройства по существу являются автономными источниками распыления материалов, и многие новые замечательные качества этого класса ионных распылительных устройств служат основательным поводом присвоить им особое название. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе наряду с наименованием их как «магнетронные распылительные устройства» используются менее удачные, по нашему мнению, наименования: «распылительные пушки», «плазмотроны», «магнетроны», «магнетронные источники», «системы с катодом Пеннинга», «источники высокоскоростного распыления», «распыление с дрейфующими электронами», «магнетронные системы ионного распыления (МСИР)» и др.

Все эти названия либо слабо отражают существо дела, либо являются очень длинными и поэтому неудобными для использования. Представляется целесообразным ввести сокращенное название магнетронного распылительного устройства в виде трехслогового термина «магратрон», как наиболее кратко и полно отражающего принцип его действия и назначение: слог «маг» сокращенно означает магнетронное, «ра» — распылительное, «трон» — электроразрядное устройство.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГРАТРОНОВ

Принцип действия

Несмотря на большое разнообразие модификаций магратронов, каждая из них в том или ином виде включает следующие основные конструктивные элементы: водоохлаждаемый катод, магнитный блок и анод. В качестве анода иногда используются стенки рабочей камеры. Для первоначального ознакомления с принципом действия магратрона воспользуемся схемой, упрощенно представляющей типичную конструкцию планарного магратрона (рис. 1). Эта схема лежит в основе и других модификаций [1, 2].

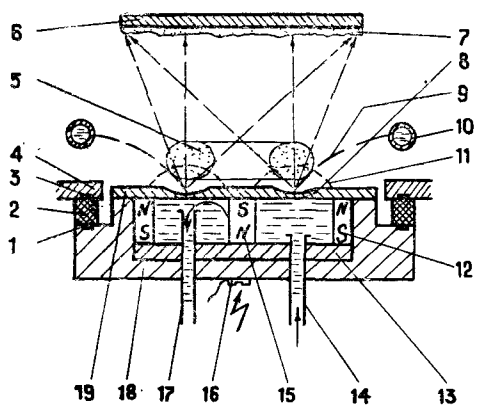


Рис. 1. Схема типичной конструкции планарного магратрона

Все конструктивные элементы магратрона монтируются в корпусе *18*, присоединяемом к рабочей камере через промежуточное изолирующее кольцо *2* и фланец *4* с вакуумными уплотнительными прокладками *1* и *3*. Дискообразная мишень — катод *19* охлаждается проточной водой по трубкам *14* и *17*. На катод подается напряжение порядка 300—1000 В через клемму *16*. Под катодом расположен магнитный блок, состоящий из центрального *15* и периферийных *12* постоянных магнитов, закрепленных на основании блока *13*, изготовленного из магнитомягкого материала. Магнитный блок создает над поверхностью катода дугообразное неоднородное магнитное поле *11* напряженностью в несколько сот эрстед. Над катодом расположен анод *10*, который может находиться либо

под потенциалом земли, либо под некоторым напряжением смещения (порядка 30—100 В). Такое расположение анода обеспечивает образование электрического поля *9* с составляющей, перпендикулярной к плоскости катода. При подаче отрицательного потенциала на катод в прикатодной области образуется зона со скрещенным неоднородным электромагнитным полем.

Появившиеся в этой зоне электроны совершают сложные движения под действием скрещенных полей, участвуя в многократных жестких (ионизирующих) столкновениях с молекулами газа. В результате этого над поверхностью катода возникает кольцеобразная (торообразная) зона плазмы *5*. Геометрия плазменного образования определяется формой неоднородного магнитного поля над поверхностью катода.

Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода, бомбардируют его поверхность в зоне эрозии *8*, выбивая из нее частицы материала. Покидающие поверхность мишени частицы осаждаются в виде пленки *7* на подложке *6*, а также частично рассеиваются на молекулах остаточных газов и осаждаются на стенках рабочей вакуумной камеры.

Плотность плазмы в разряде и интенсивность эрозии мишени максимальны в области, где магнитные силовые линии имеют направление, близкое к параллельному относительно поверхности катода.

При бомбардировке поверхности мишени ионами проявляются два основных эффекта: вторичная электронная эмиссия и ионное (катодное) распыление материала мишени. Вторичная эмиссия служит для поддержания разряда, а распыленные частицы формируют пленочный осадок на подложках. Такое устройство позволяет, в отличие от обычного диодного распылительного устройства, получать высокую плотность ионного тока, а значит, и высокие скорости распыления при относительно низких давлениях порядка 10^{-1} Па и ниже.

Данное схематическое описание принципа действия магратрона является весьма приближенным и грубым и, естественно, не отражает всего сложного комплекса многих взаимосвязанных процессов, происходящих в системе.

Механизм разряда в магратроне

В последние годы возник интерес к разрядам в скрещенном электрическом и магнитном полях как к технологическому инструменту. Если в конце 50-х годов такой разряд исследовался для целей термоядерного синтеза, то сейчас он представляет интерес как эффективный технологический инструмент для целей нанесения тонких пленок, травления

поверхностей и плазмохимии. Магратрон представляет собой одно из многочисленных устройств, работа которого основана на разрядах в скрещенных полях при пониженных давлениях. Причем магнитные поля имеют такую конфигурацию, при которой дрейфовые токи электронов в полях $\bar{E} \times \bar{B}$ замыкаются сами на себя [3]. Разряд в магратроне характеризуется тесной взаимосвязанностью параметров; здесь невозможно независимо изменять напряженность магнитного поля, давление газа, плотность тока и катодное падение потенциала.

При низком давлении разряд с холодным катодом поддерживается преимущественно за счет вторичных электронов, эмиттируемых с катода в результате ионной бомбардировки. Эти электроны ускоряются в темном катодном пространстве (ТКП), входят в плазму и, действуя как первичные электроны, производят достаточное количество ионов, которые в дальнейшем будут выбивать электроны из катода. Это требование может быть выражено зависимостью минимального потенциала, необходимого для поддержания такого разряда [4]:

$$U_{\text{мин}} = W_0 / n_{ei} \varepsilon_i \varepsilon_e, \qquad (1)$$

где n_{ei} — число вторичных электронов, приходящихся на один ион; W_0 — средняя энергия, необходимая для образования иона (~30 эВ/ион Ar); ε_i — коэффициент отбора ионов; ε_e — доля от общего количества ионов U/W_0, которая создается в среднем каждым первичным электроном, прежде чем он покинет систему.

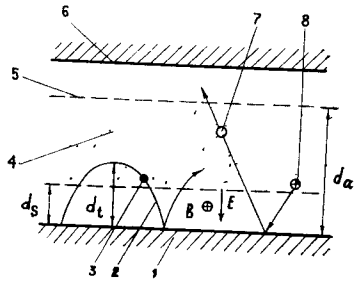


Рис. 2. Разрядный промежуток магратрона:

1 — катод; *2* — траектория вторичного электрона, *3* — электрон; *4*—плазма, *5* — виртуальный анод, *6* — анод; *7* — распыленная частица; *8* — ион

В общем случае расстояние до точки изменения направления скорости движения электрона d_t будет несколько превышать ширину ТКП d_s (рис. 2).

Для плоских катодов можно считать расстояние d_t приблизительно равным радиусу Лармора $r_л$:

$$r_л = 3{,}37 \cdot 10^{-6} W_e^{1/2} B, \qquad (2)$$

при условии, что скорость движения электрона $v_{\perp e}$ перпендикулярна к электрическому полю, $W_{\perp e}$ определяется падением напряжения в ТКП:

$$W_{\perp e} = \frac{m_e v_{\perp e}^2}{2}. \qquad (3)$$

Электроны эмиттируются катодом с энергией в несколько электрон-вольт и движутся по циклоидальным кривым, как показано на рис. 2.

Имеется большая вероятность обратного захвата электрона на катоде, поскольку длина свободного пробега электрона значительно больше длины траектории. Полагают, что вероятность обратного захвата снижается благодаря волновым процессам в плазме и может достигать значения 0,5.

Электроны, которые входят в плазму, попадают в магнитную ловушку и движутся по сложным циклоидальным траекториям, уже не возвращаясь на катод. Упругие столкновения в электрическом поле за пределами ТКП и колебания плазмы заставляют электроны мигрировать к аноду.

Анод в магратроне должен быть размещен по отношению к магнитному полю так, чтобы он не попал в зону, где электроны теряют свою энергию. Место анода определяется и тем фактором, что подвижность электронов параллельно магнитному полю ($\mu_{e\parallel}$) намного превышает подвижность электронов в направлении, перпендикулярном магнитному полю ($\mu_{e\perp}$), т. е. $\mu_{e\parallel} \gg \mu_{e\perp}$. Все электроны, достигшие расстояния d_a, захватываются анодом.

Разряд в магратроне характеризуется ярким свечением, которое распространяется на расстоянии около 2 d_t от катода. Эта область яркого свечения является основной зоной изменения энергии электронов.

Поскольку электроны могут покидать магнитные ловушки только после потери энергии, то $\varepsilon_e \approx 1$, и поскольку изменение первичной энергии происходит в прикатодной области, то $\varepsilon_i \approx 1$. Следовательно, разряды в магратроне очень эффективны при относительно низких напряжениях 300—600 В. (По уравнению (1) $W_0 \approx 80$ эВ/ион и $n_{ei} \approx 1/20$.) Высокие рабочие напряжения в обычных плоских диодных системах являются результатом низких значений ε_e и ε_i [3].

Стационарный режим горения разряда в магратроне устойчив (без погасания разряда) при следующих условиях:

$$\omega_e \tau_e \gg 1; \ \omega_i \tau_i < 1; \ R_i > L > R_e; \ \lambda_i > L, \qquad (4)$$

где R_i и R_e — соответственно циклотронные радиусы иона и электрона; L — характерный размер системы; λ_i — длина свободного пробега иона; ω_e и ω_i — циклотронная частота электрона и иона соответственно; τ_e и τ_i — среднее время столкновения.

В диодной распылительной системе соблюдается условие:

$$p_р > \lambda_e / L, \qquad (5)$$

где $p_р$ — рабочее давление; λ_e — длина свободного пробега электрона при давлении 1 Па.

В магратроне наличие скрещенных электрического поля и азимутально-однородного магнитного поля арочной конфигурации приводит к азимутальному дрейфу электронов и возникновению азимутального холловского тока j_φ, в $\omega_e\tau_e$ раз превышающего ток проводимости j_r в направлении электрического поля. Это позволяет вести процесс распыления при пониженном давлении по сравнению с диодной системой, так как в магратроне увеличивается время жизни электронов в объеме и повышается их ионизирующая способность.

Предположив, что использование поперечного поля эквивалентно повышению давления рабочего газа $p_р$, можно записать [5]:

$$p_р/p_0 \approx \{1+(\omega_e\tau_e)^2\}^{1/2} \qquad (6)$$

где p_0 — давление газа без магнитного поля.

Произведение $\omega_e\tau_e$, характеризующее степень замагниченности электронов, называется параметром Холла. Из выражения (6) видно, что магнитное поле эффективно при высоких значениях параметра Холла, т. е. когда выполняется условие $\omega_e\tau_e \gg 1$.

Поскольку $\omega_e = eB/m$, (7)

$$\tau_c = \lambda_0/p_0\ \{2(e/m)U_а\}^{1/2}, \qquad (8)$$

$$\text{то } \omega_e\tau_e = \frac{\lambda_0 B(e/m)^{1/2}}{2^{1/2}\,p_0 U_а^{1/2}}, \qquad (9)$$

где e/m — удельный заряд электрона ($1{,}76\cdot10^{11}$ Кл·кг$^{-1}$); $U_а$ — ускоряющее напряжение.

В холловском прикатодном слое осуществляется основной процесс ионизации дрейфующими электронами. Образующиеся здесь ионы практически не подвергаются воздействию магнитного поля ($\omega_i\tau_i<1$; $R_i>L$) и бездиссипативно ($\lambda_i>L$) ускоряются в зоне катодного падения потенциала $U_к$ в направлении электрического поля на поверхность мишени.

В разрядной системе магратрона практически все приложенное напряжение оказывается сосредоточенным в пределах слоя дрейфующих электронов (ТКП), характерный поперечный размер которого сравним с циклотронным радиусом электронов. При таком разряде в слабом магнитном поле скорость электронов больше, чем скорость ионов, и поэтому данный вид разряда подобен тлеющему разряду без магнитного поля.

Локализация плазмы в магратроне

Магнитное поле в магратроне характеризуется тем, что концы магнитных силовых линий (рис. 3) являются «вмороженными» в поверхность катода. Азимутально дрейфующие

электроны, движущиеся также по ларморовским окружностям в направлении силовых линий, отражаются от поверхности катода. Другой особенностью магнитного поля является его фокусирующая способность, т. е. высокая неоднородность (арочная конфигурация силовых линий) в направлении, ортогональном к поверхности катода.

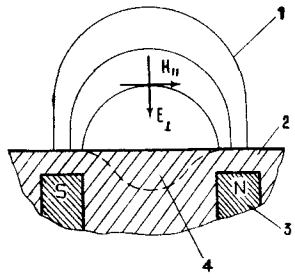


Рис. 3. Структура магнитного поля магратрона:
1 — магнитные силовые линии, 2 — катод, 3 — магнитные полюса; 4 — зона эрозии катода

Интенсивная ионизация возникает в средней части между полюсами магнита, где векторы $\bar{E}$ и $\bar{B}$ перпендикулярны друг другу. По краям этой части векторы $\bar{E}$ и $\bar{B}$ близко совпадают по направлению. При этом создаются условия радиальной и продольной фокусировки электронов, которые оказываются как бы в магнитной ловушке.

В планарных магнетронных устройствах дрейфовое движение электронов в плазме имеет сложный характер. Так как магнитные силовые линии имеют кривую форму, вектор $\bar{B}$ может быть разложен на две взаимно перпендикулярные составляющие $\bar{B}_\perp$ и $\bar{B}_\parallel$ (рис. 4). Электроны в таких полях совершают дрейф под воздействием полей $\bar{B}_\parallel \times \bar{E}$ по направлению $v_д$. Скорость электронов имеет составляющую в направлении $\bar{B}_\parallel$, но вследствие сохранения магнитного момента ($\mu_м = m_e v_\perp^2/\bar{B}$) они будут тормозиться магнитным полем, прежде чем достигнут поверхности катода.

Работа магратрона сопровождается вращением разрядной плазмы по замкнутому контуру в плоскости, перпендикулярной векторам $\bar{E}$ и $\bar{B}$. Из физики плазмы известно [6], что скорость электрического дрейфа не зависит ни от величины, ни от знака заряда, ни от массы частицы. Электроны и ионы дрейфуют с одинаковой скоростью и в одном и том же направлении. При дрейфовом движении по замкнутому контуру электроны и ионы сохраняют траекторию с постоянной напряженностью H лишь до тех пор, пока не произойдет их столкновение с нейтральной частицей. При этом, как показано в работе [7], дрейфующие в скрещенных полях ионы плазмы в

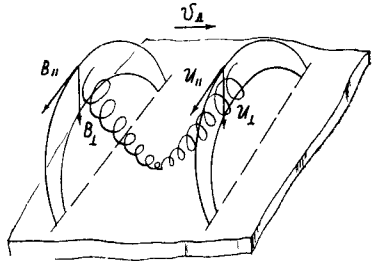


Рис. 4. Схема дрейфового движения электронов

результате столкновений с атомами нейтрального газа увлекают последние во вращение до скоростей, почти совпадающих со скоростями дрейфа ионов (плазмы):

$$v_\varphi = cE/H, \tag{10}$$

где E — напряженность электрического поля; H — напряженность магнитного поля; c — скорость света.

При этом силы вязкости препятствуют достижению высоких скоростей вращения атомов. Силы вязкости обусловлены столкновениями атомов друг с другом, эффективное сечение столкновений на порядок меньше сечения взаимодействия атомов с ионами, в частности сечения резонансной перезарядки. Благодаря этому оказывается возможным такое положение, когда даже малое число вращающихся в скрещенных полях ионов может увлечь во вращение относительно большую массу нейтрального газа. При этом энергия вращательного движения атомов может превысить тепловую.

Дрейфовое движение заряженных частиц за счет внутреннего трения приводит в движение не только газовое наполнение камеры, но и распыленные частицы, сообщая им скорость, перпендикулярную направлению от катода к подложке. Такое положение может привести к «косому» осаждению, которое, однако, легко устранить путем подачи небольшого отрицательного потенциала на подложкодержатель [8].

Токи в плазме магратрона

Плазма тлеющего разряда магратрона относится к области низкотемпературной квазинейтральной плазмы. Степень ионизации плазмы определяется отношением:

$$\alpha = \frac{n_e}{n_i + n_0}, \tag{11}$$

где n_e — плотность электронов; $n_i = n_e$ — плотность ионов; n_0 — плотность газа.

Условием преобладания кулоновских столкновений является:

$$\alpha \gg 1{,}7 \cdot 10^{16} \sigma_{e0} T_e^2, \tag{12}$$

где σ_{e0} — эффективное сечение электрон-атомных столкновений; T_e — температура электронов.

Другой важный параметр плазмы — радиус Дебая:

$$r_Д = 7430 (T_e/n_e)^{1/2}. \tag{13}$$

Он является мерой расстояния, на которое заряженные частицы могут выходить из плазмы, не нарушая ее квазинейтральности.

Электроны, эмиттируемые катодом, совершают движение не строго по циклоиде, так как они имеют некоторую начальную скорость, отличную от нулевой. Кроме того, электрическое поле в ТКП не однородно, что также искривляет пути электронов.

Ток поперек магнитного поля $I_\perp$ переносится электронами и ионами:

$$I_\perp = en_e\mu_{e\perp} E_\perp + en_i\mu_{i\perp} E_\perp. \tag{14}$$

Холловский ток в направлении $\bar{E} \times \bar{B}$ будет составлять:

$$I_x = \omega_e/\nu_e I_{e\perp} = \omega_e/\nu_e e n_e \mu_{e\perp} E_\perp. \tag{15}$$

В формуле (14) подвижность в направлении, перпендикулярном магнитному полю, составляет

$$\mu_{e\perp} = \frac{\mu}{1 + (\omega_e/\nu)^2}, \tag{16}$$

где μ — подвижность частиц при отсутствии магнитного поля или вдоль магнитных силовых линий, $\mu = e/m\nu$; ν — частота столкновений частиц; m — масса частицы; e — заряд частицы; ω_e — циклотронная частота, равная $1{,}76 \cdot 10^{11} B$.

Коэффициент диффузии

$$D = \mu k T_e/e, \tag{17}$$

где k — постоянная Больцмана.

Плотность ионного тока I_i связана с толщиной ТКП d_s и падением потенциала в ТКП U_s законом Чайлда — Ленгмюра (первое выражение в уравнении (18), а также с плотностью электронов в плазме и температурой — уравнением Бома [9] (второе выражение в уравнении (18).

$$I = 8{,}6 \cdot 10^{-9} \left(\frac{40}{M}\right)^{1/2} \frac{U_s^{3/2}}{d_s^2} + 1{,}48 \cdot 10^{-16} n_e \left(\frac{40 T_e}{M}\right)^{1/2} [A/м^2], \tag{18}$$

где M — молекулярная масса иона.

Типичные магратроны работают при давлении 0,5 Па ($3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.), индукции магнитного поля 0,02 Т (200 Гс). Следовательно, $\omega_e = 3{,}5 \cdot 10^9$ рад/с. Эффективное сечение столкновений атомов с электронами с энергиями $\sim$10 эВ в аргоне составляет $\sim 2 \cdot 10^{-19}$ м^2, а частота столкновений $\nu \approx 10^7$ с$^{-1}$, следовательно, $\omega_e/\nu \simeq 300$. В соответствии с уравнением (15) плотность холловского тока значительна и электроны обходят несколько раз разрядную зону при движении к аноду. Холловский ток I_x обычно на порядок больше, чем ток разряда. Поэтому создается как бы соленоидная петля, которая уменьшает напряженность магнитного поля в области катода примерно на 10%.

Из уравнения (16) $\mu_{e\perp} \sim 10^{-5}\mu_e$ при $\omega_e/\nu = 300$. Если бы подвижность электрона была так низка, то она была бы меньше подвижности иона аргона и существование разряда в виде положительного столба было бы сомнительным. Точно так же ток $I_\perp$ через плазму определяется уравнением (14) по измеряемым значениям $E_\perp$ и n_e в области анода. Есть предположение, что причиной этих явлений служат колебания плазмы, которые стимулируют миграцию электронов поперек магнитного поля, достаточно интенсивную, чтобы ограничивать движение первичных электронов.

Электрические зондовые измерения плотности электронов в области разряда для цилиндрических систем совпадают с результатами, полученными по уравнению (18), и показывают, что степень ионизации составляет несколько процентов. Как установлено, при низком давлении электроны, эмиттированные из катода, в хорошо сконструированной ловушке проходят путь длиной более 100 м. Аналогичные соотношения существуют, по-видимому, и в планарном магратроне.

Вольт-амперные характеристики

Магратроны в режиме постоянного тока обычно работают при давлении аргона 0,3—1,3 Па (10^{-2}—10^{-3} мм рт. ст.) и катодном потенциале 300—700 В. При этих условиях плотность тока изменяется от 4 до 60 мА/см^2, а плотность мощности от 1 до 36 Вт/см^2. Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) при различных давлениях в планарном магратроне приведены на рис. 5. (Плотность тока в зоне эрозии мишени может быть в 4 раза выше средней плотности тока, приведенной на рис. 5). Для оптимальных значений формы и интенсивности магнитного поля кривые, приведенные на рис. 5, удовлетворяют уравнению

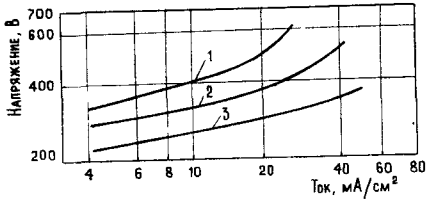


Рис. 5. ВАХ для различных давлений аргона в планарном магратроне:
1 — $1 \cdot 10^{-1}$ Па; 2 — $2{,}5 \cdot 10^{-1}$ Па; 3 — 1,3 Па

$$I = KU^n, \tag{19}$$

где I — ток на катоде; U — потенциал катода; n — показатель эффективности улавливания электронов магнитной ловушкой, его значения лежат в пределах 5—9 [4]; K — коэффициент, характеризующий систему.

ВАХ позволяют судить об эффективности ионизации в разрядной системе. Чем более эффективно удерживаются электроны в плазме, тем выше показатель степени n.

В логарифмических координатах эта зависимость изображается в широких пределах прямой линией. Если магнитное поле слишком слабое, разряд будет выходить из магнетронного режима и будет резко возрастать напряжение [4].

При постоянной напряженности магнитного поля изменение напряжения в зависимости от давления также в широком диапазоне носит линейный характер. При низких рабочих давлениях также наблюдается резкое возрастание напряжения.

Такие изменения напряжения являются результатом ухода электронов из магнитной ловушки без существенной ионизации (низкое значение ε_e) вследствие того, что радиус их движения слишком велик по сравнению с разрядным пространством, т.е.

$$r_л > d_а.$$

При высоких напряженностях магнитного поля разряд гаснет в области низких давлений. Полагают, что это результат незначительного изменения электронами момента в плазме в течение их первого движения по циклоиде (низкое n_{ei}).

Обычно не публикуется никаких данных, касающихся влияния таких параметров, как геометрия магнитного поля, материал мишени и давление, на постоянный коэффициент K в уравнении (19). Если допустить, что мощность W есть произведение катодного потенциала на ток, то уравнение (19) приобретает вид:

$$W = KU^{n+1} \tag{20}$$

Для данной конструкции катода можно получить семейство ВАХ при разных давлениях, это позволяет выбрать наилучшую рабочую точку для данной подводимой мощности.

Магратрон с ВЧ потенциалом на катоде (обычно с частотой 13,56 или 27 МГц) используют для распыления непроводящих материалов в аргоновой и реактивной среде. В работе [10] описан магратрон с дисковым катодом и электромагнитом. Не приведено никаких данных, кроме тех, что импеданс разряда был низок и что диэлектрики распылялись с большой скоростью.

Распыление в ВЧ режиме подобно распылению в режиме постоянного тока в том отношении, что вследствие низкого импеданса плазмы можно получить высокую плотность мощности при низком приложенном ВЧ потенциале. Например, при плотности мощности 2 Вт/см^2 автоматическое смещение потенциала на мишени составляет около 360 В для планарных магратронов по сравнению с 3500 В для обычных ВЧ систем распыления [11].

Напряжение зажигания разряда

Напряжение зажигания разряда в магратроне значительно меньше, чем напряжение зажигания в диодной системе. Это объясняется тем, что еще до наложения электрического поля электроны, всегда присутствующие в атмосфере и обеспечивающие первые акты ионизации в развитии лавинного процесса газового разряда, по причине неоднородности магнитного поля над катодом стягиваются в область над его средней линией. Вследствие этого плотность электронов в этой области оказывается намного выше их средней плотности в объеме камеры, что способствует возникновению разряда при относительно низких прикладываемых напряжениях.

При исследовании зависимости напряжения зажигания $U_з$ от давления аргона и индукции магнитного поля [12, 13] условно выделены три области, характерные для возникновения разряда (рис. 6). При $B \geqslant 8 \cdot 10^{-2}$ Т напряжение зажигания разряда $U_з$ почти не зависит от B в пределах исследуемого диапазона (кривая *1*). В диапазоне $8 \cdot 10^{-2} \geqslant B \geqslant 4 \cdot 10^{-2}$ Т напряжение $U_з$ увеличивается с увеличением B. При $B \leqslant 4 \cdot 10^{-2}$ Т наблюдается возрастание $U_з$, а в случае $B \leqslant 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ Т разряд вообще не загорается при максимальных $U_з$.

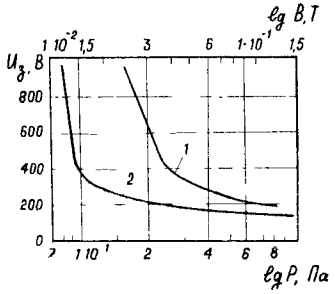


Рис. 6. Зависимость напряжения зажигания разряда от индукции магнитного поля (*1*) и давления аргона (*2*)

На этом же рисунке (кривая *2*) изображена зависимость $U_з = f(p)$. При $p \leqslant (2{,}5$—$3) \cdot 10^{-1}$ Па наблюдается некоторое увеличение $U_з$. При $p \leqslant 10^{-1}$ Па напряжение зажигания очень резко возрастает, и в области $p \leqslant 8 \cdot 10^{-2}$ Па разряд не возникает. Сопоставление кривых *1* и *2* указывает на то, что влияние магнитного поля на напряжение зажигания разряда аналогично влиянию давления.

Исследования показали, что изменение геометрии магратрона не приводит к изменению характера зависимостей и оказывает влияние только на абсолютные значения исследуемых величин.

Рабочие параметры магратронов

К основным рабочим параметрам магратронов можно отнести напряжение на электродах, разрядный ток, удельную мощность на мишени, давление рабочего газа и индукцию

магнитного поля. Все эти параметры в магратроне взаимосвязаны, и изменение одного из них приводит к изменению других.

Магратроны относятся к низковольтным системам распыления, напряжение источника питания не превышает 1000 В. Однако типичные рабочие напряжения составляют порядка 400 В, при этом распыляемая мишень находится под отрицательным потенциалом. Анод может находиться под нулевым потенциалом или под некоторым положительным напряжением смещения, что способствует более полному улавливанию электронов плазмы.

Ток разряда, определяющий скорость распыления материала, зависит от плотности разрядного тока на мишени, размеров мишени и мощности источника питания. В промышленных конструкциях ток разряда достигает нескольких десятков ампер при плотности тока до 2000 А/м^2 и более. При этом следует учесть, что в средней части зоны распыления (эрозии) плотность тока значительно превышает указанное значение.

Удельная мощность ограничивается условиями охлаждения мишени и теплопроводностью распыляемого материала и достигает $5 \cdot 10^5$ Вт/м^2.

Рабочее давление магратрона лежит в широких пределах: 10^{-2}—1 Па. В качестве основного рабочего газа используется аргон. Чистота осаждаемых пленок обусловлена отсутствием загрязняющих компонентов в зоне разряда.

Индукция магнитного поля во многом определяет характер разряда в магратроне и находится в диапазоне 0,03—0,1 Т (на расстоянии 1 см над мишенью).

Существенное влияние на свойства пленок оказывает скорость осаждения, которая с достаточной точностью может поддерживаться стабильной благодаря постоянству параметров процесса, таких, как ток разряда или подводимая мощность. Для обеспечения воспроизводимости и стабильности процесса по току последний необходимо поддерживать с точностью $\pm 2\%$, а при стабилизации процесса по мощности разряда подводимую мощность следует поддерживать с точностью ± 20 Вт в диапазоне регулирования от 0 до 10 кВт. При этом рабочее давление необходимо поддерживать постоянным с точностью $\pm 5\%$. Магнитное поле обычно создается постоянными магнитами, и о влиянии его на стабильность параметров магратрона сведения отсутствуют.

Одной из причин нестабильности рабочих параметров магратрона является возникновение электрических дуговых разрядов на мишени, особенно в начале работы, поэтому в источнике питания необходимо предусмотреть устройство подавления дуговых разрядов. Самопроизвольное возникновение нестабильностей в виде токовых каналов, вытянутых

вдоль магнитных силовых линий, является одним из характерных свойств плазмы, движущейся в скрещенных полях. Вопрос о причине возникновения подобных нестабильностей окончательно не решен, однако установлено, что главной их причиной является дрейфовый характер движения зарядов в скрещенных полях.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Наносимые материалы

С помощью магратронов практически возможно наносить пленки из весьма широкого ассортимента материалов, используемых в полупроводниковой технике и микроэлектронике, включая легкоплавкие и тугоплавкие металлы, многокомпонентные сплавы, полупроводники и полупроводниковые соединения. При использовании ВЧ разряда можно также наносить пленки диэлектриков.

Особенно эффективно используются магратроны для нанесения пленок алюминия и его сплавов при производстве ИС. Операция металлизации является одной из заключительных в технологическом процессе, в ходе которого стоимость пластины становится высокой. Это делает указанную операцию весьма ответственной. Влияние на свойства пленок алюминия и его сплавов давления рабочего газа, расстояния мишень — подложка, угла осаждения, температуры подложки, допустимого давления реактивных газов и других параметров рассмотрено в работах [14, 53].

Для распыления сплавов магнетронной системой, как и для всех методов ионного распыления, характерно сохранение композиционного состава материала мишени в пленке, причем этот состав сохраняется на протяжении всего срока службы мишени и не зависит от толщины осаждаемой пленки [15]. В качестве примера в табл. 1 приведены результаты спектрографического анализа сложного сплава алюминия, где подтверждено хорошее совпадение компонентного состава в пленке с составом исходного материала в мишени.

Таблица 1

Элемент	Состав мишени, %	Состав пленки, %
Si	2,0	2,0
Mg	0,0016	0,0013
Cu	0,0082	0,0095
Ca	0,0071	0,0065
Al	Остальное	Остальное

Отсутствие нагрева подложек позволяет применять этот метод для нанесения пленок на тонкие гибкие ленты из органических материалов с низкой термостойкостью (майлар, полиимид и др.) [16].

Имеется опыт изготовления высококачественных шаблонов магнетронным распылением хрома и окиси железа с осаждением пленок на стеклянных подложках [17].

Этим методом успешно наносятся многослойные покрытия типа Cr — Au, Cr — Cu на металлические подложки, металлические пленки типа Cr — Cu — Al, W — Ti — Al, Ti — Pt — Au, пленки Ni — Cr — Au — Cu, используемые в производстве биполярных и МОП приборов, а также мощных кремниевых приборов [17—20].

Влияние параметров магратрона (разрядного тока, рабочего давления и напряжения смещения) на свойства пленок Cd — Co — Cu рассмотрено в работе [21].

С помощью магратронов были получены сверхпроводящие пленки ниобия [22], а также пленки Nb_3Sn с температурой фазового перехода 18,3 K [15]. В этой работе показано влияние давления аргона, расстояния от мишени до подложки и температуры последней на температуру фазового перехода сверхпроводящих пленок Nb_3Sn. Установлено, что для получения упорядоченной структуры пленок Nb_3Sn с высокой температурой фазового перехода в сверхпроводящее состояние (18,3 K) давление аргона должно быть 4—6 Па. При более низком давлении температура фазового перехода значительно снижается.

Хотя и с большими трудностями, однако были получены магнитные пленки из мишеней в виде тонкой ленты NiFe [23].

Широкий класс нитридов, окислов, карбидов, сульфидов, соленидов и других соединений был получен на основе реактивного распыления ряда материалов: NbN, TaN, CdS, CdSe, TiO_2, Al_2O_3, TaO и др. [24, 25].

Пути оптимизации параметров магратрона при ВЧ распылении пленок Al_2O_3 и влияние этих параметров на равномерность осаждения пленок по толщине, изменение потенциала подложки, соотношение Al/O_2, микроструктуру пленок, наличие загрязнений, диэлектрическую проницаемость, напряжение пробоя, плотность дефектов, внутренние напряжения в пленках, микротвердость и др. рассмотрены в работе [26].

Скорость осаждения

Важным технологическим параметром распылительной системы является скорость осаждения пленок, которая определяется скоростью распыления, геометрией системы, рабочим давлением.

Скорость распыления в основном определяется плотностью ионного тока в зоне эрозии мишени и энергией ионов (ускоряющим напряжением). Кроме того, на скорость осаждения оказывают влияние и такие факторы, как расстояние мишень — подложка, размеры зоны эрозии, материал мишени и рабочее давление.

Так как при магнетронном распылении давление весьма мало, можно пренебречь рассеянием частиц на молекулах остаточного газа.

При допущении равномерного распределения тока на поверхности катода скорость распыления $v_р$ может быть выражена для планарной системы [5]:

$$v_р \approx q/\rho\tau, \qquad (21)$$

а для коаксиальной системы:

$$v_р \approx (q/\rho\tau)(r_к/r_а), \qquad (22)$$

где q — плотность материала, распыляемого с единицы площади катода; ρ — плотность пленки; τ — время распыления; $r_к$, $r_а$ — радиусы катода и анода, соответственно.

При распылении в аргоне

$$q = (i_+/e)\delta\tau(A/N),$$

тогда для планарной системы:

$$v_р = \frac{i_+}{e}\delta\frac{A}{N\rho} \qquad (23)$$

и для коаксиальной системы:

$$v_р = \frac{i_+}{e}\delta\frac{Ar_к}{N\rho r_а}, \qquad (24)$$

где i_+ — плотность ионного тока на катоде; δ — коэффициент распыления; A — атомная масса распыляемого материала; N — число Авогадро.

У магратрона на постоянном токе энергия бомбардирующих ионов ev_i имеет тот же порядок, что и энергия разряда ev_S, и находится в пределах 300—800 эВ, более того, $\delta = av_i$, где a есть постоянная величина [4], а $i_\perp \approx i_S$, поскольку коэффициент вторичной эмиссии значительно меньше единицы. Вследствие этого скорость осаждения пропорциональна мощности разряда $v_S i_S$.

На практике было установлено, что при магнетронном распылении зависимость скорости осаждения от подводимой мощности в широком диапазоне значений имеет почти линейный характер, как это показано на рис. 7. для меди при расстоянии мишень — подложка 100 и 50 мм [27]. Так как ток разряда неравномерен на поверхности катода, то выражения (23) и (24) носят приближенный характер.

В общем виде скорость распыления (эрозия катода) определяется силой тока

$$\dot{m} = \mu I, \qquad (25)$$

где μ — коэффициент пропорциональности, зависящий от множества факторов (материала катода, рабочего газа, геометрии устройства и др.), и поэтому может быть определен только для конкретных случаев.

Энергетическая эффективность процесса генерации потока в расчете на единицу массы выражается соотношением:

$$\xi = U_к I/\dot{m}. \qquad (26)$$

В расчете на один генерируемый атом энергетическая эффективность выражается:

$$\xi = IU_к\frac{m_a}{\dot{m}}, \qquad (27)$$

где m_a — молекулярная масса распыляемого вещества.

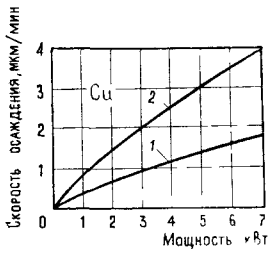


Рис. 7. Зависимость скорости осаждения от подводимой мощности:
1 — для расстояния 100 мм; 2 — для расстояния 50 мм

Интенсивность эрозии в зоне бомбардировки мишени ионами неравномерна, она наибольшая в центральной зоне, где наблюдается увеличение удельного потока мощности.

Для максимальной скорости осаждения подложка должна быть размещена так близко к мишени, как это возможно при сохранении внешних очертаний области плазмы. Типичные наименьшие расстояния 5—7 см. Расстояние мишень — подложка и скорость осаждения будут изменяться во времени в случае, когда для улучшения равномерности толщины пленки или для увеличения производительности используется перемещение подложек.

Движение подложек усложняет определение скорости осаждения. Для планетарного и других вращательных движений подложек скорость осаждения, приводимая в литературе, обычно определяется делением толщины пленки на время осаждения. При статическом осаждении толщина пленки обычно неравномерна, так что для подсчета скорости осаждения используется среднее значение толщины (или даже максимальное).

При линейном перемещении подложек под прямоугольной мишенью средняя скорость осаждения

$$v_о = \frac{tv_п}{B_м}, \qquad (28)$$

где t — средняя толщина пленки за один проход подложки под мишенью; $v_п$ — скорость перемещения подложки;

$B_м$ — эффективная ширина мишени, измеренная в направлении движения подложки.

Снижение скорости осаждения обусловлено рассеянием распыляемого материала на молекулах газа и присутствием таких неэффективных распыляющих частиц, как водород, которые входят в ионный ток, но не способствуют увеличению потока распыляемого материала. Давление рабочего газа оказывает меньшее влияние на скорость осаждения в магратроне в режиме постоянного тока, чем при обычном распылении. При уменьшении давления рабочего газа увеличивается эффективное сопротивление плазмы, вследствие чего для поддержания постоянной плотности тока требуется несколько большее напряжение.

Таким образом, если графически изобразить зависимость скорости осаждения от давления при постоянной плотности i_+, то скорость уменьшается при увеличении давления. Если поддерживать постоянную мощность, то кривая зависимости скорости осаждения от давления будет иметь максимум (рис. 8). Из рисунка видно, что для данных условий скорость осаждения изменяется менее чем на 10% при изменении давления от 0,4 до 15 Па. Уменьшение скорости при высоких давлениях происходит за счет рассеяния распыляемого материала на молекулах газа, а уменьшение скорости при низких давлениях, как предполагают, обусловлено менее эффективным поступлением ионов на катод из-за уменьшения количества носителей зарядов [27]. Поэтому область давлений 0,3—0,8 Па обычно принимают за область рабочих давлений.

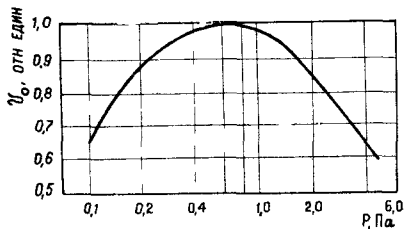


Рис. 8. Зависимость скорости осаждения от давления

Типичные скорости осаждения пленок для различных материалов при диаметре подложки 200 мм и расстоянии от магратрона 50 мм: Al — 1000—1200, Cr — 500—700, Cu — 1200—1500, Au — 1500—1800 и Ag — 2000—2500 нм/мин.

Собственное сопротивление (импеданс) ВЧ магнетронного разряда не так сильно зависит от давления, как в магратроне в режиме постоянного тока. Скорость осаждения также пропорциональна мощности [28, 26] и постоянна (±10%) для данной мощности в диапазоне давлений от 0,1 до 2,7 Па. Постоянное автоматическое смещение напряжения на мишени может быть использовано для индикации и контроля ВЧ скорости осаждения.

Для данной средней плотности мощности (мощность, деленная на площадь катода) скорости осаждения в ВЧ магратроне сравнимы со скоростями в обычной ВЧ системе распыления, т. е. наклоны кривых зависимости скорости осаждения от плотности мощности подобны. В табл. 2 приведены сообщаемые в литературе скорости ВЧ осаждения для Al_2O_3 и SiO_2. Эти скорости ниже, чем для металлов, вследствие более низкого коэффициента распыления [26].

Таблица 2

Материал мишени	Метод распыления	Диапазон плотности мощности, Вт/см²	Скорость осаждения на единицу мощности, нм·см²/Вт·мин	Расстояние мишень—подложка, см	Источник
Al_2O_3	Диодная система	1,2—2,4	5,0	3	[29]
Al_2O_3	Планарный магратрон*	3—8	5,1	7	[26]
SiO_2	Планарный магратрон*	1—9	11,0	9	[28]
SiO_2	Планарный магратрон**	26	9,3	4,8	[30]

* Линейное перемещение подложек.
** Вращение подложек на барабане.

Главным фактором, ограничивающим скорость осаждения, является максимальный поток мощности, который может быть подан на катод, не вызывая его растрескивания, сублимации или плавления. Для материалов с хорошей теплопроводностью допустимая плотность мощности легко может превысить возможности водяного охлаждения отводить тепло от пластины, на которой крепится мишень. Для материалов с плохой теплопроводностью, например стекла или кварца, максимально допустимая плотность мощности будет зависеть от внутреннего напряжения и коэффициента термического расширения. Свободные от напряжений материалы с незначительным термическим расширением, такие, как плавленый кварц, могут выдерживать относительно высокие температурные перепады. Например, сообщалось [31] об успешной работе мишени из SiO_2 в магнитно стимулированном высокоскоростном ВЧ режиме при плотности мощности 72 Вт/см². При этой плотности мощности температура поверхности мишени была близка к точке плавления, и авторы делают вывод, что наряду с распылением происходило и термическое испарение.

Высокие внутренние напряжения, типичные для многих мишеней, таких, как окись кремния, спеченные металлические окислы, будут ограничивать максимальную плотность мощности и, следовательно, скорость осаждения.

Распределение толщины пленок

Разрядная плазма магратрона повторяет форму полюсных наконечников системы и при использовании плоских мишеней (планарных магратронов) может быть реализована в форме окружности, сильно вытянутого эллипса (квазилинейный генератор) или других сложных замкнутых непересекающихся кривых. Это дает возможность регулировать интенсивность осаждения пленок на различных участках покрываемых поверхностей.

При типичных рабочих давлениях поток распыляемых частиц доходит до подложек с незначительным рассеянием на молекулах рабочего газа [32]. Вследствие этого с достаточной степенью точности можно прогнозировать распределение толщины пленки при допущении косинусного распределения потока распыляемых частиц и бесстолкновительного его распространения.

Распределение толщины пленки при распылении с помощью магратрона с дисковым катодом хорошо согласуется с расчетными значениями, получаемыми для кольцевого источника с косинусными эмиссионными характеристиками. Для такого источника наилучшее распределение толщины получается для мишени, у которой внутренний диаметр равен 0,7 h, а внешний 0,8 h, где h — расстояние от мишени до подложки. Если предположить, что ширина плазменного кольца равна 2 см, а минимальное расстояние мишень — подложка 5 см, то оптимальный наружный диаметр плазменного кольца 9,5 см. Дисковые мишени с большими размерами кольца должны размещаться пропорционально дальше от подложек. Лучшей конструкцией магнитной системы для кольцевого источника являются многочисленные концентрические кольца, создающие концентричную тороидальную область плазмы. В некоторых источниках, имеющих многократные независимые замкнутые области плазмы, особенно важно иметь одинаковую интенсивность магнитного поля в каждой отдельной области плазмы, чтобы обеспечить одинаковую скорость эрозии мишени с целью максимального использования материала. Сообщалось о создании катодов в форме концентрических колец диаметром до 61 см с шестью равномерно расположенными в пространстве кольцами плазмы, при этом было использовано около 80% материала мишени.

При использовании магратронов с протяженно-овальной зоной эрозии для хорошей равномерности распределения требуется перемещение подложек в направлении, перпендикулярном длине катода. Для катода с отношением длины к ширине 2,5 и расстоянием мишень — подложка, равным 1/2 ширины мишени, толщина пленки больше в центре. Очевидно, что длинная узкая мишень, имеющая полукруглые

плазменные области за пределами подложки, обеспечит равномерное распределение, близкое к распределению бесконечного линейного источника. Сообщалось о мишенях длиной до 150 см и шириной до 20 см [33, 34].

В настоящее время отсутствует методика расчета равномерности распределения конденсата в магнетронной системе, на основе которой можно было бы выбрать геометрические параметры системы, обеспечивающие нанесение пленки на заданную площадь подложек с требуемой равномерностью. Описаны лишь результаты экспериментов по нанесению пленок в известных конструкциях магратрона.

Особенностью магратронов является то, что распределение плотности ионного тока на мишени неравномерно. При расчете равномерности толщины осаждаемой пленки необходимо учитывать как геометрию мишени, так и распределение на ней плотности ионного тока.

Дело еще и в том, что в реальных условиях при длительном использовании мишени происходит неравномерная эрозия мишени с образованием углубления в зоне наиболее интенсивной ее бомбардировки ионами, что должно приводить в какой-то мере к изменению распределения толщины пленки по подложке.

Однако, как отмечается в работе [27], это изменение не превышает нескольких процентов при полном износе мишени. Кроме того, распределение распыленных атомов в пространстве зависит от энергии бомбардирующих ионов и давления в камере и может значительно отличаться от косинусного Считается, что косинусный закон сохраняется для энергии ионов $W_i = 1$—10 кэВ, в случае $W_i > 10$ кэВ закон надкосинусный (т. е. большая часть распыленных атомов летит по нормали к поверхности и меньшая — под углом), а в случае $W_i < 1$ кэВ закон распределения подкосинусный (большая часть атомов распыляется под углом к поверхности мишени и меньшая — по нормали) [31, 35]. Расчет равномерности осаждения с учетом отклонения эмиссии от косинусного закона приведен в работе [36], где распределение распыленных атомов в пространстве описывалось полиномом вида:

$$\Pi(\cos\varphi) = \cos\varphi + a_3\cos^3\varphi + a_5\cos^5\varphi + \ldots \qquad (29)$$

Основные факторы, влияющие на равномерное распределение конденсата, в том числе на подложках сложного профиля, рассмотрены в работах [37, 38]. В качестве теоретических допущений обычно считают, что распыление поверхности мишени однородно; 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.

Равномерность распределения толщины пленки может быть повышена путем перемещения подложек в процессе осаждения пленок в сочетании с оптимизацией геометрии магнитного блока.

Различные способы перемещения (позиционирования) подложек относительно источника распыления показаны на рис. 9. Источник распыления может быть смонтирован так, чтобы распыление происходило в любом направлении. При использовании планетарного движения подложек (рис. 9, *а*), как в существующих системах с электронно-лучевыми испарителями, расстояние источник — подложка велико и эффективная скорость осаждения снижается. При использовании дисковых мишеней с вращением подложек в одной плоскости (рис. 9, *б*) расстояние мишень — подложка может быть меньше, но для получения хорошей равномерности требуются фигурные экраны, более того, возможна модификация катода и магнитного узла для получения клинообразной зоны распыления.

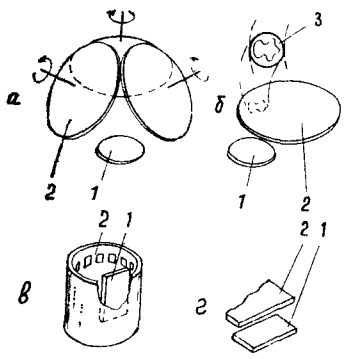


Рис. 9. Способы позиционирования подложек относительно магратрона

В установке с планетарным вращением подложек магратрон позволяет получить более равномерное покрытие рельефа, чем при использовании электронно-лучевых испарителей. Это обусловлено тем, что рассеяние на атомах аргона и большая площадь катода обеспечивают широкий интервал углов падения распыленных атомов на подложки.

На рис. 9, *в* показан способ размещения подложек на внутренней поверхности барабанного подложкодержателя, вращающегося вокруг плоского катода. Цилиндрический катод был бы более подходящим для этой конструкции, несмотря на то что для различных материалов потребовались бы многочисленные катоды [30]. Подложки могут быть также размещены на наружной поверхности барабанного подложкодержателя, а один или несколько магратронов могут находиться вокруг барабана. При движении подложек в одной плоскости (рис. 9, *г*), когда расстояние подложка — мишень остается практически постоянным, требуются многократные проходы их относительно друг друга. Конструкция с линейным перемещением подложек подобна варианту, показанному на рис. 9, *в*, но легче сочетается с непрерывным перемещением подложек из магазина или загрузочного шлюза в рабочую камеру и обратно.

Линейное перемещение позволяет оптимально использовать большие возможности прямоугольных магратронов благодаря минимальному расстоянию мишень — подложка и максимальной производительности. Однако все виды перемещений подложек создают изменение скорости осаждения и угла падения материала во времени.

В плоских магратронах высокую равномерность толщины распределения конденсата можно получить, используя специальные профилированные экраны. Экраны с фигурными отверстиями использовались для достижения равномерности осаждения с помощью магратронов с дисковой мишенью и с вращением подложек в одной плоскости (рис. 9, *б*) и с прямоугольным катодом и линейным движением [39]. Форма отверстия экранов выбирается эмпирически. Такие экраны имеют следующие недостатки: накопление осаждаемого материала, который следует периодически удалять, и уменьшение эффективной скорости осаждения при данной скорости эрозии мишени.

В большинстве случаев усовершенствование геометрии магнитной системы — более удобный способ обеспечения равномерности, чем фигурное экранирование. Исключение можно было бы сделать в случае контроля скорости или угла падения: например, экраны с одним или несколькими отверстиями могут быть размещены так близко к подложке, как это практически возможно, чтобы избежать осаждения с низкими скоростями и малыми углами падения.

Более равномерное распыление поверхности мишени также способствует улучшению равномерности осаждения конденсата и повышает срок службы мишени. Для этой цели предложено использовать дополнительное магнитное поле, перемещающее зону максимального распыления, что позволит повысить степень использования мишени [40].

Явления на подложке

В процессе осаждения пленок подложка может подвергаться электронной бомбардировке. При обычном катодном распылении на постоянном и ВЧ токе вторичные электроны, эмиттируемые катодом, ускоряются в ТКП и, несмотря на то что подложка экранирована плазмой или имеет отрицательное смещение, бомбардируют ее с энергией, почти равной потенциалу катода [41]. Установлено, что при обычном ВЧ распылении из 5—10% мощности катода, рассеиваемой на подложке, 60% обусловлено электронной бомбардировкой. При обычном распылении на постоянном токе приблизительно 40% мощности, рассеиваемой на подложке, фактически передается

вторичными электронами [41]. В планарном магратроне вторичные электроны ускоряются за счет разницы потенциалов между катодом и плазмой, но под влиянием поперечного магнитного поля эти электроны движутся по искривленным траекториям с радиусом $\leqslant 1$ см, так что они не могут бомбардировать подложку непосредственно. Вследствие процессов столкновения и ионизации плазма заполнена электронами с энергиями ~ 1 эВ. Эти электроны легко собираются анодом, расположенным рядом с зоной, где магнитные силовые линии входят в поверхность катода.

Сообщалось, что если на анод, окружающий катод, подать потенциал 20—35 В, он будет уменьшать ток на заземленную подложку до 0 при потенциале катода — 450 В.

При отсутствии анода общий ток, равный току разряда, будет практически делиться пропорционально площади между заземленной подложкой и соседними заземленными стенками камеры. Незаземленная или непроводящая подложка будет быстро приобретать потенциал, достаточный для того, чтобы предотвратить дальнейшую электронную бомбардировку.

Меньший нагрев подложки в магратронах, по сравнению с обычным распылением, является результатом меньшей энергии электронов, бомбардирующих подложку. Однако, если даже были бы устранены все бомбардирующие заряженные частицы, все равно возможен некоторый нагрев подложек за счет тепла конденсации и кинетической энергии конденсирующихся атомов [42]. Кинетическая энергия атомов в магратроне точно не известна, однако это значение энергии может составлять 10—20 эВ. Вследствие более низкого давления и меньшего расстояния мишень — подложка в магратроне распыляемые атомы теряют меньше кинетической энергии из-за столкновения с атомами рабочего газа.

В процессе осаждения пленок подложка подвергается бомбардировке и нейтральными частицами. Как указывалось выше, в разряде магратрона имеет место значительная ионизация распыляемых частиц. Многие из этих ионов могут быть нейтрализованы за счет перезарядки и отражены от поверхности мишени в виде атомов. При энергиях меньше чем 1000 эВ доля отраженных атомов может составлять 0,4 и частицы могут сохранять значительную часть своей первоначальной энергии [43]. Вследствие этого в магратроне можно ожидать возникновения значительного потока отраженных высокоэнергетических распыленных атомов, бомбардирующих подложку, в дополнение к атомам, поступающим непосредственно с мишени. Эти же процессы лежат в основе бомбардировки подложки высокоэнергетическими и нейтральными атомами рабочего газа и остаточных газов. Ионы распыляемых материалов могут также дрейфовать к подложке и рекомбинировать с электронами на поверхности подложки с выделением энергии. Все эти процессы могут привести к высокой поверхностной подвижности атомов, осаждаемых в магратроне. Об измерениях распределения энергии атомов, распыляемых в магратроне, в литературе не сообщается.

Важно отметить, что низкая температура и отсутствие бомбардировки подложек высокоэнергетическими заряженными частицами позволяют применять магратроны при изготовлении МОП приборов, в то время как обычные диодные системы из-за больших радиационных нарушений для этой цели не пригодны [44—46].

Адгезия пленок и распыление со смещением

Важным свойством пленок является адгезия с подложкой, которая при использовании магратронов значительно выше, чем у пленок, полученных термовакуумным методом. Это объясняется высокой энергией конденсирующихся частиц при распылении (несколько электрон-вольт), в то время как при испарении энергия осаждаемых частиц составляет доли электрон-вольта.

В табл. 3 приведены средние значения энергии W_a и скорости v_a атомов различных поликристаллических материалов, распыляемых ионами аргона с энергией в диапазоне 0,6—0,4 кэВ. Из таблицы видно, что распыленные атомы тяжелых материалов обладают наибольшими значениями W_a, а легких — наибольшими значениями v_a [47].

Таблица 3

Распыляемый материал	W_a, эВ	$V_a \cdot 10^{-3}$, м/с
Al	1,1	7,4
Cu	1,1	4,3
Si	1,2	6,4
Ti	1,7	5,9
Ge	1,7	4,8
Fe	1,8	6,0
Ni	2,1	6,0
Au	2,7	3,8
Pt	4,2	4,3
Ta	4,2	4,8

Существенное влияние на условия конденсации и повышение адгезионных свойств пленок можно оказать, подавая напряжение смещения на подложку. Даже при небольшом на-

пряжении смещения $U_{см}$ на подложке наступает насыщение ионного тока $I_{см}$, вытягиваемого из граничного слоя плазмы магратрона (рис. 10) [50]. Кривая *1* снята при расстоянии подложка — мишень 50 мм, кривая *2* — при расстоянии 100 мм. Таким образом, в магратроне можно в широких пределах изменять энергию ионов при постоянном значении ионного тока на подложку. Состав этих ионов точно не известен: в основном это могут быть ионы рабочего газа, однако значительную часть могут представлять ионы распыляемого материала и ионы остаточных газов [48, 49]. З. Шиллер и другие измеряли токи на подложке при следующих условиях [27].

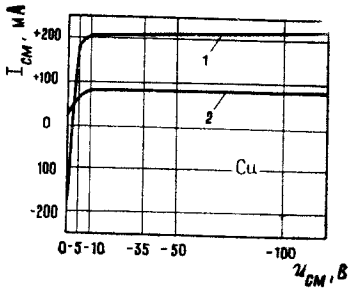


Рис. 10. Зависимость ионного тока от напряжения смещения

Напряжение смещения на подложке	0 . . . —400 В
Форма катода	дисковый плоский
Потенциал на катоде	—350 . . . —485 В
Потенциал на концентрическом кольцевом аноде	+35 В
Расстояние катод — подложка	5 см
Давление аргона	0,7 Па

Они установили, что при потенциале смещения на подложке в диапазоне между —100 и —400 В ток на подложке практически не зависел от потенциала смещения, особенно при малом потенциале. Ток подложки достигал приблизительно 8% от тока мишени. Они сделали вывод, что для данных значений давления энергия бомбардирующих ионов может быть изменена без существенного изменения общего ионного тока или отношения числа ионов к числу распыляемых атомов на подложке. Для данного напряжения смещения ионный ток на подложку уменьшается с увеличением давления. Наибольшее отношение числа ионов к числу распыляемых атомов на подложке имеет место при давлениях несколько меньше 0,1 Па.

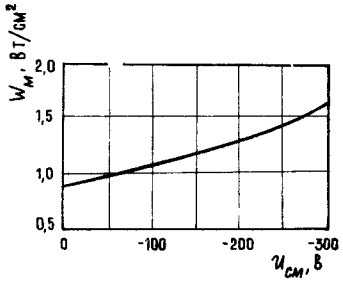


Рис. 11 Зависимость тепловой нагрузки от напряжения смещения

Поскольку относительно малые потенциалы смещения на подложке могут привести к большим ионным токам, контроль потенциала смещения на подложке очень важен в большинстве случаев использования планарных магратронов.

Энергия ионов, бомбардирующих подложку, оказывает доминирующее влияние на термическую активацию конденсации, на возрастание подвижности конденсируемых частиц, на возникновение активных центров конденсации, на десорбцию газов чужеродных загрязняющих частиц с поверхности конденсации. При выборе напряжения смещения $U_{см}$ следует учитывать дополнительную тепловую нагрузку $W_{см}$ на подложку из-за ионного тока (рис. 11).

Адгезию пленок к подложке можно повысить, используя метод так называемого ионно-термического осаждения, который также можно осуществить с использованием магнетронной системы. В работе [51] описано нанесение никеля на стальные ленты (рис. 12). Пары никеля из испарителя *1* попадали в зону ионизации *3* и частично ионизировались в скрещенных полях, образованных магнитной системой *6* и электрическим напряжением, приложенным к движущейся стальной ленте *5*, на которую подан отрицательный потенциал. Таким образом, на подложку одновременно попадали как атомы пара *4*, так и ускоренные ионы никеля *2*.

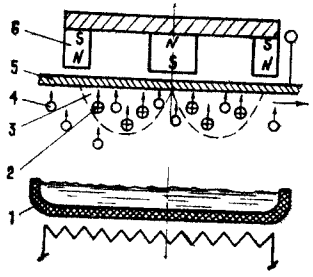


Рис. 12. Схема устройства ионно-термического осаждения

Распыление из жидкой фазы

В некоторых случаях, по-видимому, будет целесообразно проводить распыление из жидкой фазы. Дело в том, что теплопроводность металлов в жидком состоянии в 5 раз меньше, чем теплопроводность при нормальных условиях. Это позволяет подводить к жидкой мишени большие мощности и повышать температуру расплава до такой температуры, когда одновременно с распылением будет происходить заметный процесс испарения. Совмещение этих процессов существенно повышает эффективность системы, так как меньшая часть выделяющейся энергии уносится в систему охлаждения мишени (рис. 13) [52].

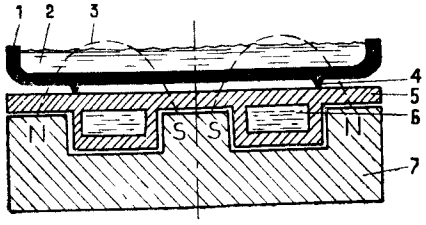


Рис. 13 Схема распыления из жидкой фазы

Плоскодонный тигель *1*, изготовленный из тугоплавкого немагнитного материала, например молибдена, устанавли-

вается на плоский катод *5*, охлаждаемый водой *6* и расположенный в магнитном блоке *7*. Магнитное поле *3* локализует разряд над тиглем. Между дном тигля и катодом создается небольшой зазор за счет штырьков *4* или путем прокладок из нескольких вольфрамовых проволочек. Этот зазор создает барьер, препятствующий отводу тепла от тигля. Распыляемый материал *2* помещается в тигель и нагревается в нем до расплавления при достижении соответствующих плотностей энергии на мишени. Таким образом осуществляется распыление из жидкой фазы.

При распылении из жидкой фазы визуально наблюдается интенсивное вращение расплава, что может способствовать разгонке шлаков из зоны распыления.

КОНСТРУКЦИИ МАГРАТРОНОВ

Многообразие конструктивных схем магратронов вызвано разнообразием внутрикамерной оснастки вакуумного оборудования для нанесения тонких пленок из-за различных требований к равномерности толщины пленок, скоростям распыления, прикладываемым мощностям, теплоотводу от мишеней, рациональному использованию материала мишеней и т. д.

Магратроны с цилиндрическим катодом

Одной из первых промышленных конструкций магнетронных систем ионного распыления был магратрон с полым цилиндрическим катодом и одним торцевым анодом (рис. 14, *а*, *б*) [60—62]. Магнитное поле во внутренней полости катода создается постоянным цилиндрическим магнитом. Мишень также цилиндрической формы и вставляется с открытого торца катода во внутреннюю его часть. В процессе распыления мишень разогревается и подвергается термическому расширению. Увеличиваясь в диаметре, мишень входит в плотное соприкосновение с водоохлаждаемым корпусом катода, поэтому достаточно свободная посадка мишени в катод в этом магратроне обеспечивает эффективное и надежное охлаждение мишени. Однако распыленный материал мишени поступает неравномерным потоком через открытый торец катода. Для получения равномерных покрытий с этой конструкцией магратрона используют планетарные системы перемещения изделий.

Скорости нанесения покрытий этим магратроном невелики, так как внутри цилиндрического катода распыленный материал в значительной степени перераспыляется на поверхности мишени и осаждается на торцевом аноде. При этом на аноде осаждается столько же материала мишени, сколько его поступает с другого торца катода на изделия. Несовершенная

магнитная система и ее расположение в этом магратроне не позволяют эффективно проводить ионизацию рабочего газа у поверхности мишени и защиту изделий от бомбардировки высокоэнергетическими электронами. Из-за указанных недостатков этот тип магратронов не получил широкого распространения.

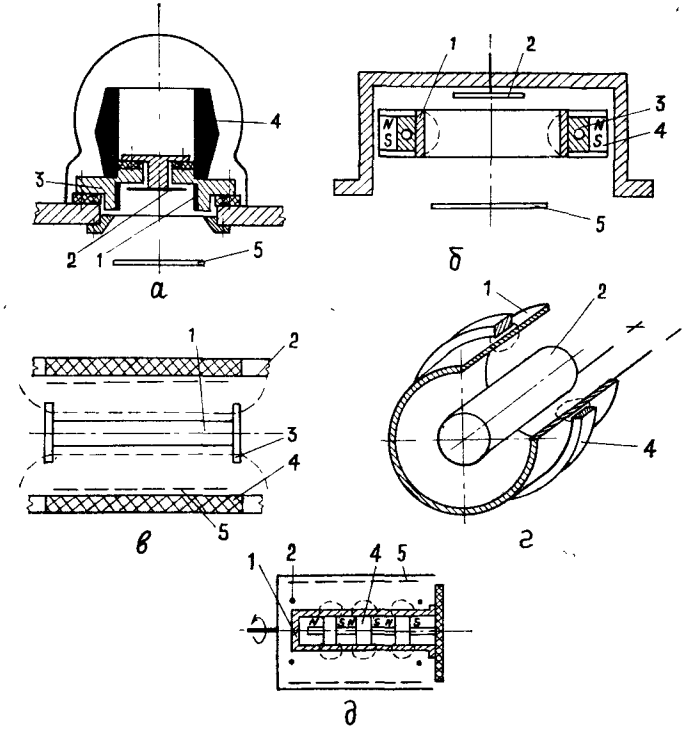


Рис. 14. Принципиальные схемы магратронов с цилиндрическим катодом:

1 — катод-мишень; *2* — анод; *3* — водоохлаждаемый корпус катода; *4* — магнитная система; *5* — изделия

Имеются разработки цилиндрических магнетронных систем распыления с коаксиально расположенными электродами. Эти системы выполняются с внутренним или внешним расположением мишени относительно цилиндрического катода (рис. 14, *в*, *г*).

На рис. 14, *в* показана схема магратрона, катод которого выполнен в виде цилиндра с двумя дисками по торцам. Магнитное поле создается с помощью электромагнитных катушек, охватывающих внешнюю поверхность катода и держателя изделий. Благодаря тому, что магнитные силовые линии направлены параллельно поверхности цилиндрического катода,

увеличивается осцилляция электронов вдоль поверхности катода между его торцевыми дисками, в результате чего значительно повышается степень ионизации молекул рабочего газа. Однако плотность ионного тока вдоль поверхности катода неравномерна, что приводит к неравномерному распылению мишени на катоде. Наибольшая эрозия наблюдается в средней части цилиндрической мишени, наименьшая — около торцевых дисков катода [63, 64].

При внутреннем расположении держателя изделий (рис. 14, *г*), который одновременно является анодом, магнитный блок *4* располагается снаружи катода *1*, а распыление материала происходит с внутренней поверхности катода на наружную поверхность изделия. При расположении магнитной системы в полости катода распыление происходит с наружной поверхности катода на внутреннюю полость держателя изделий, например барабана (рис. 14, *д*).

Отличительной особенностью магратронов с коаксиально расположенными электродами является высокий коэффициент использования материала.

При помощи магратронов с цилиндрическим катодом можно наносить пленки на внешние и внутренние поверхности труб, на протяженные детали сложной конфигурации, проволоку, балки и т. п.

Магратроны с коническим катодом

Основные недостатки цилиндрических магратронов (рис. 14, *а*, *б*) устранены в магратроне с конической мишенью (рис. 15, *а*). Кольцевая коническая мишень в этом устройстве вставляется без дополнительных креплений в кольцевую полость катода с водяным охлаждением, здесь осуществляется косвенное охлаждение мишени при ее термическом расширении. В центральной части располагается охлаждаемый анод, на который может быть подано положительное напряжение смещения. Магнитная система и все конструктивные элементы магратрона монтируются в заземленном корпусе, который является дополнительным анодом системы [65]. Большим эксплуатационным достоинством этой конструкции является легкая смена мишени.

Так как зона эрозии в конической мишени расположена в наиболее «толстой» ее части, то магратрон обладает большим ресурсом эксплуатации мишени. По сравнению с магратроном, приведенным на рис. 14, *а*, *б*, в этом устройстве магнитная система более эффективна, что позволяет значительно повысить плотность тока в зоне эрозии мишени, а потому и скорость распыления. Эффект перераспыления здесь практически незначителен.

При использовании магратрона с конической мишенью для групповой обработки изделий необходимо использовать планетарные или другие методы сложного перемещения изделий относительно источника нанесения пленок. Эти устройства распыления часто используются взамен электронно-лучевых

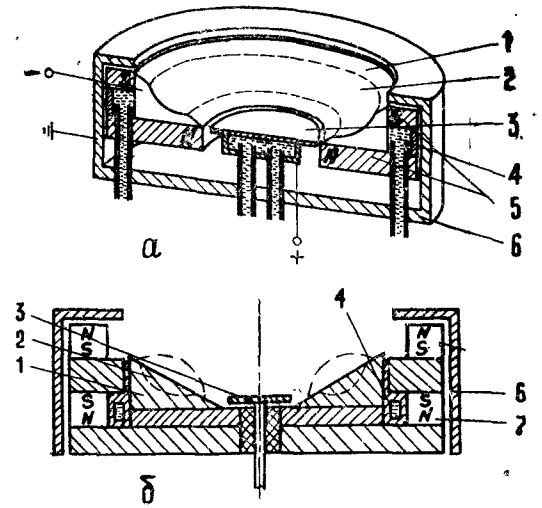


Рис. 15. Принципиальные схемы магратронов с конической мишенью:

1 — мишень; *2* — зона эрозии; *3* — анод смещения; *4* — катод; *5* — магнитная система, *6* — заземленный анод; *7* — магнитная система

испарителей в промышленных установках для нанесения пленок.

Этот тип магратронов обеспечивает удовлетворительное распределение толщины пленок на неподвижных изделиях диаметром менее диаметра зоны эрозии магратрона и на расстоянии, равном указанному диаметру. Кроме того, распыление с конической мишени обеспечивает хорошее покрытие ступенек на рельефных подложках (с коэффициентом покрытия 0,5 и более).

Недостатком магратрона с конической мишенью является сложность конструктивного исполнения магнитной системы, которая обеспечивала бы строгую фокусировку магнитных силовых линий между полюсными наконечниками. Магнитная система, выполненная на основе электромагнитной катушки с магнитопроводами, не отвечает этому требованию, так как на внешнем полюсном наконечнике магнитное поле рассеянное и значительная часть его силовых линий не проходит через поверхность мишени.

С помощью дополнительной магнитной системы, расположенной непосредственно под анодом *6*, как это сделано в

устройстве на рис. 15, *б*, можно добиться строгой фокусировки [65].

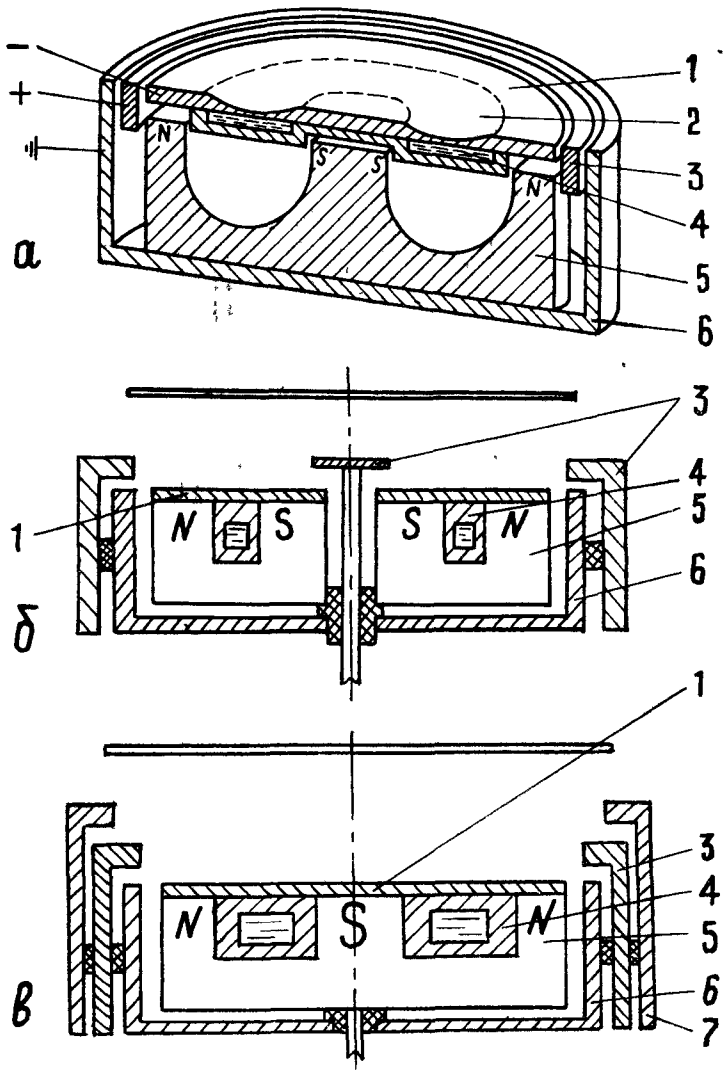


Рис 16 Принципиальные схемы планарных магратронов.
1 — мишень; *2* — зона эрозии, *3* — анод, *4* — водоохлаждаемый корпус катода, *5* — магнитная система, *6* — заземленный экран, *7* — дополнительный электрод с отрицательным потенциалом

Планарные магратроны

Технически наиболее просто создать магратрон с плоской мишенью. Типичная конструкция такого планарного магратрона с дисковой плоской мишенью представлена на рис. 16, *а*. Магнитная система такого устройства может быть выполнена или на основе электромагнитной катушки [66], или из постоянных магнитов и располагается под нераспыляемой поверхностью мишени в водоохлаждаемом корпусе катода [67]. Магнитные системы на основе электромагнитных катушек наиболее рационально применять при экспериментальных исследовательских работах, чтобы управлять индукцией магнитного поля над распыляемой поверхностью мишени для выбора оптимального значения.

В промышленных условиях наиболее предпочтительно использовать постоянные магниты. Магнитные системы на основе электромагнитных катушек требуют постоянного и стабилизированного электропитания, изоляции относительно катода, собственного охлаждения.

Электромагнитные катушки громоздки и металлоемки. Из-за большого газовыделения от сильно развитой поверхности катушек их не размещают внутри вакуумных систем.

Постоянные магниты лишены этих недостатков, а кроме того, отдельные магниты позволяют более просто создавать сложные формы магнитных систем и, соответственно, зон эрозии на поверхности мишени.

Планарные протяженные магратроны с постоянными магнитами могут быть выполнены больших габаритов (например, длина 610 и ширина 160 мм) и используются для нанесения пленок в вакууме на поверхности с большой площадью. Иногда такие распылительные системы размещаются в рабочих камерах последовательно одна за другой, т. е. многосекционно. Это способствует повышению производительности оборудования.

В планарных магратронах благодаря совершенной магнитной ловушке электронов создаются наиболее высокие плотности тока распыления и достигаются наибольшие скорости распыления.

При нанесении покрытия с помощью магратронов возможно образование дефектов в полупроводниковых приборах из-за бомбардировки подложки высокоэнергетическими ионами и электронами, не участвовавшими в процессе ионизации. Для улавливания таких электронов на анод магратрона подается положительное смещение напряжения от 30 до 100 В. Кроме того, для отражения высокоэнергетических электронов в магратроны вводятся дополнительные электроды (аноды) (рис. 16, *б*). Эти электроды устанавливаются над мишенью, где магнитные силовые линии перпендикулярны ее поверхности.

Для устранения бомбардировки подложки высокоэнергетическими ионами над поверхностью положительного анода размещается дополнительный улавливающий ионы катод (рис. 16, *в*) [68].

Магратроны с подвижным магнитным полем

Коэффициент использования материала мишени в магратронах, который составляет ~30%, повышают различными техническими приемами. Для увеличения площади эрозии мишени в устройстве (рис. 17, *а*) использована дополнительная электромагнитная катушка, охватывающая концентрично распыляемую мишень [69, 70].

Магнитная система магратрона выполнена на базе постоянных магнитов *1* и создает над поверхностью мишени *3* неоднородное магнитное поле *2* арочной конфигурации. Переменное магнитное поле, создаваемое электромагнитной катушкой *4*, перпендикулярно поверхности мишени. Наложение переменного магнитного поля приводит к периодической деформации магнитного поля арочной конфигурации, как это показано на рис. 17, *б*, *в*. В результате этого происходит симметричное смещение области максимальной эрозии *5*. Таким образом в магратроне достигается равномерная эрозия *6* мишени практически по всей площади между полюсными наконечниками постоянных магнитов. Многоячеистая электромагнитная система, соединенная с источником переменного тока, позволяет также увеличить зону равномерного распыления мишеней (рис. 17, *г*). Очень разнообразны конструкции магратронов, в которых увеличение площади эрозии достигается перемещением магнитной системы под поверхностью мишени [71]. В этом случае магнитная система выполняется, как правило, на базе постоянных магнитов. Перемещением магнитной системы под распыляемой поверхностью мишени создается подвижное магнитное поле арочной конфигурации. Вместо типичного замкнутого рисунка эрозии с наличием распыляемых и нераспыляемых участков на мишени, эти магратроны обеспечивают почти равномерную эрозию практически по всей поверхности мишени, что повышает

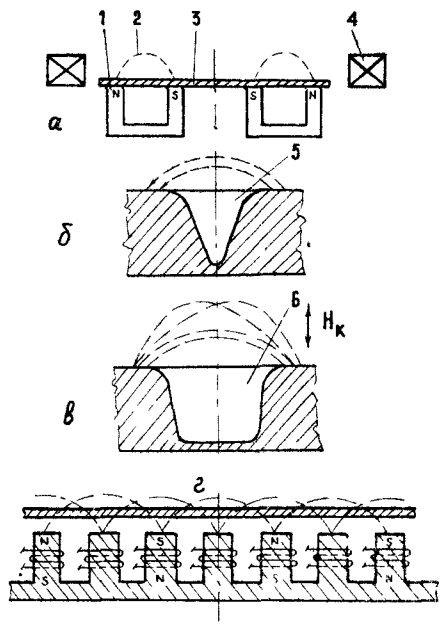


Рис. 17. Принципиальные схемы магратронов с переменным магнитным полем

эффективность использования мишени и, следовательно, снижает стоимость распыляемого материала, увеличивает срок службы мишени, снижает тепловую нагрузку. Кроме того, с помощью таких магратронов достигается значительное повышение равномерности конденсации распыляемого материала мишени на изделии. Во многих случаях при этом нет необходимости в перемещении изделий относительно мишени магратрона.

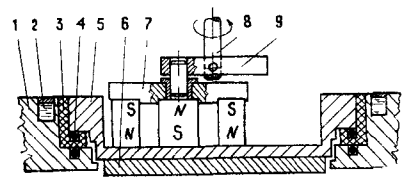


Рис. 18. Принципиальная схема планарного магратрона с подвижной магнитной системой

Несмотря на указанные преимущества, эти магратроны конструктивно более сложны. Значительно усложнена система крепления и охлаждения мишени из-за присутствия подвижной магнитной системы, увеличены габариты и масса.

Одна из принципиальных конструктивных схем такого планарного магратрона представлена на рис. 18. К аноду *1*, охлаждаемому водой *2*, через изолирующую прокладку *3*, изготовленную из фторопласта, вакуумно-плотно с помощью резиновых колец *4* присоединяется катодный блок *5* с мишенью *6*. В полости катода размещен подвижный магнитный блок *7*. Движение магнитному блоку сообщается от вала *8* через эксцентриковый механизм *9*. Мишень к катоду припаивается с помощью специального легкоплавкого припоя [71].

Вращение или возвратно-поступательное перемещение магнитной системы обеспечивает равномерное распыление почти всей поверхности дисковой мишени *1* в плоском магратроне или цилиндрической мишени *2* или *3* в магратроне с полым катодом (рис. 19, *а*). Можно вращать не магнитную систему, а распыляемую мишень, однако это техническое решение значительно усложняет конструкцию магратронов. Та-

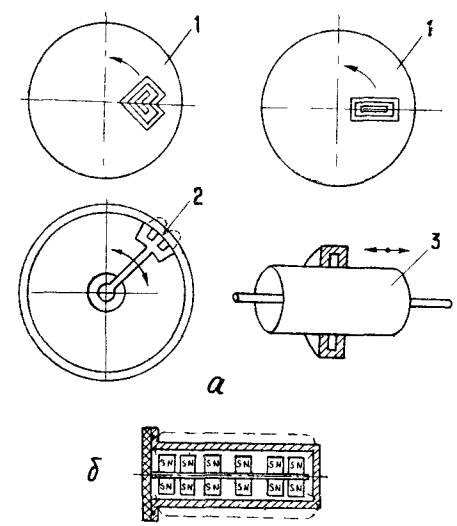


Рис. 19. Модификация магратронов с увеличенной площадью распыления мишени

кой метод распыления может найти свое применение при очистке методом ионной бомбардировки больших поверхностей изделий, выполненных в виде дисков, листов, труб и т. д. Значительное увеличение площади равномерного распыления в магратронах достигается и с помощью стационарных магнитных систем. В этом случае магнитная система собирается из постоянных магнитов в определенной последовательности и при определенном расстоянии между магнитами, как, например, это сделано в цилиндрическом магратроне на рис. 19, *б*.

Охлаждение мишеней в магратронах

Значительные плотности тока на поверхности распыляемых мишеней в магратронах накладывают жесткие требования по отводу тепла от разогреваемого материала мишеней. Недостаточно эффективное охлаждение мишени приводит к перегреву ее на несколько сот градусов, что влечет за собой коробление ее поверхности, неравномерности скорости распыления, газовыделению, изменению состава сплавных мишеней, термическому испарению с перегретых участков.

Преимущество магратронов — небольшой нагрев подложек, однако недостаточно эффективное охлаждение мишеней может свести его на нет.

В магратронах с неподвижной магнитной системой мишень наиболее интенсивно разогревается в ярко выраженной зоне эрозии, что приводит к неравномерному разогреву всей мишени. Поэтому наиболее распространенный метод охлаждения мишени при креплении винтами к водоохлаждаемой поверхности корпуса — катода для магратронов не эффективен. В магратронах наиболее эффективно непосредственное водяное охлаждение. Для этого под зоной эрозии между полюсными наконечниками магнитной системы предусмотрен канал для циркуляции охлаждающей жидкости — воды. При креплении мишени к корпусу катода уплотнения герметично отделяют область циркуляции воды от вакуумного объема.

Однако этот способ охлаждения мишени имеет серьезные недостатки. Возможен прорыв мишени в зоне эрозии по мере ее распыления, в результате чего охлаждающая вода попадает в вакуумный объем. По мере уменьшения толщины мишени в зоне эрозии возможна диффузия воды в зону разряда через микропоры в материале мишени или деформация мишени под давлением воды. Для исключения этих неблагоприятных моментов при работе магратрона распыление мишени заканчивают при достижении глубины эрозии не более 1/2—3/4 толщины мишени. Как правило, ресурс мишени при этом небольшой.

Часто мишень к водоохлаждаемому корпусу-катоду приклеивается. Этот способ универсален, так как можно подобрать состав клея, в сущности, для любых металлов.

Основной недостаток этого способа заключается в том, что наличие небольших неприкрепленных участков может привести к появлению областей локального перегрева («горячих пятен»), которые в свою очередь могут вызвать разрушение всего клеевого соединения или растрескивание мишени. Кроме того, при неэффективном охлаждении или низкой теплопроводности водоохлаждаемого корпуса-катода клеевая прослойка перегревается и увеличивается ее газовыделение.

Надежным и эффективным способом крепления мишени является пайка. При этом обеспечивается хороший тепловой контакт и возможность использования припоя с достаточно высокой точкой плавления. Для более прочного сцепления припоя с мишенью и корпусом-катодом наносится соответствующий подслой металлов. Часто в качестве припоя используются олово, индий или их сплав. Эти металлы имеют низкую точку плавления (232 °С для олова, 156 °С для индия, 117 °С для эвтектики олово — индий) и высокий коэффициент теплопроводности (~60 и 25 Вт/м · К при комнатной температуре).

Для охлаждения мишени можно использовать в качестве припоя сплав Вуда, который переходит в жидкое состояние при подаче в катод горячей воды.

Основные недостатки крепления мишеней с помощью клеев и припоев заключаются в сложности замены отработанных мишеней (для клеев и припоев с температурой плавления более 100 °С) и влиянии на состав газовой среды вакуумного рабочего объема (для клеев и легкоплавких припоев). Поэтому во многих случаях предпочтение отдается конструкциям магратронов, в которых мишень находится в плотном и надежном контакте с водоохлаждаемым корпусом-катодом и легко снимается. Эти требования удовлетворяются в магратронах с конической (рис. 15) и цилиндрической (рис. 14, *а*, *б*) мишенями. Нагрев и термическое расширение материала мишеней в этих устройствах распыления способствует более плотному соприкосновению поверхности мишени с водоохлаждаемым корпусом-катодом.

УСТАНОВКИ С МАГНЕТРОННЫМИ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Классификация

Основным классификационным признаком, принятым в данном обзоре, является режим работы установки, который определяется уровнем совмещения рабочих (нанесение по-

крытия) и холостых операций. По этому признаку установки условно можно разделить на три типа: периодического, полунепрерывного и непрерывного действия. В табл. 4 приведены и другие типовые признаки классификации установок вакуумного нанесения тонких пленок.

Установки периодического действия (УПД) характеризуются прерывистостью технологического процесса, в котором рабочие и холостые операции обработки изделий не совмещены во времени. Установки полунепрерывного действия (УПНД) характеризуются прерывистостью технологического процесса, в котором рабочие и холостые операции частично совмещены во времени. Установки непрерывного действия (УНД) характеризуются непрерывностью технологического процесса, в котором рабочие и холостые операции полностью совмещены во времени.

Таблица 4

Основные признаки классификации	Тип установок			
	УПД		УПНД	УНД
Уровень совмещения во времени рабочих и холостых операций	Не совмещены		Частично совмещены	Полностью совмещены
Характер воздействия источника нанесения пленок на изделие	Периодический		Периодический	Непрерывный
Наличие шлюзовой системы (ШС) загрузки-выгрузки изделий	Нет	Есть	Есть	
Характер перемещения изделий в зоне нанесения пленок	Отсутствует или периодический	Периодический	Периодический или непрерывный	
Сообщение рабочей камеры с атмосферой	Полное	Не сообщается	Не сообщается	
Характер откачки рабочей камеры	Периодический	Непрерывный	Непрерывный	
Характер откачки ШС		Периодический или непрерывный	Периодический или непрерывный	

Установки периодического действия

УПД с магратронами создаются, как правило, на базе серийных универсальных установок. По существу, все изменения состоят в замене электронно-лучевого испарителя на магратрон, который устанавливается на более близком расстоянии от подложкодержателя. В установках с диффузионными насосами предусматриваются дросселирующие устройства, обеспечивающие оптимальный режим работы откачной системы в рабочей области давлений. На рис. 20, *а* показано внутрикамерное устройство такой установки с кольцевым магратроном и планетарным подложкодержателем. Иногда ставятся не один, а несколько магратронов (рис. 20, *б*). Это обеспечивает нанесение многослойных покрытий в едином вакуумном цикле [72, 73].

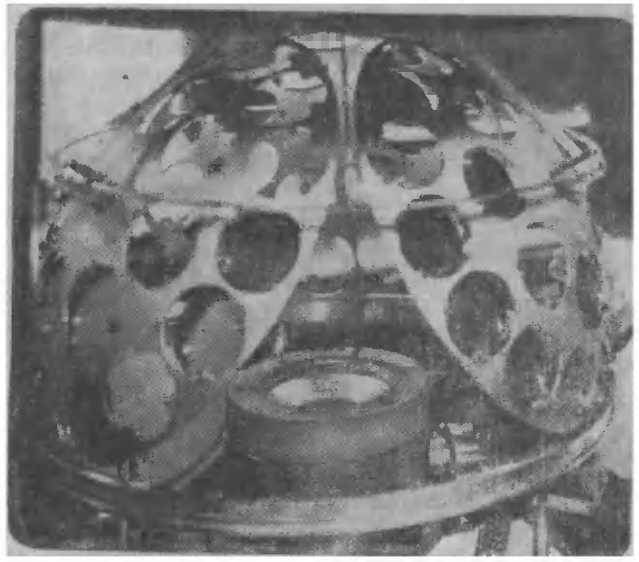
В УПД с магратронами большое распространение получили закрытые ШС, обычно выполненные в виде одной шлюзовой камеры, отделяемой от рабочей камеры герметичным затвором. При проведении процесса нанесения покрытия в рабочей камере шлюзовая камера не загружена и находится в ожидании возвращения обработанных изделий. В рабочей камере поддерживается постоянное давление, необходимое для проведения рабочего процесса. Поскольку рабочая камера не вскрывается на атмосферу, то устраняется и возможность ее загрязнения. Загрязнения вносятся только изделиями, их держателями и испаряемым или распыляемым веществом. Кроме того, поддерживается рабочее состояние источника нанесения пленок — мишени магратрона, что способствует сокращению времени подготовки рабочего процесса обработки изделий.

Откачка шлюзовой камеры обычно производится до давления, равного давлению в рабочей камере, или до более низкого давления с целью уменьшить загрязнение атмосферы рабочей камеры при сообщении объемов. Однако во многих случаях, чтобы упростить вакуумную систему, откачку шлюзовой камеры производят только форвакуумным насосом. Тогда внесение загрязнений ограничивают, уменьшая объем шлюзовой камеры, хотя это уменьшает количество загружаемых изделий и снижает производительность.

Этот технический прием используется и при высоковакуумной откачке шлюзовой камеры, чтобы сократить время откачки. При значительном увеличении давления в рабочей камере при сообщении ее со шлюзовой камерой с более высоким давлением часто нарушаются условия поддержания рабочего состояния источника нанесения покрытия. Этот недостаток исключается благодаря плавному сообщению между собой объемов рабочей и шлюзовой камер путем постепенной разгерметизации шлюзового затвора или благодаря сообщению этих объемов через обводной трубопровод с уменьшенным диаметром и встроенным клапаном.

Часто нагрев и охлаждение изделий осуществляют в шлюзовых камерах, что позволяет поддерживать более чистые условия в рабочей камере и уменьшить время охлаждения изделий путем напуска в шлюзовую камеру инертного газа.

Однако в УПД с ШС не совмещены рабочие и холостые операции, и поэтому обеспечивается лишь периодическая об-



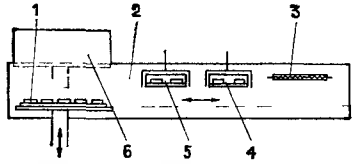
а

б

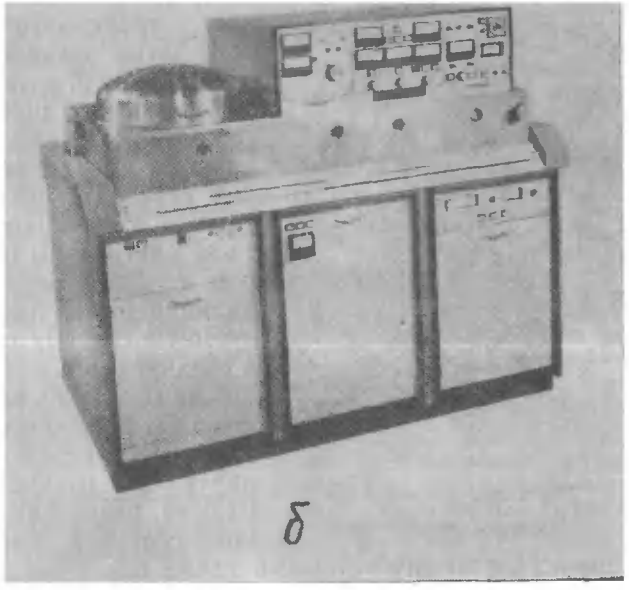
Рис 20 Общий вид внутрикамерного устройства вакуумной установки периодического действия с планетарной системой перемещения изделий с одним (*а*) и тремя (*б*) магратронами

работка изделий Основным их достоинством является относительно высокое постоянство состава остаточной атмосферы в рабочей камере, поддержание в рабочем состоянии источника нанесения покрытия, что обеспечивает высокое качество покрытия, сокращение вспомогательного рабочего времени подготовки источника и повышение производительности

Для повышения производительности подобных установок, как и обычных УПД, прежде всего необходимо увеличивать размер партии одновременно загружаемых и обрабатываемых



а



б

Рис 21 Принципиальная схема (*а*) и общий вид (*б*) вакуумной установки периодического действия с одной шлюзовой камерой и двумя магратронами

изделий Так, например, фирма MRC (США) выпускает установку типа S-900 периодического действия со шлюзовой загрузкой, исключающей сообщение рабочей камеры с атмосферой (рис 21) Групповой подложкодержатель *1* с подложка-

ми через шлюз *6*, периодически открываемый на атмосферу, поступает в рабочую камеру *2* и проходит под нагреватель *3*, а затем возвратно-поступательно перемещается под двумя последовательно установленными магратронами *4* и *5*. Этим обеспечивается равномерность покрытия. Съем готовых пластин происходит через этот же шлюз *6* [74].

УПД с ШС часто имеют большой объем рабочей камеры и выполняются многопозиционными. Повышение производительности на этом виде оборудования часто достигается благодаря большой разнице в объемах между шлюзовой и рабочей камерами. В результате этого время откачки шлюзовой камеры значительно меньше, чем если бы рабочая камера периодически сообщалась с атмосферой при загрузке-выгрузке изделий.

В многопозиционной УПД с ШС (рис. 22) оригинально решена вакуумная система и устройство внутрикамерного транспортирования изделий [75, 76]. Внутрикамерное транспортирующее устройство выполнено в виде кольца *2*, которое перемещается на роликах *1* через пять секций, находящихся между внутренней стенкой *3* вакуумной камеры и сообщающимся с ней внутренним цилиндром *4*. Этот внутренний цилиндр имеет высоковакуумную систему откачки и соединен со всеми пятью секциями, три из которых содержат распылительные системы *5*, через дросселирующие отверстия *6*. Секции разделены двойной системой перегородок *7*, промежуток между которыми также откачивается этой же вакуумной системой. Такое построение позволяет одновременно откачивать все секции при различных давлениях в них и осуществлять высоковакуумную блокировку их друг от друга.

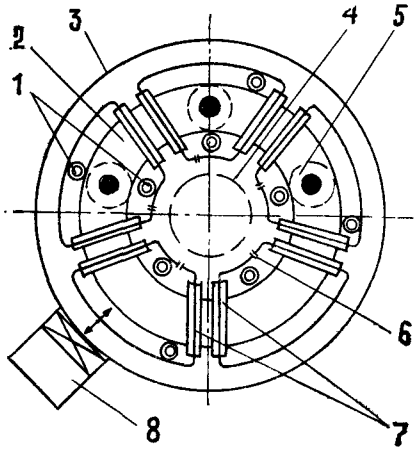


Рис. 22. Принципиальная схема многопозиционной вакуумной установки периодического действия с одной шлюзовой камерой

Как видно из принципиальной схемы этой УПД, в ней использована комбинированная ШС. Она состоит из закрытой ШС в виде шлюзовой камеры *8* загрузки-выгрузки изделий и открытой ШС между пятью секциями рабочей камеры установки.

Повышению производительности УПД с ШС способствуют следующие мероприятия:

— сокращение холостого времени путем уменьшения объемов загрузочно-разгрузочных камер и оснащения их высокопроизводительными откачными средствами;

— увеличение партии загружаемых изделий посредством групповых носителей и магазинных устройств;

— дифференцирование рабочих операций при загрузке ШС магазинными устройствами путем совмещения вспомогательных рабочих операций с основными на нескольких позициях в рабочей камере, а также проведение вспомогательных рабочих операций в шлюзовых камерах;

— сокращение времени вспомогательных рабочих операций, например, интенсификацией процесса охлаждения изделий в шлюзовых камерах напуском инертных газов.

Установки полунепрерывного действия

В УПНД используется одна шлюзовая камера для частичного совмещения рабочих и холостых операций. Шлюзовая камера *1* (рис. 23, *а*) имеет увеличенный объем для размещения в ней двух групповых подложкодержателей *2* [77]. При нанесении покрытия в рабочей камере *5* на один из подложкодержателей *6* второй проходит предварительную обработку над нагревателем *7* в шлюзовой камере, а затем приподнимается с транспортирующих роликов *8* специальным устройством *3*, установленным на колпаке *4* шлюзовой камеры. Процесс загрузки-выгрузки держателей в шлюзовой камере производится при нанесении покрытия в рабочей камере. Можно значительно повысить производительность установки, если время загрузки-выгрузки подложкодержателей, откачки шлюзовой камеры и предварительной обработки будет меньше или равно времени нанесения пленок в рабочей камере.

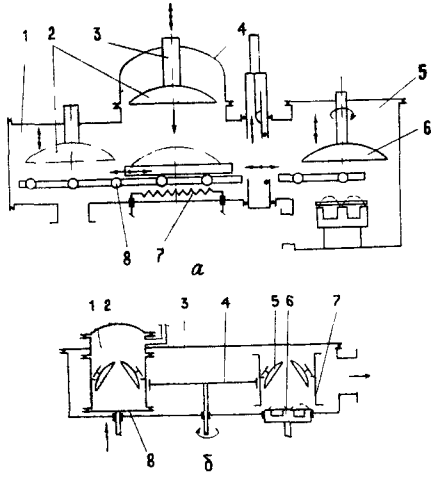


Рис. 23. Принципиальные схемы вакуумных установок полунепрерывного действия с одной шлюзовой камерой:
а — однопозиционная установка, *б* — многопозиционная установка

Недостаток этой установки состоит в большом объеме шлюзовой камеры, что увеличивает непроизводительное время ее вакуумирования.

Увеличения производительности и степени совмещения рабочих и холостых операций в УПНД часто достигают дифференцированием, т. е. разделением рабочих и холостых операций на несколько позиций в ряде рабочих и шлюзовых камер. Можно, например, почти полностью совместить время загрузки-выгрузки изделий, откачки шлюзовой камеры, а также время вспомогательных операций обработки изделий с временем основной рабочей операции — нанесения покрытия на изделия в УПНД, приведенной на рис. 23, *б*. Для этого установка имеет одну шлюзовую камеру *1*, а рабочая камера *3* — устройство транспортирования в виде карусели *4* с тремя цилиндрами *7*, в которых размещаются групповые подложкодержатели *5*. Загрузка-выгрузка, нагрев и нанесение покрытия из магратрона *6* на изделия производятся соответственно на трех позициях в рабочей камере. В позиции загрузки-выгрузки рабочая камера на верхней стенке имеет открывающуюся крышку *2* и на нижней стенке — подвижную плиту *8*. В процессе перемещения плиты вверх производится герметизация внутренней полости цилиндра относительно всего объема рабочей камеры [78]. В это время осуществляется напуск воздуха, загрузка-выгрузка изделий, откачка этой полости до необходимого давления. Как видно, в этой УПНД применена закрытая ШС, в которой каждый из цилиндров карусели периодически выполняет роль подвижной части шлюзовой загрузочно-разгрузочной камеры. Технологический цикл нанесения покрытия прерывается в этой установке на время поворота цилиндров из одной позиции в другую.

В УПНД используются и две шлюзовые камеры, одна из которых служит только для загрузки групповых подложкодержателей, а вторая — для выгрузки.

Типичная установка такого типа с линейной компоновкой (рис. 24, *а*) состоит из двух шлюзовых камер *1* и *9*, камеры нагрева *3* подложек, двух камер осаждения *5* и *8* с двумя магратронами *6* и *7*, что позволяет наносить двухслойные пленки на подложки *4* [79]. В этой установке распыление материала из магратронов осуществляется снизу вверх. Время выгрузки обработанных изделий из шлюзовой камеры, загрузки нового держателя и откачки меньше времени обработки изделий в рабочих камерах. Рабочий процесс нанесения покрытия на изделия прерывается на время смены группового держателя в зоне нанесения покрытия.

Большей производительностью обладают УПНД, в которых загрузка-выгрузка в двух шлюзовых камерах ведется с помощью магазинов с групповыми держателями изделий (рис. 24, *б*) [80]. По краям установки расположены шлюзовые

камеры — загрузочная *2* и разгрузочная *6* с магазином подложкодержателей *1*. Между ними и рабочей камерой *5* расположены шлюзовые затворы *3*, которые в процессе работы установки находятся в открытом состоянии, обеспечивая свободный проход подложкодержателей из загрузочного шлюза в рабочую камеру и из нее в разгрузочный шлюз. В рабочей камере размещены нагреватель подложек *4* и два магратрона *7*. Откачка рабочей камеры осуществляется с помощью диффузионного насоса, откачка шлюзов — агрегатами с насосами Рутса.

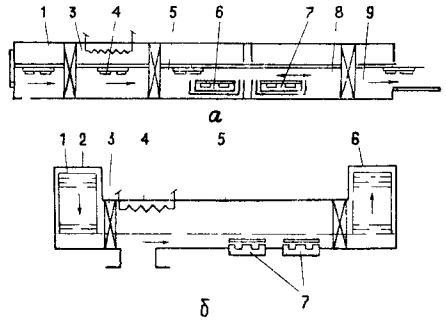


Рис. 24. Принципиальные схемы многопозиционных вакуумных установок полунепрерывного действия с двумя шлюзовыми камерами

а — с единичной загрузкой группового подложкодержателя, *б* — с магазинной загрузкой-выгрузкой групповых подложкодержателей

Как видно, в УПНД с магратронами наибольшее распространение получили закрытые ШС.

Установки непрерывного действия

Появление и развитие магратронов, обеспечивающих большие скорости распыления материалов, дало новый импульс для разработки установок непрерывного действия. В этих установках все технологические и вспомогательные операции полностью совмещены, что обеспечивает высокую производительность и стабильность вакуумных условий, так как при транспортировании изделий процесс осаждения пленок не прерывается.

На рис. 25, *а* приведена УНД с закрытой ШС, выполненной с одной загрузочной *2* и одной разгрузочной *4* шлюзовыми камерами. Магазин *3* с изделиями поступает сначала в шлюзовую камеру загрузки *2*. После герметизации и откачки этой камеры магазин начинает перемещаться в объем рабочей камеры *1*. При совмещении первого изделия в магазине с уровнем карусели *5*, расположенной в зоне нанесения покрытия, начинается перегрузка изделий с помощью специального возвратно-поступательного механизма на карусель рабочей камеры. На карусели одновременно может обрабатываться несколько изделий.

После заполнения всех позиций на карусели изделиями возвратно-поступательный механизм перегрузки осуществля-

ет за каждый ход загрузку одного необработанного изделия из ячейки магазина на карусель и выгрузку изделия с нанесенным на его поверхность слоем материала в эту же, освободившуюся ячейку магазина. При выходе магазина из загрузочной шлюзовой камеры *2* последняя герметизируется от рабочей камеры, в нее напускается воздух, загружается новый магазин с необработанными изделиями и производится ее откачка. В это время магазин из рабочей камеры постепенно перемещается в шлюзовую разгрузочную камеру. После откачки шлюзовой загрузочной камеры до необходимого давления магазин из нее перемещается в рабочую камеру до совмещения с предыдущим магазином, в котором еще не все изделия обработаны.

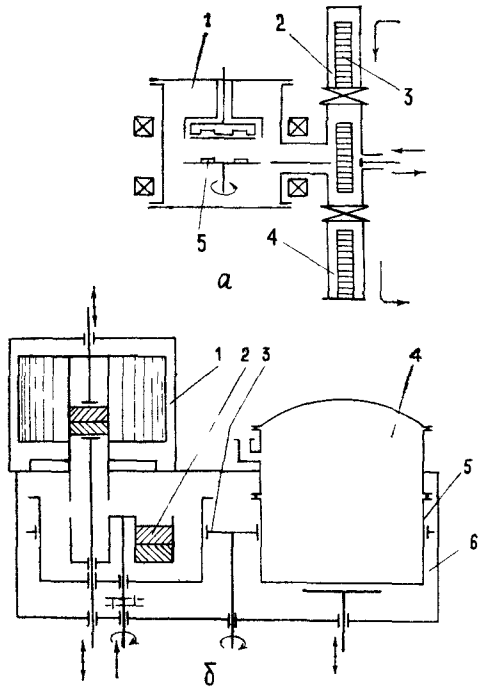


Рис 25 Принципиальные схемы вакуумных установок непрерывного действия с двумя (*а*) и одной (*б*) шлюзовыми камерами

При полном выходе магазина из зоны перегрузки изделий он перемещается в шлюзовую камеру выгрузки, из которой после ее герметизации от рабочей камеры и напуска воздуха производится выгрузка магазина с обработанными изделиями. Вакуумирование и сообщение этой шлюзовой камеры с рабочей производится до момента входа в нее следующего магазина. Таким образом обеспечивается постоянный ритм загрузки и выгрузки изделий из зоны нанесения покрытия.

Непрерывность технологического процесса нанесения покрытия в УНД может быть обеспечена и при использовании одной шлюзовой загрузочно-разгрузочной камеры. На рис 25, *б* приведена УНД, которая является усовершенствованным вариантом УПНД, приведенной на рис. 23, *б*. УНД содержит между шлюзовой загрузочно-разгрузочной камерой *4* и рабочей камерой *1* вспомогательную высоковакуумную шлюзовую камеру *6*. В этой камере размещена карусель *3*, на которой закреплены четыре цилиндра *5* Внутри цилиндров располагаются магазины с изделиями *2*. На одной позиции высоковакуумной шлюзовой камеры располагается загрузочно-разгрузочная шлюзовая камера *4* для загрузки и выгрузки магазина с 48 подложками, на другой производится нагрев и обезгаживание подложек, на третьей — перемещение подложек в рабочую камеру с цилиндрическим магратроном и из нее, на четвертой — охлаждение изделий [81, 82].

Благодаря дифференцированию операций нанесения покрытия на изделия и групповой загрузке производительность установки не ограничена временем загрузки-выгрузки и откачки загрузочно-разгрузочной шлюзовой камеры, а также перемещения цилиндров из одной позиции в другую. При этом наличие высоковакуумной шлюзовой камеры с предварительной очисткой подложек обеспечивает более чистые условия нанесения покрытий в рабочей камере, чем в УПНД, приведенной на рис. 23, *б*.

В УНД получили распространение открытые и полуоткрытые ШС. Среди существующих УНД для вакуумного нанесения пленок с этими ШС можно выделить два основных и характерных конструктивных варианта. УНД с неразрывным транспортным каналом; УНД со шлюзовыми загрузочными и выгрузочными устройствами (ШЗУ, ШВУ).

УНД с неразрывным транспортным каналом для перемещения изделий состоит обычно из нескольких камер (рабочих и шлюзовых), соединяющихся между собой и с атмосферой межкамерными каналами [83—87]. Зазоры между этими каналами и элементами транспортирующего устройства обеспечивают свободное движение последнего и создают частичное сопротивление натеканию газа со стороны атмосферы. Каждая камера снабжена средством откачки потока воздуха, поступающего через эти зазоры. Таким образом ступенчато понижается давление в последующих камерах. Число камер зависит от величины зазоров, от мощности откачных средств, от вида процессов, проводимых в шлюзовых камерах (нагрев, очистка поверхности, обезгаживание).

Если необходимо свести к минимуму количество газа, натекающего в рабочую камеру, то на входе и выходе рабочей камеры поддерживают более высокий вакуум. При наличии нескольких таких рабочих камер или в случае необходимости предотвращения смешивания газов в различных камерах между последними тоже размещают камеры с более разреженным пространством. Если в рабочей камере необходимо иметь сверхвысокий вакуум, то число шлюзовых камер увеличивают, чтобы свести к минимуму натекание и достаточно полно обезгазить транспортирующее устройство с изделиями. Однако такой тип установок в настоящее время находит все меньшее применение.

УНД с открытыми ШС и неразрывным транспортным каналом, используемые для нанесения покрытий на крупногабаритные изделия или групповые держатели, имеют существенные недостатки: много камер и, следовательно, большие габариты и высокая стоимость.

УНД с ШЗУ значительно более компактны, в них проще герметизировать рабочую камеру при выключении откачных средств установки. Для этого затвор размещают между ШЗУ и рабочей камерой (рис. 26). Непрерывная загрузка в этой

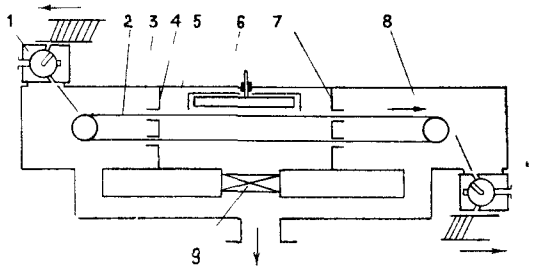


Рис. 26 Принципиальная схема вакуумной установки непрерывного действия со шлюзовыми загрузочно-разгрузочными устройствами роторного типа

установке осуществляется с помощью ШЗУ роторного типа *1* с одной ступенью откачки и одним пазом для размещения подложки. В ШЗУ применена полуоткрытая ШС. Откачка промежуточной ступени осуществляется механическим насосом с ловушкой. Подложки транспортируются внутри установки замкнутым гибким конвейером *2*, который скользит по охлаждаемым направляющим.

Рабочая камера *6* состоит из трех секций, разделенных между собой перегородками *4* с каналами для прохождения конвейера *2*, т. е. внутри рабочей камеры применена открытая ШС. При работе установки осуществляется непрерывная высоковакуумная откачка секции загрузки-выгрузки *3* и секции охлаждения-выгрузки *8*. Для высоковакуумной откачки секций нанесения слоев *5* открывается вакуумный затвор *9*, который соединяет ее с трубопроводами откачки крайних секций.

При нанесении пленок в секции нанесения покрытия устанавливается рабочее давление порядка $1—10^{-1}$ Па. В этом случае затвор секции закрывается и откачка рабочего потока газа ведется только через зазоры между конвейером *2* и каналами перегородок *4*, *7* рабочей камеры. Таким образом, в обеих крайних секциях поддерживается более высокий вакуум, чем в секции нанесения покрытия, что способствует поддержанию более чистой рабочей среды. Изменяя скорость

движения конвейера и режим работы системы нанесения пленок, можно изменять толщину пленки и производительность установки.

Известен еще ряд подобных УНД с ШЗУ с использованием комбинированных ШС. Подобного типа ШС могут быть использованы для разделения между собой нескольких рабочих и шлюзовых камер. В этом случае камеры имеют самостоятельные системы транспортирования подложек и вакуумной откачки. Загрузка и выгрузка подложек производятся с помощью таких же шлюзовых устройств, какие используются при перегрузке между камерами. В таких УНД можно поддерживать значительный перепад давлений между вакуумными камерами. Взаимное влияние камер незначительно.

Из проведенного анализа различных типов вакуумных установок с магратронами и с ШС видно, что они характеризуются большим разнообразием конструктивных решений и представляют собой наиболее эффективный и производительный вид оборудования.

Принцип шлюзования является неотъемлемым фактором, обеспечивающим полунепрерывный и непрерывный характер работы вакуумного оборудования, а также получение качественных покрытий с воспроизводимыми свойствами и характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В промышленное производство тонкопленочных элементов ИС интенсивно внедряется метод магнетронного распыления материалов, который становится одним из важнейших технологических методов получения пленок.

В одной из последних обзорных статей [54] это устройство названо «прекрасным образцом долгожданного высокоскоростного источника распыления». Делая замечания о том, что основа этого принципа исходит из работ Пеннинга (1939 г.), автор упомянутой статьи Р. Вейтс пишет: «Конструкция плоского магнетронного распылительного устройства являет собой пример ошеломляюще очевидного решения технологической проблемы, которая не поддавалась решению и осуществлению в течение более чем 30 лет».

В 60-х годах уделялось большое внимание развитию цилиндрических коаксиальных магнетронных систем, которые характеризовались большой неравномерностью распределения толщины осаждаемых пленок [4, 55—57]. Одновременно велись поиски путей к созданию новых эффективных распылительных устройств на основе разрядов в скрещенных элек-

трических и магнитных полях. Идея создания планарного магратрона витала в воздухе, и в начале 70-х годов были независимо предложены конструкции такого устройства в работах [58, 59] с использованием локализации разрядной плазмы магнитным полем арочной конфигурации с замкнутым дрейфом электронов.

К настоящему времени накоплен значительный опыт разработки и использования магратронов для решения различных технологических задач. Однако следует считать, что магратроны находятся в начальной стадии своего развития, и потому предоставляют широкий простор для технической фантазии исследователей и инженеров.

Многие вопросы, связанные с физическими процессами, происходящими в магратроне, еще не ясны. Это свидетельствует об отсутствии глубоких теоретических обобщающих исследований магратронов. Такое положение объясняется многообразием и сложностью взаимосвязанных и трудноразделимых для аналитических и экспериментальных исследований процессов, происходящих в магратроне, несмотря на его относительно простую конструктивную схему. Сложная цепь протекающих здесь процессов далеко еще не прослежена во всех своих звеньях. По существу, все публикации носят либо общий описательный характер, либо посвящены результатам экспериментальных исследований макроэффектов различных сторон работы магратронов.

Перспективная значимость магратронов оправдывает широкое развертывание исследовательских и конструкторских работ, направленных на создание новых модификаций, а также на совершенствование и оптимизацию этих устройств. Не трудно предвидеть, что в тонкопленочной технологии ближайшего будущего магратроны серьезно потеснят другие традиционные методы нанесения тонких пленок, особенно в промышленных установках полунепрерывного и непрерывного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aronson A., Weining S. In-line production magnetron sputtering. — Vacuum, 1977, v. 27, N 3, p. 151—153.
2. Schiller S., Heisig U., Goedicke K. On the use of ring cap discharges for high-rate vacuum coating. — Paper presented on Int. Conf. on Metallurgical Coatings. San Francisco, Calif. 1976. (Ротапринт).
3. Thornton J. A., Penfold A. S. Thin film processes. — N. Y.: Academic, 1978. — 263 p.
4. Thornton J. A. Magnetron sputtering: basis physics and application to cylindrical magnetrons. — J. Vac. Sci. Technol., 1978, v. 15, N 2, p. 171—177.
5. Wasa K., Haykawa S. Some features of magnetron sputtering. — Thin Solid Films, 1978, v. 52, N 1, p. 31—43.
6. Голант В. Е., Жилинский А. Г., Сахаров И. Е. Основы физики плазмы. — М.: Атомиздат, 1977. — 282 с.
7. Исследование стационарного разряда в скрещенных электрических и магнитных полях / А. И. Бабарицкий, А. А. Иванов, В. В. Северный, В. В. Шапкин. — Физика плазмы, 1977, т. 3, № 4. с. 894—899.
8. Куроедов К. А. Распыление в разряде с дрейфующими электронами. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1973, вып. 3(43), с. 87—90.
9. Fournier P. Sputtering: out of the Lab. and onto the Production Line. — Circuits Manufacturing, 1973, v. 13, N 8, p. 28—32.
10. Randex planar magnetron sputtering system / Sales information bulletin. — Изготовитель фирма Perkin Elmer Ultek Inc. [1976].
11. Lamont L. T., Turner F. T. The role of DC self-bias potential in the control of RF sputtering. — J. Vac. Sci. Technol., 1974, v. 11, N 1, p. 47.
12. Данилин Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование разряда в магнетронных системах ионного распыления. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1977, вып. 3(69), с. 37—44.
13. Данилин Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование магнетронных систем ионного распыления материалов. — Физика и химия обработки материалов, 1978, № 2, с.33—39.
14. McLeod P. S., Hartsough L. D. High-rate sputtering of aluminium for metallisation of integrated circuits. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, v. 14, N 1, p. 263—265.
15. Wu C. T., Kampwirth R. T., Hafstrom J. W. High-rate magnetron sputtering of high T_c Nb_3Sn films. — J. Vac. Sci. Technol., 1977, v. 14, N 1, p. 134—137.
16. Sputter-ring technology / Company Catalog. — Изготовитель фирма Airco Temescal Div. 1975. — 9 p.
17. Varian Vacuum Views / Company Catalog. — Изготовитель фирма Varian. 1977. — 4 p.
18. Hoffman D., Thornton J. Internal stresses in postmagnetron sputtered indium and molibdenum. — Thin Solid Films, 1977, v. 40, p. 355—363.
19. Aronson A. Continuous deposition of chrome-gold and chrome-copper utilising combined conventional RF diode and high-rate planar magnetron.— Le Vide, 1976, N 182, p. 176—179.

20 Rechnergesteuerter Zerstaubungsautomat VX MSS Pt 78 — Изготовитель фирма Balzers 1978 — 4 S
21 Albert P A, Guamien C R Influence of biased magnetron deposition parameters on amorphous Gd Co-Cu properties — J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 138—140
22 Hausma P A new method for fabricating niobium oxide barrier Josephson junctions — J Appl Phys 1974, v 45, N 3, p 1472—1473
23 Tao K L, Lin B J, Molzen W W Ni Fe films deposited by sputter gun and applications to bubble devices — Thin Solid Films, 1976, v 37, N 3, p 423—427
24 Clarke P J Magnetron DC reactive sputtering of titanium nitride and indium-tin oxide — J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 141—142
25 Joly J, Ranger J Depots de nitrure de tantale par pulverisation est odigue reactive a ledaide d'une cible magnetron — Le Vide, 1975, N 182, p 34—36
26 Nowicki R S Properties of RF sputtered Al_2O_3 films deposited by planar magnetron — J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 127—133
27 Schiller S, Heisigand V, Goedicke K Use of the ring gap plasmatron for high rate sputtering — Thin Solid Films, 1977, N 40, p 327—334
28 Urbanek K Magnetron sputtering of SiO_2 — an alternative to chemical vapor deposition — Solid State Technol, 1977, v 20, N 4, p 87—90
29 Salama C A T RF sputtered aluminium oxide films on silicon — J Electrochem Soc, 1970, v 117, N 7, p 913—919
30 Hartsough L D, McLeod P S High rate sputtering of enhanced aluminium mirrors — J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 123—126
31 Fraser D B, Cook H D Film deposition with sputter gun — J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 147—151
32 Kirov K L, Ivanov N A DC magnetron system for cathode sputtering — Vacuum, 1976, v 26, N 6, p 237—241
33 Hill R G Physical Vapor Deposition (Материалы фирмы Airco Temescal, Barkley), 1976, p 102—108
34 Vorous Van T Planar magnetron sputtering — a new industrial coating technique — SST, 1976, v 19, N 12, p 62—66
35 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, v 13, N 1, p 157—184
36 Jones R E Theories of the distribution of deposit from sputtered disk and rectangular electrodes — IBM J Res/Develop, 1972, v 16, N 1, p 27—34
37 Bindell J, Trisone T Step coverage from an extended sputtering source — Thin Solid Films, 1974, v 23, N 1, p 31—47
38 Trisone T, Bindell J Low voltage triode sputtering with a confined plasma Part 1 — geometric aspects of deposition — J Vac Sci Technol, 1974, v 11, N 2, p 519—523
39 Hurwitt S — Transactions of the conference on production sputtering (Materials Research Corp, Orangeburg) New York, 1974, p 31—38
40 Hoffman V High rate magnetron sputtering for metallizing semiconductor devices — Solid State Technol, 1976, v 19, N 12, p 57—61, 86
41 Ball D J Plasma diagnostics and energy transport of a DC discharge used for sputtering — J Appl Phys, 1972, v 43, N 7, p 3047—3057
42 Lamont L T High-rate magnetically enhanced sputter sources, their basic physics and operational characteristics — J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 2, p 122—125
43 Vossen G L Control of film properties by RF sputtering techniques — J Vac Sci Technol, 1971, v 8, N 5, p S12—S30
44 Soxman E J Current voltage relationships for inverted magnetron type, DC sputtering source — Proceedings of the 7-th International Vacuum Congress and 3 rd International Conference on Solid Surfaces, Vienna, 1977, p 198—202

45 Hosokawa N, Tsukada T, Misumi T Self sputtering phenomena in high rate coaxial cylindrical magnetron sputtering — J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 143—146
46 Clarke P J The S gun — a direct replacement for electron beam evaporation — SST, 1976, v 19, N 12, p 77—79
47 Данилин Б С Получение тонких слоев с помощью магнетронной системы ионного распыления — Зарубежная электроника, 1978, № 4, с 87—105
48 Schiller S, Heisig U, Goedicke K Electron beam evaporation and high-rate sputtering with plasmatron/magnetron systems — a comparison — Vakuum-Technik, Jg 27, N 2, S 51—55
49 Schiller S, Heisig U, Goedicke K Ionenplattieren — ein neues Verfahren der Vakuumbeschichtung — Vakuum Technik, 1976, Jg 25, N 3, S 65—72
50 Physik und Technik des Hochvakuums — Dunne Schichten / U Heisig, K Goedicke, P Vetters u a Dresden, 1978 (Ротапринт)
51 Schiller S, Heisig U, Goedicke K Alternating ion plating — a method of high rate ion vapor deposition — J Vac Sci Technol, 1975, v 12, N 4, p 858—864
52 Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы / Б С Данилин М В Какурин, В В Одиноков и др — Электронная техника Сер 3 Микроэлектроника, 1978, вып 2(74), с 84—87
53 Экспериментальное исследование пленок алюминия, осажденных в магнетронной системе ионного распыления / А Ф Андрушко, Б С Данилин, В Е Минайчев и др — Электронная техника Сер 3 Микроэлектроника 1978 вып 3(75), с 93—96
54 Waits R K Planar magnetron sputtering — J Vac Sci Technol, 1978, v 15, N 2, p 178—187
55 Gill W D, Kay E Efficient low pressure sputtering in a large inverted magnetron suitable for film synthesis — Rev Sci Instrum, 1965, v 36, N 3, p 277—282
56 Wasa K, Hayakawa S Sputtering in crossed electromagnetic field — IEEE Trans on Parts, Mater and Packaging 1967, v 3, N 3, p 71
57 Schiller S, Heisig U, Goedicke K The role of plasmatron / magnetron systems in physical vapor deposition techniques — Thin Solid Films, 1978, v 54, N 1, p 33—37
58 А с 426540 (СССР) Электроразрядное устройство для нанесения тонких пленок / В Е Минайчев, С И Мирошкин, Б В Денисов и др Опубл в бюл «Открытия Изобретения Промышленные образцы Товарные знаки», 1975, № 37
59 Riegert B P, Clarke P The sputter gun an automated deposition system for high volume thin films — Electronic Packaging and Production, 1973, v 2, N 2, p 85—90
60 Пат 3 878 085 (США) Cathode sputtering apparatus / John F Corbani
61 Пат 3 616 450 (США) Sputtering apparatus / Peter J Clarke
62 Пат 4 046 660 (США) Sputter coating with charged particle flux control / David Bruce Fraser
63 Пат 4 031 424 (США) Electrode type glow discharge apparatus / Alan S Penfold
64 Пат 4 126 530 (США) Method and apparatus for sputter cleaning and bias sputtering / John A Thornton
65 Пат 4 060 470 (США) Sputtering apparatus and method / Peter J Clarke
66 Пат 1 453 377 (Англия) Sputtering apparatus and method / Peter J Clarke
67 Пат 2 513 216 (ФРГ) Verfahren zur Beschichtung eines Substrats / Robert L Cormia
68 Пат 127703 (ГДР) Einrichtung zum Zerstauben fur die Vakuumbeschichtung / Ullrich Heisig

69. Пат. 3 956 098 (США). Planar magnetron sputtering method and apparatus / Paul S. McLeod.
70. Пат. 2 556 607 (ФРГ). Kathodenzerstäubungsgerät / Paul S. McLeod.
71. Пат. 2 707 144 (ФРГ). Kathodenzerstäubungsvorrichtung / John F. Corbani.
72. Why CTC deposits Al / Si / Cu with varian S-gun sources. — SST, 1976, v. 19, N 12, p. 26.
73. S-gun thin film source. VAC 2436, 475 Section 14. Проспект фирмы Varian Vacuum Division, США. [1975].
74. Cambey L. A. High-rate sputtering. — Handbuch zur Konferenz und Schulung über die Technologie der Kathodenzerstäubung, 1975, September, S. 1—13.
75. Пат. 3 652 444 (США). Continuous vacuum process apparatus / William C. Lester.
76. Пат. 4 009 680 (США). Apparatus for producing high wear-resistant composite seal / Werner H. Fengler.
77. Пат. 540349 (Швейцария). Vakuumanlage mit zwei getrennt evakuierbaren Kammern zum Behandeln von Gut / Hermann Wössner.
78. MSS-355 first in thin films. BB800149PE DN 8144. Проспект фирмы Balzers A. G., кн. Лихтенштейн. [1978].
79. Aronson A. J. Equipment for Sputtering.—SST, 1978, N 12, p. 66—72.
80. Установка и линия непрерывного действия для распыления. Серия JLC-703. Проспект фирмы «НЭВА КОРПОРЕЙШН», Япония, [1978].
81. Пат. 3 856 654 (США). Apparatus for feeding and coating masses of workpieces in a controlled atmosphere / Carroll H. George.
82. Пат. 1 406 509 (Англия). Improvements in or relating to the coating of workpieces / Carroll H. George.
83. A totally flexible, modular, in-line production-type film deposition concept. The NEW Airco Temescal JL-1200. — SST, 1975, v. 18, N 4, p. 41.
84. Оборудование полунепрерывного и непрерывного действия для вакуумного нанесения тонкопленочных элементов интегральных схем / Б. С. Данилин, В. В. Одиноков, В. А. Пупко, Г. П. Тюфаева. — Зарубежная электронная техника, 1975, вып. 2(98), с. 35—54 и вып. 8(104), с. 3—52.
85. Magnetron sputter system 900. Проспект фирмы Materials Research GmbH, США. [1977].
86. In-line sputtering system, Series 900A. — Electronic Packaging and Production, 1977, v. 17, N 8, p. 61.
87. Cut your wafer coating costs by 50% with our new load lock sputtering system. — J. Vac. Sci. Technol., 1978, v. 15, N 5, p. 1783.

МАГНЕТРОННЫЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА (МАГРАТРОНЫ)

Виктор Егорович Минайчев

Вадим Васильевич Одиноков

Галина Петровна Тюфаева

Редактор **В. П. Ключникова**
Технический редактор **И. Е. Пестова**
Корректор **Н. Н. Квартальнова**

Т-15751. Сдано в набор 7/IX 1979 г. Подписано к печати 4/IX 1979 г.
Формат 60 × 90/16. Усл. п. л. 4. Уч.-изд. л. 3,64.
Зак. 1243. Тираж 1800 экз. Цена 55 коп.
Индекс 4853.