

**ЗНАКОМСТВО С ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКОЙ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ «Caroline D12A»
И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ
АМОРФНЫХ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Электронное учебное пособие

Рассмотрены физические основы магнетронного распыления материалов, разновидности магнетронных систем для нанесения тонких пленок, в том числе и импульсные магнетронные распылительные системы на примере установки «Caroline D12A». Исследованы технологические режимы получения данным методом аморфных и поликристаллических слоев различных неорганических материалов.

Содержание

Введение	4
1. Физика магнетронного разряда. Основные термины и определения.	6
2. Движение частиц в магнетронном разряде	17
3. Разновидности магнетронных распылительных систем (МРС).....	29
4. Импульсные магнетронные распылительные системы. Устройства и принцип работы.	37
5. Применение импульсных МРС на примере промышленной установки Caroline D12A..	50
5.1. Назначение и устройство установки. Основные технические характеристики.	50
5.2. Основные блоки и модули установки.....	55
5.3. Работа установки в автоматическом режиме.	58
6. Технологические аспекты работы МРС.	74
6.1. Рабочие параметры магнетронов.	74
6.2. Напыляемые материалы	75
6.3. Скорость осаждения	76
6.4. Равномерность распределения толщины распыляемых пленок.....	80
6.5. Адгезия пленок полученных магнетронным напылением.	82
6.6. Анализ пленок	84
Заключение	85
Список литературы	865

Введение

Технология получения высококачественных и воспроизводимых по параметрам тонкопленочных покрытий является одной из актуальных задач микроэлектроники, оптики, машиностроения и других отраслей промышленности, включая автомобилестроение и строительство зданий.

Современные тенденции в выборе получения тонких 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 считается осаждение пленок, стимулированное 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 системы (МРС). В настоящее время они становятся основным технологическим инструментом для получения тонкопленочных покрытий методом распыления материалов ионной бомбардировкой. Благодаря использованию в этих системах скрещенных электрического и магнитного полей повысилась эффективность ионизации газа, а плотность плазмы стала в десятки раз больше, чем в безмагнитных устройствах катодного (диодного) распыления. В результате значительно возросли плотность ионного тока на катод и скорость ионного распыления, удалось снизить давление рабочего газа и улучшить многие характеристики наносимых слоев.

МРС заняли лидирующее положение в технологии тонкослойных покрытий из различных материалов для микроэлектроники, устройств записи информации и дисплеев.

Во многих случаях тонкие пленки, получаемые с помощью МРС, обеспечивают выполнение тех же функций, что и более толстые слои, наносимые другими методами. Поэтому магнетронное распыление все чаще используется для нанесения упрочняющих, износостойчивых, защитных, декоративных и других видов покрытий. Размер изделий может составлять от долей миллиметров до нескольких метров, а по форме это могут быть пластины, трубки, гибкие полимерные пленки, полотна из бумаги или ткани и так далее.

Важной особенностью магнетронного распыления является отсутствие в потоке осаждаемого вещества капельной фазы и микрочастиц в отличие от термического испарения с использованием вакуумно-дугового и электронно-лучевого нагрева.

В последнее время МРС стали использовать для получения однослойных и многослойных покрытий на элементах оптической и квантово-оптической техники, а также в интегральной оптике.

Интенсивно развивается магнетронная технология нанесения оптических покрытий на архитектурные и автомобильные стекла, а также рулонные материалы большой ширины.

МРС позволяют распылять практически все виды материалов, включая металлы и сплавы, простые и сложные диэлектрики, полупроводники и керамику. Осаждаемые материалы могут сочетаться в различных комбинациях и в виде многослойных покрытий, толщина которых может составлять от десятков нанометров до десятков микрометров.

Весьма перспективной областью применения МРС является нанотехнология, в частности технология получения нанокompозитных и наноструктурированных объемных и тонкопленочных материалов.

Кроме того, такие устройства, обеспечивающие длительный ресурс работы, позволяют создавать установки полунепрерывного и непрерывного действия, удобные для эксплуатации в промышленных условиях. Многие ведущие зарубежные фирмы создали и выпускают в настоящее время широкую гамму оборудования на основе магнетронных распылительных систем.

Все это делает актуальным вопрос о внедрении и дальнейшем развитии техники и технологии нанесения тонкопленочных покрытий с заданными свойствами в различных отраслях промышленности с использованием магнетронных распылительных устройств.

1. Физика магнетронного разряда. Основные термины и определения.

Ионное распыление – это процесс кинетического выбивания атомов с поверхности твердого тела (мишени) за счет передачи импульсов от ионов плазмы к атомам мишени при бомбардировке ее поверхности ионами. Физические процессы, приводящие к ионному распылению, его характеристики и особенности детально описаны в литературе [1,2,7,8].

Коэффициент распыления S определяется по формуле

$$S = N_a / N_i \quad (1.1)$$

где N_a – количество распыленных атомов,

N_i – количество ионов, расплывших эти атомы.

Ионное распыление начинается, когда энергия иона ϵ_i превышает пороговое значение $\epsilon_{\text{пор}}$. Величина $\epsilon_{\text{пор}}$ слабо зависит от массы сталкивающихся частиц и находится в диапазоне 10-30 эВ. При ϵ_i меньше $\epsilon_{\text{пор}}$ распыления атомов мишени не происходит, но возможна десорбция поверхностных загрязнений и химических реакций с ними. В таблице 1.1 приведены значения коэффициентов S некоторых материалов при распылении их ионами Ar^+ с энергией $\epsilon_i=600$ эВ.

Таблица 1.1 Коэффициенты распыления различных материалов

Мишень	Ag	Al	Au	Be	Co	Cr	Cu	Fe	Ge	Hf	Mo	Nb	Ni	Pd	Pt	Si	Ta	Ti	V	W	Zr
S	3,4	1,2	2,8	0,8	1,4	1,3	2,3	1,3	1,2	0,8	0,9	0,6	1,5	2,4	1,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,8

Коэффициент распыления зависит от многих факторов.

Зависимость S от энергии ионов ϵ_i . При энергиях до 70-80 эВ функция $S(\epsilon_i)$ быстро нарастает, затем постепенно снижается и при 10-40 кэВ наступает насыщение. Энергическую эффективность ионного распыления можно оценить величиной η , равной отношению массы материала, расплываемого в единицу времени с единицы площади, к плотности мощности ионной бомбардировки. Последний параметр определяется как произведение плотности ионного тока на ускоряющее напряжение. Максимальное значение η достигается при энергии ионов 300-450 эВ [2]. При этой энергии наибольшая ее часть расходуется на процесс распыления материалов. Необходимо отметить, что в МРС энергия ионов соответствует значениям η , близким к максимальным.

Зависимость S от угла падения ионов φ : при увеличении φ от 0 до 40-70° наблюдается рост S в соответствии с аппроксимационной формулой (1.2):

$$S(\varphi) = S(0) \cos^{-1} \varphi, \quad (1.2)$$

где $S(0)$ – коэффициент распыления при нормальном падении ионов на мишень. При дальнейшем увеличении φ величина S уменьшается и при $\varphi=90^\circ$ практически равна нулю.

В магнетронном разряде, как правило, $\varphi=0$, поскольку граница плазмы, служащая источником ионов, идет параллельно поверхности мишени (катода), а силовые линии электрического поля в темном катодном пространстве представляют собой прямые перпендикулярные поверхности мишени.

Зависимость S от массы бомбардирующих ионов M_i : коэффициент распыления S увеличивается с возрастанием M_i и атомного номера иона в области энергий, характерных для магнетронного разряда. На практике чаще всего в качестве рабочего газа, из которого образуют ионы, используют аргон, который достаточно хорошо распыляет материалы и относительно дешёвый.

Зависимость S от атомного номера распыляемого материала имеет сложный периодический характер; в пределах периода таблицы Д.И. Менделеева S возрастает по мере заполнения электронных d-оболочек.

Зависимость S от температуры мишени отсутствует в диапазоне от нуля до нескольких сотен градусов.

Распылённые частицы обладают значительной кинетической энергией (примерно от 1 до 10 эВ), благодаря которой они способны перемещаться на большие расстояния от мишени. Если на пути частиц располагается подложка, они конденсируются на ней, образуя слой из распылённого материала мишени. Этот процесс, собственно, и лежит в основе ионной технологии нанесения тонких плёнок.

На рис. 1.1 приведены распределения по энергиям атомов алюминия и вольфрама, распылённых ионами аргона. Энергия распылённых частиц значительно превосходит энергию частиц, полученных путём термовакuumного испарения, которая составляет приблизительно 0,1эВ. Повышенная энергия распылённых частиц приводит к энергетической активации процесса конденсации частиц на подложке и существенно влияет на свойства получаемых тонких плёнок. В частности, повышается адгезия плёнок к подложке и уплотняется их структура.

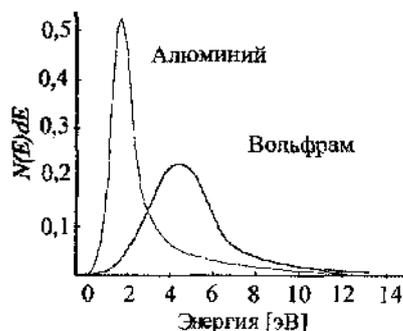


Рис. 1.1. Распределение распылённых атомов по энергиям

При бомбардировке мишеней сложного состава распылённые частицы могут быть не только в виде отдельных атомов, из которых состоит вещество мишени, но и молекулярных образований. При распылении оксидов и нитридов в инертном газе конденсат на подложке не будет полностью соответствовать химическому составу мишени из-за частичной диссоциации распылённых молекул и потери ими кислорода и азота. Чтобы восстановить стехиометрию состава плёнок распыление проводят в смеси аргона с соответствующим реакционным газом.

Ионная бомбардировка мишени приводит к распылению материала не только в виде нейтральных атомов и молекул, но и в виде ионов. Доля ионов весьма мала, и в большинстве случаев ею можно пренебречь, но распылённые нейтральные частицы могут ионизоваться в разрядном промежутке, и в таком случае их доля в потоке вещества, прибывающем к подложке, может достигать десятков процентов.

Ионная бомбардировка мишени приводит к вторичной ион-электронной эмиссии (её часто называют γ -эмиссией, т.к. она определяется коэффициентом γ в известной теории газового разряда Таунсенда) [9,10]. Коэффициент γ определяется отношением тока вторичных электронов к току первичных ионов. Эта эмиссия очень важна для поддержания самостоятельного разряда, если мишень является катодом разряда, используемого для генерации ионов. Условие его самоподдержания выражается уравнением (1.3):

$$\gamma M = 1, \tag{1.3}$$

где M - коэффициент генерации ионов в газе, определяемый количеством ионов, приходящих на катод при выходе из него одного γ -электрона. Этот коэффициент характеризует процессы ионизации газа в объёме разряда и прихода ионов на катод.

Вторичная ион-электронная эмиссия имеет две составляющие - потенциальную и кинетическую эмиссии, названные в соответствии с механизмом выхода электронов из твёрдого тела. Первый вид эмиссии происходит под действием поля ионов, подошедших к поверхности тела, и не зависит от энергии ионов. Кинетическая эмиссия обусловлена передачей ионами части своей кинетической энергии электронам; эта составляющая γ -эмиссии пропорциональна ϵ_i в киловольтовом диапазоне энергий ионов.

На рис. 1.2 приведены зависимости коэффициента γ от энергии ионов He^+ и Ar^+ , бомбардирующих молибденовую мишень. Как видно, при ϵ_i в диапазоне сотен электрон вольт, соответствующих магнетронному разряду, γ -эмиссия практически не зависит от энергии ионов, т.е. является потенциальной, а для ионов аргона величина $\gamma \sim 0,1$. На γ -эмиссию влияют различные факторы: род ионов, химический состав поверхности мишени

(наличие окисных плёнок, диэлектрических включений и других загрязнений) и геометрия её поверхности.

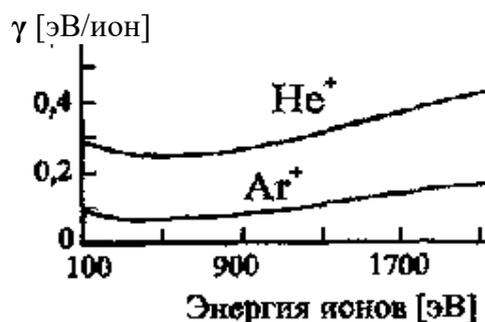


Рис. 1.2. Зависимости коэффициента ион-электронной эмиссии γ от энергии ионов He^+ и Ar^+ , бомбардирующих молибденовую мишень [2]

Необходимо отметить, что не только ионы вызывают вторичную эмиссию мишени в МРС. Она также происходит под воздействием возбуждённых метастабильных частиц и фотонов из разрядной плазмы и вследствие бомбардировки высокоэнергетичными нейтральными частицами. Однако, потенциальная γ -эмиссия имеет преобладающее значение.

Нагрев мишени: основная доля первичной мощности бомбардирующих ионов (~ 80 %) выделяется в виде тепла, поэтому мишени распылительных устройств требуют принудительного охлаждения. Мощность, расходуемая непосредственно на распыление материала мишени, не превышает 5 %, а расход остальной части мощности связан с внедрением ионов в тело мишени, её радиационными повреждениями, обратным рассеиванием ионов, вторичной электронной эмиссией и электромагнитным излучением. Таким образом, энергетический КПД распылительных устройств не высок и составляет всего лишь несколько процентов.

Имплантация ионов в мишень и их адсорбция: поскольку энергия ионов в магнетронном разряде не превышает 1 кэВ, ионы внедряются только в тонкий приповерхностный слой, затем они, а также адсорбированные ионы, освобождаются в нейтральном состоянии (в виде атомов) в процессе дальнейшего ионного распыления и десорбируются.

Обратное рассеивание (отражение) ионов: часть ионов при ударе о поверхность мишени рассеивается обратно в виде нейтральных атомов рабочего газа [9,11]. Доля же обратно рассеянных ионов, которые сохранили свой заряд, составляет малую величину ($\sim 10^{-3}$), поэтому их можно не принимать во внимание. Коэффициент отражения зависит от энергии первичных ионов, рода ионов и материала мишени. Для ионов аргона в условиях магнетронного разряда его величина может достигать 20%, а в среднем она порядка нескольких процентов. При нормальном падении ионов обратно рассеянные атомы

распределяются по углам вылета по закону косинуса, а спектр их энергий простирается от нуля до энергии первичных ионов. Средняя энергия отражённых частиц достигает 100 эВ. Обратно рассеянные атомы летят в сторону подложки и могут передавать ей значительную энергию. Так, при осаждении алюминия со скоростью 0,6 мкм/мин с помощью магнетронного разряда в среде аргона плотности мощностей, передаваемых подложке, составляет [2]:

- за счёт конденсации атомов Al около 1,7 Дж/(мин·см²),
- за счёт кинетической энергии расплывённых атомов Al примерно 4,4 Дж/(мин·см²),
- за счёт кинетической энергии обратно рассеянных атомов Ar - около 1,5 Дж/(мин·см²).

Для реализации метода ионного распыления материала, из которого формируется пленка на подложке необходимы свободные ионы, ускоренные до таких скоростей при которых коэффициент распыления материала мишени имеет практически значимую величину. Для получения ионов применяют различные газовые разряды и распылительные системы. Последние разделяют на два типа в зависимости от способа получения свободных ионов: ионно-плазменные (диодная, триодная и магнетронная) и ионно-лучевые [4]. В первых источником ионов служит газоразрядная плазма, создаваемая в непосредственной близости от распыляемой мишени. Во вторых системах ионы генерируются в отдельном устройстве – ионном источнике (ионной пушке), где и происходит ускорение ионов, которые затем в виде ионного луча направляются на мишень.

В дальнейшем будут рассмотрены только ионно-плазменные системы, а именно магнетронные системы распыления материалов.

В МРС мишень одновременно служит как источником распыляемого материала, так и катодом генерирующим ионы. Анодом служит либо подложкодержатель, либо стенки газоразрядной камеры. Поскольку потенциал разрядной плазмы близок к потенциалу анода, в этих системах напряжение, ускоряющее бомбардирующие мишень ионы, примерно равно разрядному напряжению порядка 0,5кВ и выше, которые соответствуют максимальному значению энергетической эффективности ионного распыления и может поддерживаться при низком давлении. Этому требованию соответствуют аномальный тлеющий разряд с питанием напряжением постоянного или переменного тока с наложением поперечного магнитного поля.

Разряды можно классифицировать по конфигурации и ориентации магнитного поля относительно электрического

- разряды в **скрещенных** полях или в **поперечном** магнитном поле т.е. когда $B \perp E$;
- разряды в **параллельном** или **продольном** магнитном поле т.е. когда $B \parallel E$;

- разряды в **квадрупольном** магнитном поле (при квадрупольной системе электродов можно получить скрещенные поля; при плоских электродах – в зависимости от их площади и расположения – либо скрещенные поля, либо смешанные);

- разряды в **смешанных** и **гибридных** полях (в части межэлектродного промежутка – скрещенные, в части – параллельные, в части силовые линии электрического и магнитного полей наклонены друг к другу).

Отнесение разрядов к той или иной разновидности зависит не только от конфигурации магнитного поля, но и от формы электродной системы.

Для разряда в скрещенных полях должно соблюдаться следующее правило: Силовые линии магнитного поля должны быть параллельны поверхности электродов.

Рассмотрим для примера коаксиальную цилиндрическую систему электродов. При аксиальном магнитном поле (поле, направленном вдоль оси системы, как на рис. 1.3.а мы имеем случай поперечного магнитного поля или скрещенных полей, так как аксиальное магнитное поле ортогонально радиальному электрическому. Для создания аксиального магнитного поля используют внешний коаксиальный соленоид или постоянный магнит с осевой намагниченностью. При радиальном магнитном поле мы имеем случай параллельных полей (рис. 1.3.б). Для создания радиального магнитного поля используют коаксиальные полюсные наконечники или радиально намагниченные магниты, поверхность которых может служить электродами. Направление вектора индукции \vec{B} не принципиально для работы систем.

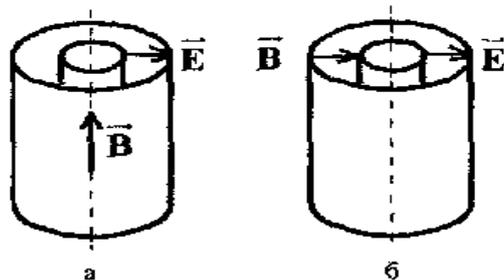


Рис. 1.3. Коаксиальные системы электродов с аксиальным (а) или радиальным (б) магнитным полем; внешний электрод - катод

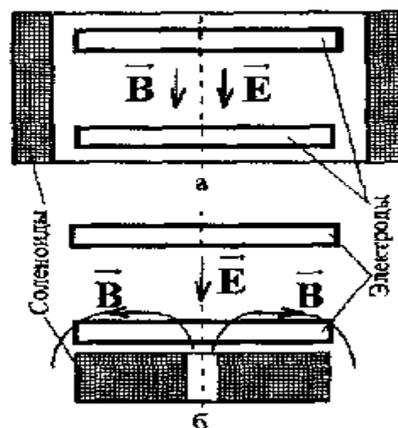


Рис. 1.4. Системы с плоскими электродами и аксиальным (а) или радиальным (б) магнитным полем, нижний электрод - катод

Коаксиальную систему электродов со скрещенными полями назвали *магнетроном* (1921 г., [14]). Вакуумный магнетрон с внутренним накаливаемым катодом до сих пор применяется как электронный прибор для генерации микроволновых (СВЧ) колебаний. В электронной технике приборы со скрещенными полями принято называть приборами М-типа. Коаксиальные цилиндрические магнетроны с аксиальным магнитным полем разделяют на два вида в зависимости от полярности электродов. Систему с внутренним катодом называют *нормальным магнетроном*, а систему с внутренним анодом - *обращённым* или *инверсным магнетроном*. Соответственно, разряд, создаваемый в магнетроне, называют *магнетронным*. Сейчас этим термином обозначают все виды разрядов со скрещенными полями независимо от конфигурации электродов.

Рассмотрим системы с плоскими электродами (рис. 1.4), в которых магнитное поле создаётся с помощью соленоидов. Здесь при аксиальном магнитном поле (а) имеем продольные параллельные поля; при радиальном магнитном поле (б) - скрещенные поля, но только в области, где силовые линии магнитного поля параллельны поверхности электродов. Систему на рис.1.4.б называют *планарным магнетроном*. Направление вектора индукции B не принципиально для работы систем.

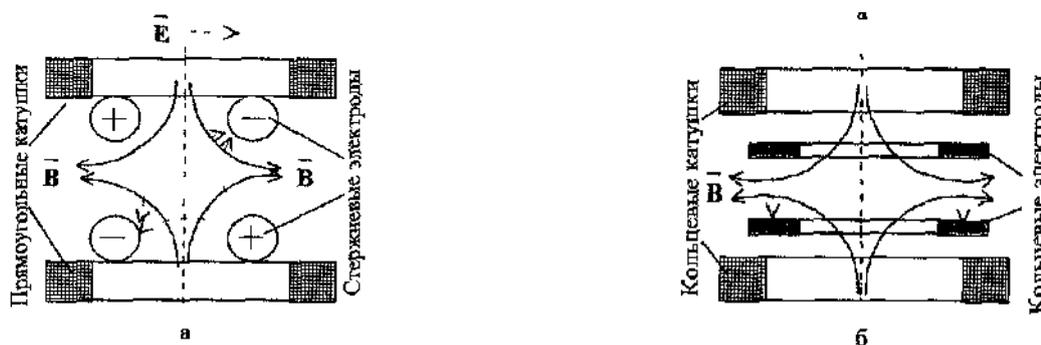


Рис. 1.5. Системы с квадрупольным магнитным полем, квадрупольными стержневыми (а) и плоскими кольцевыми электродами (б)

На рис 1.5 показаны системы с квадрупольным магнитным полем. Система, показанная на рис.1.5.а, отличается от системы на рис.1.5.б наличием двух катушек и размещением электродов только в той области, где $B \perp E$.

Примером разряда со смешанными полями является *разряд Пеннинга*, создаваемый в двухкатодной электродной системе с аксиальным магнитным полем типа *ячейка Пеннинга* (рис.1.6). В центральной части ячейки электрическое и магнитное поля параллельны друг к другу, а на периферии - поля ортогональны, т.е. скрещенные.

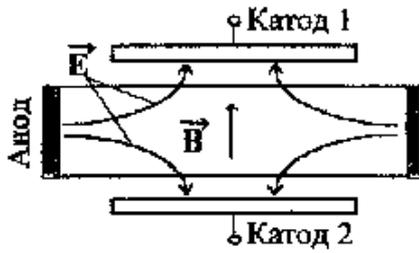


Рис. 1.6. Ячейка Пеннинга с кольцевым (цилиндрическим) анодом

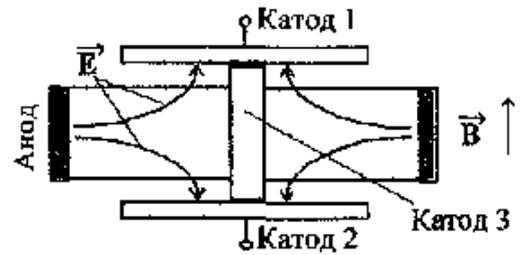


Рис. 1.7. Трансформация ячейки Пеннинга в магнетрон с катодными торцами

В результате, разряд в центральной части является отражательно-колебательным, исходя из характера траекторий электронов, колеблющихся между катодами вдоль магнитного поля, а на периферии - как в нормальном цилиндрическом магнетроне. Направление вектора \mathbf{B} не принципиально.

При значительном увеличении концентрации колеблющихся электронов в условиях слабой компенсации пространственного заряда электронов зарядом ионов при очень низком давлении газа потенциал на оси ячейки может понизиться до потенциала, близкому к потенциалу катода. В этом случае ячейка Пеннинга превращается в нормальный магнетрон с виртуальным цилиндрическим катодом на оси и торцевыми катодами. На рис.1.7 показана подобная трансформация ячейки Пеннинга путём помещения на её оси реального цилиндрического катода 3. МРС с такими электродами известна как *стержневой цилиндрический магнетрон* [4].

Ячейки Пеннинга полезны для распыления магнитных материалов, поскольку в них отсутствует шунтирование магнитного поля при изготовлении катодов из таких материалов.

Возможны и другие варианты электродных систем для поддержания разрядов в магнитном поле. В МРС наиболее часто используют планарный магнетрон. Затем по частоте применения следуют цилиндрические магнетроны и ячейка Пеннинга.

Разряды можно классифицировать и по другим признакам, но основы физики всех этих разрядов составляет магнетронный эффект – искривление траекторий заряженных частиц при их движении поперек линии магнитного поля из-за действия силы Лоренца:

$$F_{\text{Л}} = \left| \vec{F}_{\text{Л}} \right| = \left| -e \left[\vec{v} \vec{B} \right] \right| = evB \sin \alpha, \quad (1.4.a)$$

где α – угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} .

Поскольку величина магнетронного эффекта обратно пропорциональна массе частицы, его влияние на движение электронов намного сильнее, чем на движение ионов и

максимально при $\alpha=90^0$, т.е. в случае скрещенных полей. Удлинение траекторий электронов приводит к росту числа ионизирующих столкновений, совершенных каждым электроном на пути к аноду, а это в свою очередь приводит к увеличению концентрации ионов и плотности ионного тока на катод (по сравнению с разрядом без магнитного поля). Кроме того увеличивается ионно-электронная эмиссия и интенсивность распыления катода.

Увеличение количества столкновений на пути к аноду при наложении поперечного магнитного поля в какой-то мере эквивалентно повышению давления газа, которое в первом приближении можно оценить как [2]:

$$P_{эkv} \approx P_0 \omega_e \tau_e, \quad (1.4)$$

где P_0 – давление рабочего газа при отсутствии магнитного поля;

ω_e – циклотронная частота электрона;

τ_e – среднее время между столкновениями электрона с молекулами газа.

В типичных для МРС условиях величина $\omega_e \tau_e$ порядка 300.

Кроме того, под действием силы Лоренца заряженные частицы при своем движении сталкиваются с нейтральными газовыми молекулами и передают последним часть своей энергии, увлекая их за собой, что может вызвать перемещение всех компонент газовой среды.

На макроскопическом уровне механизм перемещения можно объяснить, используя закон Ампера, который определяет, как известно, силу, действующую на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Газоразрядная плазма в определенном смысле также представляет собой проводник с током. Поэтому все вещество плазмы должно перемещаться в направлении силы Ампера. Эта сила dF_a , действующая на элемент проводника dl с током i , определяется выражением

$$d\vec{F}_a = i \left[d\vec{l} \vec{B} \right], \quad dF_a = idlB \sin \beta, \quad (1.5)$$

где $d\vec{l}$ - вектор элемента длины проводника в направлении тока,

β – угол между $d\vec{l}$ и \vec{B} .

Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки. Величина силы Ампера максимальна при $\beta=90^0$, т.е. случай скрещенных полей. Следовательно, плазма в МРС может перемещаться как единое целое под действием силы Ампера поперек электрического и магнитного полей в направлении $\left[d\vec{l} \vec{B} \right]$. Это направление совпадает с

направлением $\left[\begin{matrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{matrix} \right]$, так как направление тока $d\vec{l}$ совпадает с направлением \vec{E} .

Поэтому, если магнетронная система имеет круговую симметрию, плазма должна вращаться. Однако для плазмы магнетронного разряда в МРС характерны относительно небольшие значения индукции магнитного поля – до 0,1Т (1кГс), поэтому сила Ампера (как следствие действия силы Лоренца оказывает эффект только на электронную компоненту плазмы. В результате – вращаются вокруг оси системы только электроны, создавая так называемый кольцевой азимутальный ток или ток Холла. Вращение электронного газа в МРС способствует выравниванию по азимуту распределений концентраций электронов и ионов, а также ионной эрозии (выработки) мишеней.

Вращательное движение электронного газа называется дрейфом. Если линия дрейфа электронов не замкнута, то они либо выходят за пределы межэлектродного промежутка, либо «прижимаются» к стенкам камеры, что приводит к потерям электронов и затрудняет возникновение и поддержания разрядов.

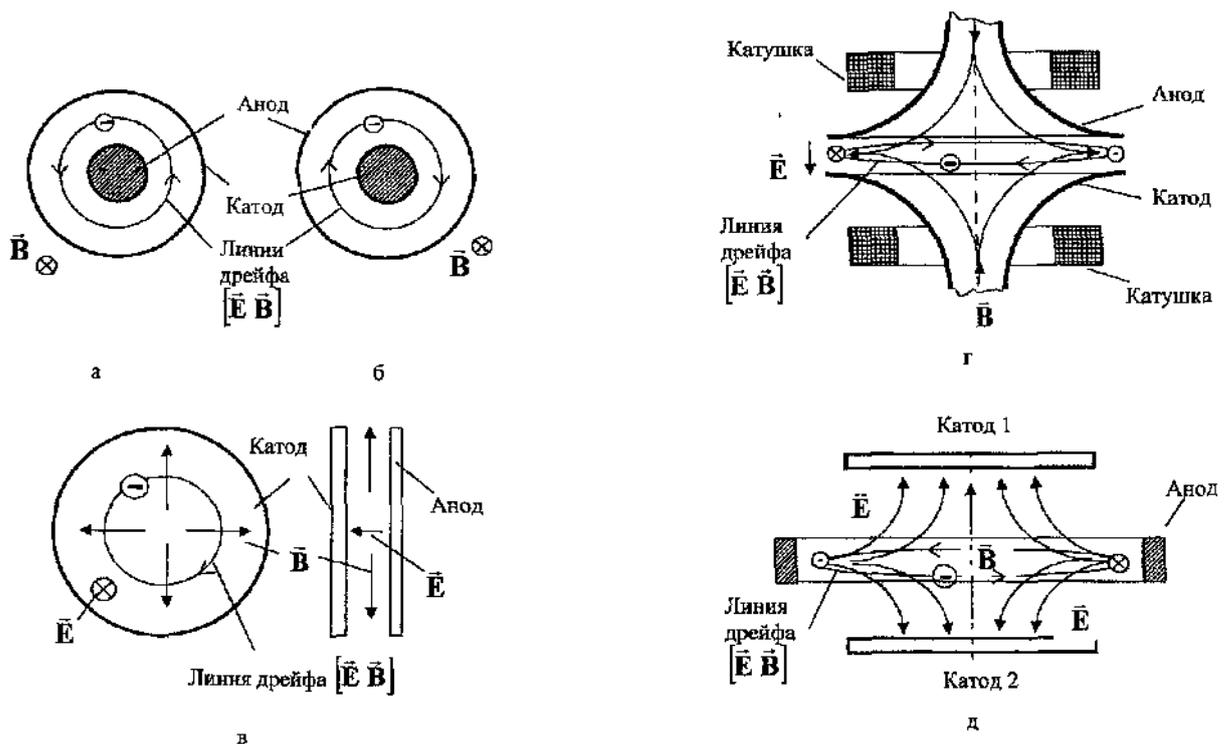


Рис. 1.8. Магнетронные системы с замкнутым азимутальным дрейфом электронов: а - цилиндрический обращённый магнетрон, б - цилиндрический нормальный магнетрон, в - планарный магнетрон с радиальным магнитным полем, г - магнетрон с квадрупольным магнитным полем и профилированными электродами, д-ячейка Пеннинга.

Если же линия дрейфов замкнута (замкнутый дрейф), то электроны при своем движении возвращаются в исходную точку, а это создает более облегченные условия

существования разряда (поскольку нет потерь электронов). А это означает, что плазма может существовать при более низких давлениях рабочего газа, более низких напряжениях и более низкой индукции магнитного поля. Поэтому подавляющее число практических МРС имеет замкнутый дрейф электронов. На рис 1.8 представлены типовые конфигурации таких магнетронных систем.

2. Движение частиц в магнетронном разряде

Рассмотрим упрощенную типичную конструкцию планарного магнетрона (рис. 2.1). Все его элементы монтируются в корпусе 18, присоединяемом к рабочей камере через изолирующее кольцо 2 и фланец 4 с вакуумными уплотнительными прокладками 1 и 3. Дискообразная мишень-катод 19 охлаждается проточной водой поступающей 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 13, изготовленном из магнитомягкого материала. Магнитный блок создает над поверхностью катода дугообразное неоднородное магнитное поле 11. Над катодом 19 расположен анод 10, который может находиться либо под потенциалом земли, либо под некоторым напряжением смещения (порядка 30-100В). Такое расположение анода обеспечивает образование электрического поля 9 с составляющей перпендикулярной плоскости мишени катода.

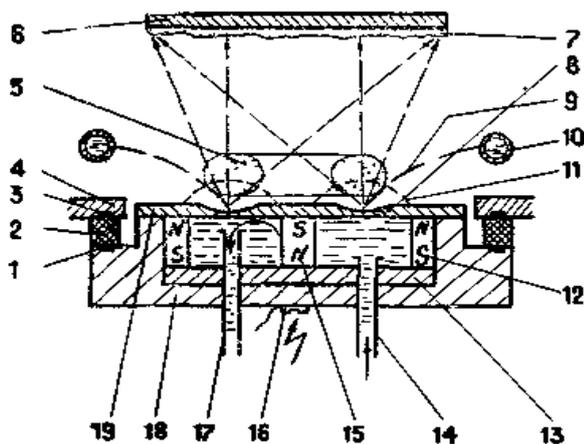


Рис. 2.1. Схема типичной конструкции планарного магнетрона

При подаче отрицательного потенциала на катод, в прикатодной области образуется зона с неоднородными скрещенными электрическим и магнитным полями. В результате – над поверхностью катода возникает кольцеобразная (торообразная) зона плазмы 5. Геометрия плазменного разряда 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.

Разряд в магнетроне 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, эмитируемых 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 [2]:

$$U_{\text{мин}} = \varepsilon_0 / n_{ei} \gamma_i \gamma_e, \quad (2.1)$$

где n_{ei} - число вторичных электронов, приходящихся на один ион;

ε_0 - средняя энергия, необходимая для образования иона (порядка 30 эВ/ион Ag);

γ_i - коэффициент отбора ионов;

γ_e - доля от общего количества ионов U/ε_0 , которая создается в среднем каждым первичным электроном, прежде чем он покинет систему.

На рис. 2.2 приведена схема межэлектродного промежутка плоского магнетрона, в котором поддерживается разряд тлеющего типа. Пусть выполнено условие отсечки для электронов, а плотность газа достаточно низкая, так что средний свободный пробег электрона больше межэлектродного расстояния d . Пусть величина d не очень большая, так что положительный столб разряда отсутствует, но имеются части, присущие катодной области тлеющего разряда (катодный слой, плазма отрицательного свечения и фарадеево тёмное пространство [10,12]). Также допускаем, что внутри плазмы электрическое поле настолько слабое, что им можно пренебречь, а её потенциал равен анодному.

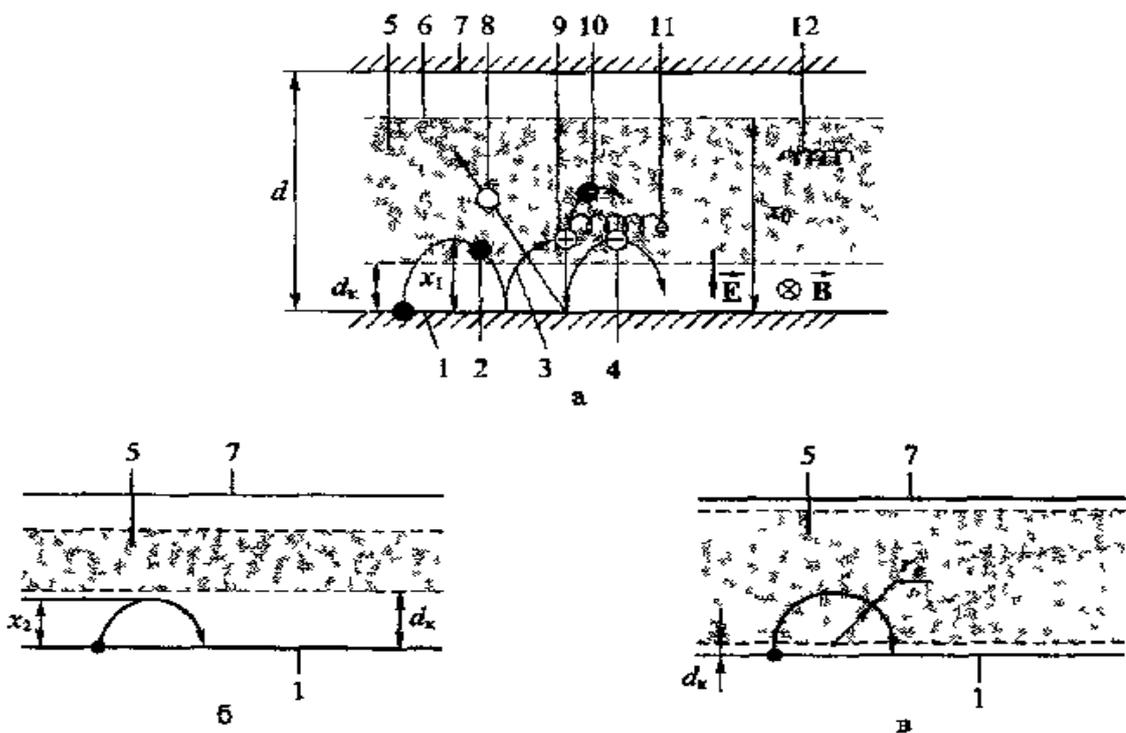


Рис. 2.2. Движение частиц в плоском магнетроне при наличии плазмы отрицательного свечения. 1 - катод, 2 - первый катодный электрон, 3 - траектория катодного электрона, 4 - второй электрон, эмитированный катодом, 5 - слой плазмы отрицательного свечения, 6 - верхняя граница плазмы, 7 - анод, 8 - распылённый атом материала катода, 9 - ион, образованный при ионизации молекулы газа, 10 - первый катодный электрон после столкновения с молекулой газа, 11 - вторичный электрон, образованный при ионизации молекулы газа, 12 - траектория плазменного электрона. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка

Плазменный слой 5, находящийся внутри промежутка, представляет собой плазму отрицательного свечения, которую пронизывают высокоэнергетичные электроны 2(10) и 4. Эти электроны эмитированы катодом 1 в результате бомбардировки его ионами 9. Плазма 5 отделена от электродов слоями пространственного заряда. На рис. 2.2 толщина катодного слоя положительного пространственного заряда обозначена d_k .

Электрон 2 выходит из катода и попадает в катодный слой, где на него воздействуют электрическое поле пространственного заряда ионов и поперечное магнитное поле. Под действием силы Лоренца траектория электрона искривляется, но он попадает в плазменную область и движется по инерции по ларморовской окружности, поскольку электрическое поле в плазме отсутствует (на самом деле, поле есть, но оно очень слабое по сравнению с полем катодного слоя). Затем электрон входит в катодный

слой со стороны анода, тормозится электрическим полем и, если не будет захвачен поверхностью катода, то снова будет ускоряться в сторону анода и двигаться по траектории 3. Эта траектория не является циклоидой, но похожа на неё [13].

Вполне вероятно, что катодный электрон может столкнуться с молекулой газа и ионизовать её с образованием нового электрона 11 и иона 9. При столкновении катодный электрон потеряет часть своей энергии, изменит направление движения и перейдёт на новую орбиту 10 поближе к аноду. Затем он будет вращаться по ларморовской окружности с заходом или без захода в катодный слой в зависимости от величины ларморовского радиуса. Совершая столкновения с молекулами газа и переходя с одной орбиты на другую, катодный электрон может достигнуть анода.

При достаточно большом межэлектродном расстоянии катодный электрон может растратить свою энергию, приобретённую в катодном слое, т.е. термализоваться, ещё не достигнув анода. На рис. 2.2а условно показано, что катодные электроны термализуются, пройдя расстояние x_0 . Линию 6, соответствующую этому расстоянию, можно считать верхней границей плазмы отрицательного свечения. Таким образом, затенённая область межэлектродного промежутка на рис. 2.2а условно показывает, в какой части межэлектродного промежутка происходит ионизация газа и находится плазма отрицательного свечения. Поскольку мы рассматриваем случай не очень большого значения d , и отсутствует положительный столб, анод от плазмы отделяет фарадеево тёмное пространство и анодный слой пространственного заряда [10,12].

Вторичный электрон 11, образованный в плазменной области при ионизации газа, не попадёт в катодный слой, а будет дрейфовать вместе с термализованными катодными электронами и другими плазменными электронами 12 в $[EВ]$ направлении под действием слабого поля плазмы. Траектории этих электронов представляют собой сложные кривые, но их проекции на плоскость рис. 2.2а выглядят как трохойды, поскольку начальная энергия электронов соизмерима с максимальной энергией, получаемой от электрического поля в плазме. Имея малую энергию (порядка нескольких электрон-вольт), эти электроны будут совершать только упругие столкновения с молекулами газа, но благодаря им они будут диффундировать поперёк магнитного поля, и в итоге попадут на анод, генерируя ток в цепи питания магнетронного разряда.

Ион 9, на движение которого магнитное поле практически не влияет, постепенно достигнет катодной границы плазменной области, ускорится электрическим полем катодного слоя и будет бомбардировать катод, вызывая вторичную ионно-электронную эмиссию и появление нового катодного электрона 4.

Ион также распыляет поверхность катода и выбивает из него атом 8. За счёт своей кинетической энергии ($\sim 1-10\text{эВ}$) расплывшийся атом покидает поверхность мишени (катода) и летит к окружающим разряд электродам и стенкам. Во время своего движения атом может сталкиваться с молекулами газа.

В общем случае расстояние до точки изменения направления скорости движения электрона x_1 будет несколько превышать ширину ТКП d_k (рис. 2.2).

Для плоских катодов можно считать расстояние x_1 приблизительно равным радиусу Лармора r_L :

$$r_L = 3,37 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_{\perp e}^{\frac{1}{2}} / B, \quad (2.2)$$

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

$$\varepsilon_{\perp e} = \frac{m_e v_{\perp e}^2}{2}, \quad (2.3)$$

Электроны эмитируются катодом с энергией в несколько электрон-вольт и движутся по циклоидальным кривым, как показано на рис. 2.2.

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 магнетроне 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 x_0 , захватываются анодом.

Разряд в магнетроне характеризуется ярким свечением, которое распространяется на расстоянии около $2x_1$ от катода. Эта область яркого свечения является основной зоной изменения энергии электронов.

Поскольку электроны могут покидать магнитные ловушки только после потери энергии, то $\gamma_e \sim 1$, и поскольку изменение первичной энергии происходит в прикатодной области, то $\gamma_i \sim 1$. Следовательно, разряды в магнетроне очень эффективны при

относительно низких напряжениях 300-600 В. (По уравнению (2.1) $\varepsilon_0 \sim 80$ эВ/ион и $n_{ei} \sim 1/20$). Высокие рабочие напряжения в обычных плоских диодных системах являются результатом низких значений γ_e и γ_i .

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

$$\omega_e \tau_e \gg 1; (\omega_i \tau_i < 1; R_i > L > R_e; \lambda_i > L), \quad (2.4)$$

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:

$$P_p > \lambda_e / L, \quad (2.5)$$

где P_p - рабочее давление;

λ_e — длина свободного пробега электрона при давлении 1 Па.

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

Поскольку использование поперечного поля эквивалентно повышению давления рабочего газа p_p , можно записать:

$$p_p / p_0 \approx [1 + (\omega_e \tau_e)^2]^{1/2}, \quad (2.6)$$

где p_0 — давление газа без магнитного поля.

Произведение $\omega_e \tau_e$, характеризующее степень замагниченности электронов, называется параметром Холла. Из выражения (2.6) видно, что магнитное поле эффективно при высоких значениях параметра Холла, т. е. когда выполняется условие $\omega_e \tau_e \gg 1$.

$$\text{Поскольку } \omega_e = eB/m, \quad (2.7)$$

$$\tau_e = \lambda_0 / p_0 [2(e/m)U_a]^{1/2} \quad (2.8)$$

$$\text{То } \omega_e \tau_e = \frac{\lambda_0 B (e/m)^{1/2}}{2^{1/2} p_0 U_a^{1/2}}, \quad (2.9)$$

где e/m - удельный заряд электрона ($1,76 \cdot 10^{11}$ Кл•кг⁻¹);

U_a - 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_k в направлении электрического поля на поверхность мишени.

В разрядной системе магнетрона 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.

Магнитное поле в магнетроне характеризуется тем, что концы магнитных силовых линий (рис.2.3) 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.

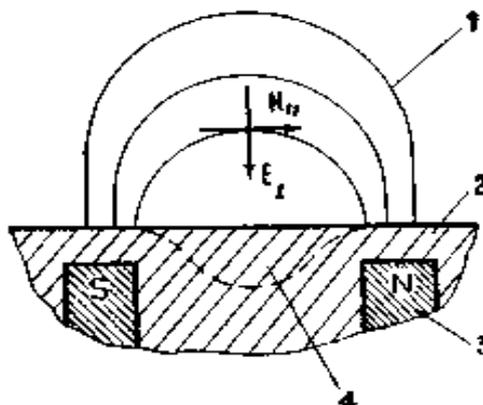


Рис. 2.3. Структура магнитного поля магнетрона: 1 - магнитные силовые линии, 2 - катод, 3 - магнитные полюса; 4 - зона эрозии катода

Интенсивная ионизация возникает в средней части между полюсами магнита, где векторы \mathbf{E} и \mathbf{B} перпендикулярны друг другу. По краям этой части векторы \mathbf{E} и \mathbf{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 \mathbf{V} может быть разложен на две взаимно перпендикулярные составляющие V_{\perp} и V_{\parallel} (рис. 2.4). Электроны в таких полях совершают дрейф под воздействием полей $\mathbf{V}_{\parallel} \cdot \mathbf{E}$ по направлению V_{\parallel} . Скорость электронов имеет составляющую в направлении \mathbf{V}_{\parallel} , но вследствие сохранения магнитного момента ($\mu_M = m_e \cdot v_{\perp}^2 / B$) они будут тормозиться магнитным полем, прежде чем достигнут поверхности катода.

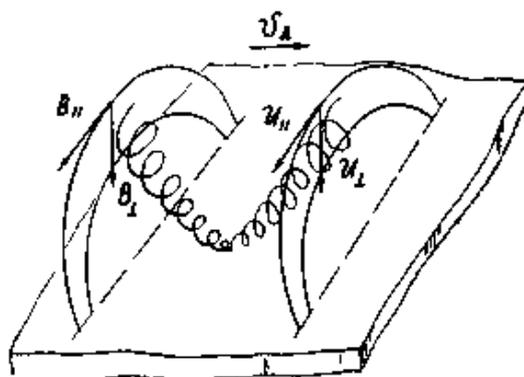


Рис.2.4. Схема дрейфового движения электронов

Работа магнетрона сопровождается вращением разрядной плазмы по замкнутому контуру в плоскости, перпендикулярной векторам \mathbf{E} и \mathbf{V} . Из физики плазмы известно [46], 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, дрейфующие в скрещенных полях ионы плазмы в результате столкновений с атомами нейтрального газа увлекают последние во вращение до скоростей, почти совпадающих со скоростями дрейфа ионов (плазмы):

$$v = cE/H, \tag{2.10}$$

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 [3].

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

$$\alpha = \frac{n_e}{n_i + n_0}, \quad (2.11)$$

где n_e - плотность электронов;

$n_i = n_e$ - плотность ионов;

n_0 - плотность газа.

Условием преобладания кулоновских столкновений является:

$$\alpha \gg 1,7 \cdot 10^{16} \sigma_{e0} T_e^2, \quad (2.12)$$

где σ_{e0} - эффективное сечение электрон-атомных столкновений;

T_e - температура электронов.

Другой важный параметр плазмы — радиус Дебая:

$$r_D = 7430 (T_e/n_e)^{1/2} \quad (2.13)$$

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

Электроны, эмитируемые 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:

$$I_{\perp} = en_e \mu_{e\perp} E_{\perp} + en_i \mu_{i\perp} E_{\perp} \quad (2.14)$$

Холловский ток в направлении $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$ будет составлять:

$$I_x = \omega_e / \nu_e I_{e\perp} = \omega_e / \nu_e en_e \mu_{e\perp} E_{\perp} \quad (2.15)$$

В формуле (2.14) подвижность в направлении, перпендикулярном магнитному полю, составляет

$$\mu_{e\perp} = \frac{\mu}{1 + (\omega_e/\nu)^2} \quad (2.16)$$

где μ - подвижность частиц при отсутствии магнитного поля или вдоль магнитных силовых линий, $\mu = e/mv$;

ν - частота столкновений частиц;

m - масса частицы;

e — заряд частицы;

ω_e — циклотронная частота, равная $1,76 \cdot 10^{11} \text{ В}$.

Коэффициент диффузии

$$D = \mu k T_e / e, \quad (2.17)$$

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 (2.18)), а также с плотностью электронов в плазме и температурой - уравнением Бома (второе выражение в уравнении (2.18)).

$$I = 8,6 \cdot 10^{-9} \left(\frac{40}{M} \right)^{1/2} \frac{U_s^{3/2}}{d_s^2} + 1,48 \cdot 10^{-16} n_e \left(\frac{40 T_e}{M} \right)^{1/2} \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (2.18)$$

где M — молекулярная масса иона.

Типичные магнетроны работают при давлении $0,5 \text{ Па}$ ($3 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$), индукции магнитного поля $0,02 \text{ Т}$ (200 Гс). Следовательно, $\omega_e = 3,5 \cdot 10^9 \text{ рад/с}$. Эффективное сечение столкновений атомов с электронами с энергиями порядка 10 эВ в аргоне составляет порядка $2 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$, а частота столкновений $\nu \sim 10^7 \text{ с}^{-1}$, следовательно, ω_e/ν примерно = 300 . В соответствии с уравнением (2.15) 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 (2.16) $\mu_{e\perp} \sim 10^{-5} \mu_e$ 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 (2.14) по измеряемым значениям E_{\perp} и n_e в области анода. 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 (2.18), и показывают, что степень ионизации составляет несколько процентов. Как установлено, при низком давлении электроны, эмитированные из катода, в хорошо сконструированной

ловушке проходят путь длиной более 100 м. Аналогичные соотношения существуют, по-видимому, и в планарном магнетроне.

Магнетроны 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/см², а плотность мощности от 1-36 Вт/см²

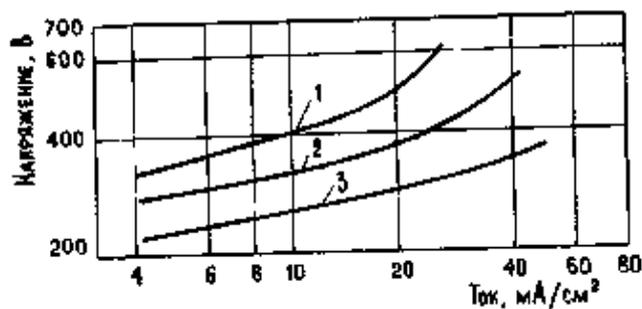


Рис.2.5. ВАХ для различных давлений аргона в планарном магнетроне

1 – 10^{-1} Па; 2 – $2,5 \cdot 10^{-1}$ Па; 3 – 1,3Па

Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) при различных давлениях в планарном магнетроне приведены на рис. 2.5. (Плотность тока в зоне эрозии мишени может быть в 4 раза выше средней плотности тока, приведенной на рис. 2.5). Для оптимальных значений формы и интенсивности магнитного поля кривые, приведенные на рис. 2.5, удовлетворяют уравнению

$$I = KU^n, \quad (2.19)$$

где I - ток катодf;

U - потенциал катода;

n - показатель эффективности улавливания электронов магнитной ловушкой, его значения лежат в пределах 5—9 [47];

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 [47].

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 e_e) вследствие того,

что радиус их движения слишком велик по сравнению с разрядным пространством, т.е. $r_{Л} > d_a$.

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 p_{ei}).

Напряжение зажигания разряда в магнетроне 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_3 от давления аргона и индукции магнитного поля [5,6] условно выделены три области, характерные для возникновения разряда (рис. 2.6). При $B > 8 \cdot 10^{-2}$ Т напряжение зажигания разряда U_3 почти не зависит от B в пределах исследуемого диапазона (кривая 1). В диапазоне $8 \cdot 10^{-2} > B > 4 \cdot 10^{-2}$ Т напряжение U_3 увеличивается с увеличением B . При $B < 4 \cdot 10^{-2}$ Т наблюдается возрастание U_3 , а в случае $B < 2,5 \cdot 10^{-2}$ Т разряд вообще не загорается при максимальных U_3 .

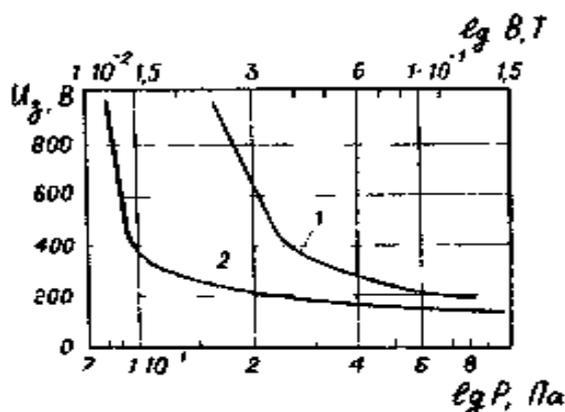


Рис. 2.6. Зависимость напряжения зажигания разряда от индукции магнитного поля(1) и давления аргона (2)

На этом же рисунке (кривая 2) изображена зависимость $U_3 = f(p)$. При $p < (2,5-3) \cdot 10^{-1}$ Па наблюдается некоторое увеличение U_3 . При $p < 10^{-1}$ Па напряжение зажигания очень резко возрастает, и в области $p < 8 \cdot 10^{-2}$ 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 магнетрона не приводит к изменению характера зависимостей и оказывает влияние только на абсолютные значения исследуемых величин.

3. Разновидности магнетронных распылительных систем (МРС)

Многообразию конструктивных схем магнетронов 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.

Магнетроны с цилиндрическим катодом являются одной из первых разновидностей промышленных конструкций систем ионного распыления (рис.3.1,а,б). 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 магнетроне обеспечивает эффективное и надежное охлаждение мишени. Однако распыленный материал мишени поступает неравномерным потоком через открытый торец катода. Для получения равномерных покрытий с этой конструкцией магнетрона используют планетарные системы перемещения изделий.

Скорости нанесения покрытий этим магнетроном 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 магнетроне не позволяют эффективно проводить ионизацию рабочего газа у поверхности мишени и защиту изделий от бомбардировки высокоэнергетическими электронами. Из-за указанных недостатков этот тип магнетронов не получил широкого распространения.

Одной из разновидностей цилиндрических магнетронных систем являются конструкции с коаксиально расположенными электродами. Эти системы выполняются с внутренним или внешним расположением мишени относительно цилиндрического катода (рис. 3.1, в, г).

На рис. 3.1в, показана схема магнетрона, 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.

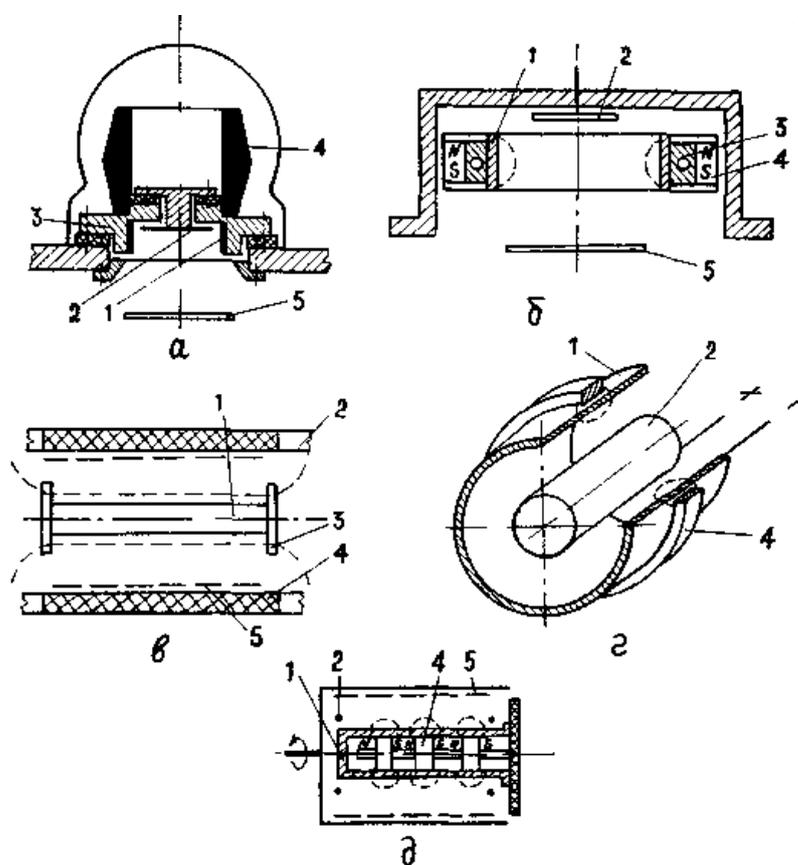


Рис. 3.1 Принципиальные схемы магнетронов с цилиндрическим катодом:
 1 - катод-мишень; 2 – анод; 3 - водоохлаждаемый корпус катода; 4 - магнитная система; 5 — изделия

При внутреннем расположении держателя изделий (рис.3.1,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. 3.1,д).

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

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

Основные недостатки цилиндрических магнетронов (рис.1.3,а,б) устранены в **магнетроне с конической мишенью** (рис.3.2,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 магнетрона монтируются в заземленном корпусе, который является дополнительным анодом системы. Большим эксплуатационным достоинством этой конструкции является легкая смена мишени.

Так как зона эрозии в конической мишени расположена в наиболее «толстой» ее части, то магнетрон обладает большим ресурсом эксплуатации мишени. По сравнению с магнетроном, приведенным на рис.3.1,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 магнетрона 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 испарителей в промышленных установках для нанесения пленок.

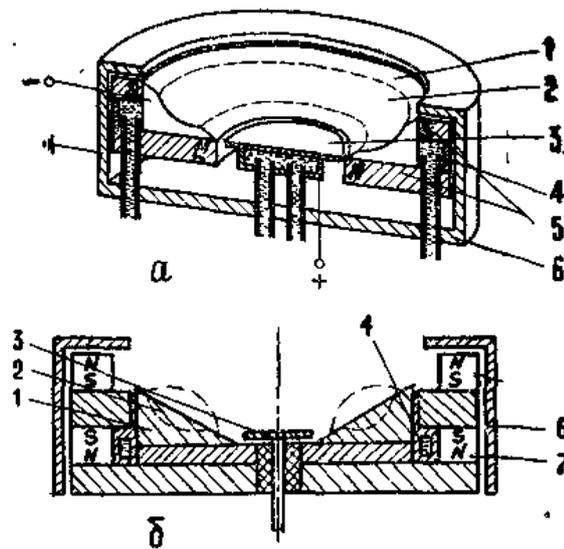


Рис.3.2. Принципиальные схемы магнетронов с конической мишенью; 1 -мишень, 2 - зона эрозии, 3 - анод смещения, 4 - катод, 5 - магнитная система, 6 - заземленный анод, 7 - магнитная система

Этот тип магнетронов обеспечивает удовлетворительное распределение толщины пленок на неподвижных изделиях диаметром менее диаметра зоны эрозии магнетрона 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 магнетрона 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 магнитопроводом, не отвечает этому требованию, так как на внешнем полюсном наконечнике магнитное поле рассеянное и значительная часть его силовых линий не проходит через поверхность мишени.

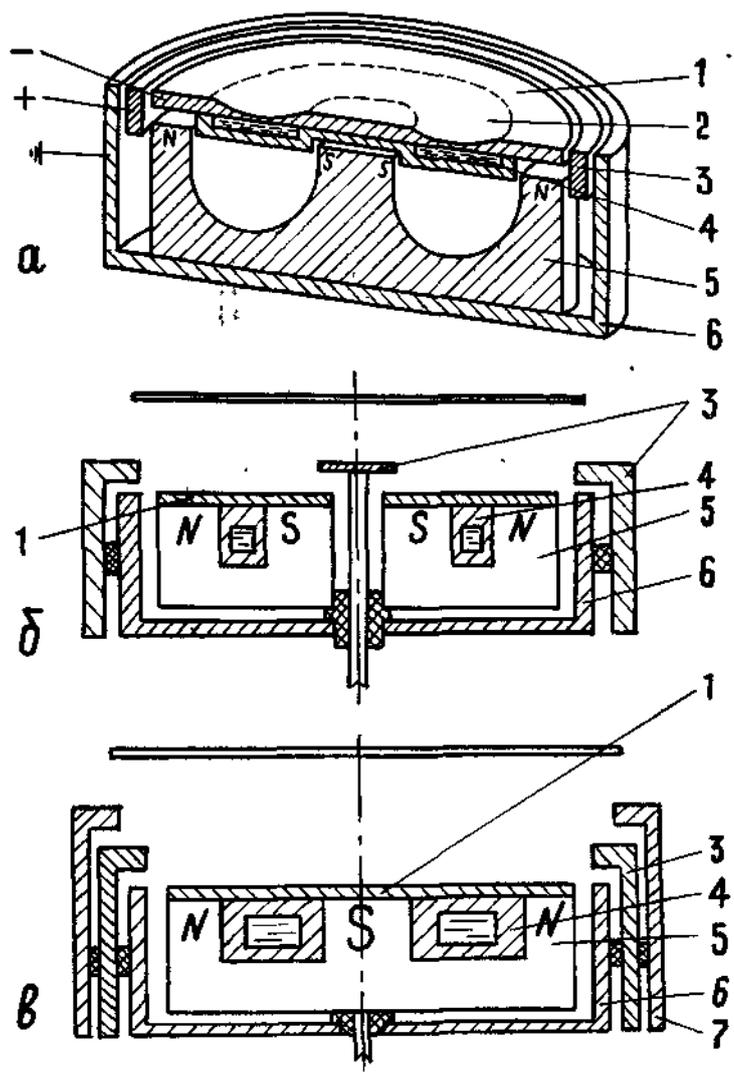


Рис.3.3 Принципиальные схемы планарных магнетронов: 1 - мишень, 2 - зона эрозии, 3 - анод, 4 - водоохлаждаемый корпус катода, 5 - магнитная система, 6-заземленный экран, 7 - дополнительный электрод с отрицательным потенциалом

С помощью дополнительной магнитной системы, расположенной непосредственно под анодом 6, как это сделано в устройстве на рис.3.2,б, можно добиться строгой фокусировки.

Следующей и наиболее распространенной разновидностью МРС являются планарные магнетроны. Типичная конструкция такого планарного магнетрона с дисковой плоской мишенью представлена на рис.3.3,а. Магнитная система такого устройства может быть выполнена или на основе электромагнитной катушки, или из постоянных магнитов и располагается под нераспыляемой поверхностью мишени в водоохлаждаемом корпусе катода. 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 магнетроны 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 магнетронах благодаря совершенной магнитной ловушке электронов создаются наиболее высокие плотности тока мишени и тем самым достигаются наибольшие скорости распыления.

При нанесении покрытия с помощью магнетронов 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 магнетрона подается положительное смещение напряжения от 30 до 100 В. Кроме того, для отражения высокоэнергетических электронов в магнетроны вводятся дополнительные электроды (аноды) (рис.3.3,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.3.3,в).

Коэффициент использования материала мишени в магнетронах, который составляет порядка 30%, повышают различными техническими приемами. Для увеличения площади эрозии мишени в устройстве (рис.3.4,а) использована

дополнительная электромагнитная катушка, охватывающая concentрично распыляемую мишень.

Магнитная система магнетрона 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.3.4,б,в. В результате этого происходит симметричное смещение области максимальной эрозии 5. Таким образом, в магнетроне достигается равномерная эрозия 6 мишени практически по всей площади между полюсными наконечниками постоянных магнитов.

Многоячейчатая электромагнитная система, соединенная с источником переменного тока, позволяет также увеличить зону равномерного распыления мишеней (рис.3.4,г).

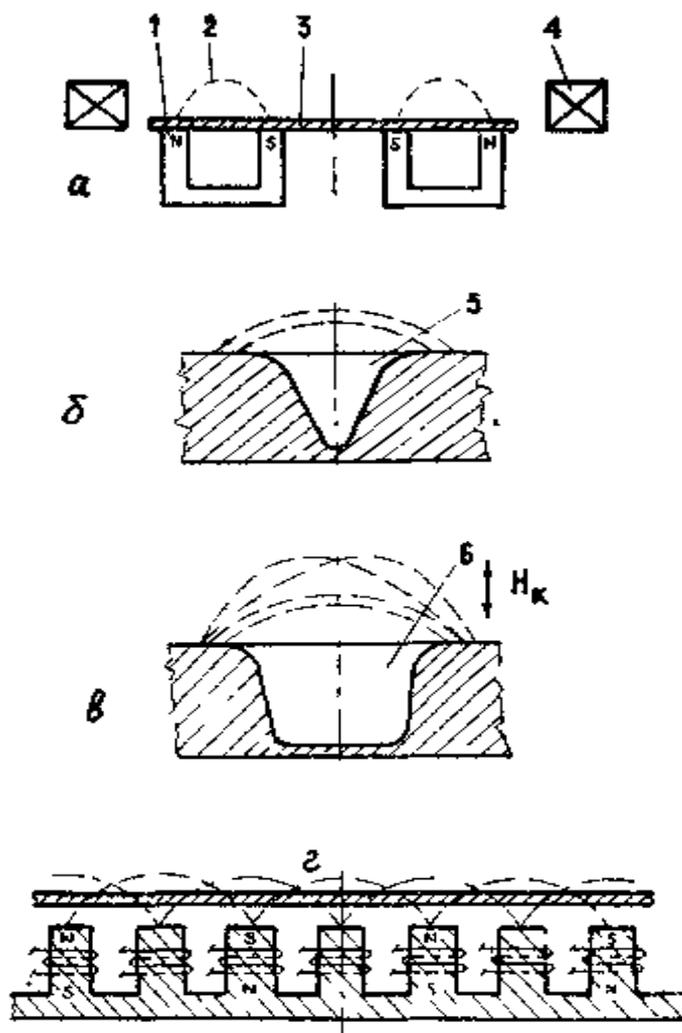


Рис.3.4. Принципиальные схемы магнетронов с переменным магнитным полем

В таблице 3.1 приведены некоторые характеристики рассмотренных выше магнетронных распылительных систем. Там же, для сравнения представлены характеристики диодных и триодных систем распыления. Сравнение показывает, что наиболее высокими параметрами обладают магнетронные распылительные системы.

Таблица 3.1 Основные параметры распылительных систем.

Системы распыления	Рабочее напряжение, кВ	Плотность тока на мишень, мА/см ²	Удельная мощность на мишени, Вт/см ²	Скорость осаждения (по меди), мкм/мин	Рабочее давление, мм.рт.ст.	Степень загрязненности пленки, торр/мкм/мин
1	2	3	4	5	6	7
Магнетронное						
1. С цилиндр. катодом	1-3	6	15	0,25	10 ⁻³	4·10 ⁻³
2. С полусфер. катодом	0,5-0,7	25	15	0,8	5·10 ⁻³	6,3·10 ⁻³
3. С полым цилиндр. катодом	0,3-0,8	80	40	0,06	5·10 ⁻³	7,7·10 ⁻²
4. С коническим катодом	0,3-0,6	160	80	0,1	5·10 ⁻³	5·10 ⁻²
5. С плоским катодом	0,4-0,8	200	100	1,8	5·10 ⁻³	2,8·10 ⁻³
Триодное	0,5-2	2	1	0,15	5·10 ⁻⁴	3,3·10 ⁻³
Диодное						
1. Планарное на пост. токе	2-5	меньше 1	3	0,02	5·10 ⁻²	2,5
2. Планарное ВЧ	-	меньше 1	4	0,05	5·10 ⁻³	0,5
3. Коаксиальное на пост.токе	6	0,4	2,5	0,03	5·10 ⁻²	1,7
4. Коаксиальное ВЧ	-	10	8	0,05	10 ⁻³	2·10 ⁻²

4. Импульсные магнетронные распылительные системы. Устройства и принцип работы.

Импульсные МРС являются следующим этапом развития магнетронных систем ионного распыления. Они позволяют решить целый ряд проблем, возникающих при эксплуатации обычных МРС путем подачи на мишень-катод импульсного прямоугольного или синусоидального напряжения в среднечастотном диапазоне 10-1000 кГц. В импульсном режиме можно существенно увеличить плотность разрядного тока (до $10\text{A}/\text{cm}^2$) и импульсную мощность разряда до нескольких мегаватт, повысив тем самым степень ионизации вещества до 30-90% [15]. Кроме того, при работе магнетрона в таком режиме снижается тепловая нагрузка на мишень и подложку из-за увеличения скважности импульсов (у неполярных или биполярных).

Импульсный режим можно применять и для реализации в МРС не линейных эффектов, например увеличение (уширение) зоны эрозии, что позволяет получать более равномерное по толщине покрытие, чем в разряде на постоянном токе.

Примером нелинейного эффекта может быть и зависимость плотности упаковки, преимущественной ориентации, состава и параметров решетки тонкопленочного слоя, осаждаемого с одновременной ионной бомбардировкой, от энергии отдельных ионов при сохранении количества энергии, передаваемой одному атому [18]. В настоящее время на практике применяются три основные схемы импульсных МРС [20-22]: в виде одиночного магнетрона, двойных или спаренных магнетронов и нескольких магнетронов, расположенных на разных сторонах рабочей камеры напротив друг друга.

Мишени импульсных МРС выполняются из проводящих материалов, поэтому конструктивно импульсные магнетроны не отличаются от магнетронов, работающих на постоянном токе.

Электрическое питание импульсных МРС осуществляется униполярными импульсами отрицательной полярности или ассиметричными биполярными. Отрицательная часть импульсов обеспечивает зажигание и поддержание разряда, а положительная – разрядку диэлектрических слоев на мишени с целью предотвращения искрений и дуг.

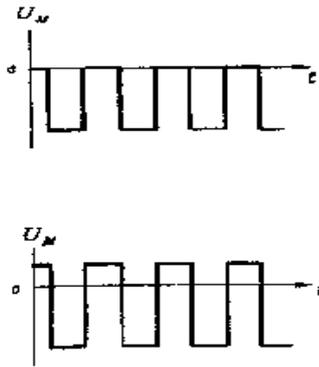


Рис. 4.1. Униполярные (вверху) и асимметричные биполярные (внизу) импульсы для питания МРС с одним магнетроном.

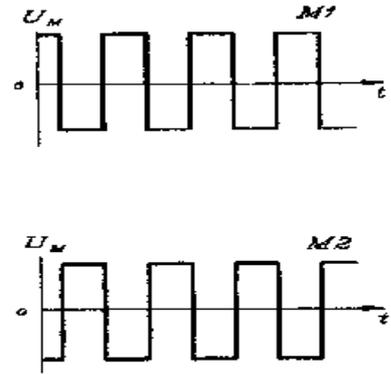


Рис. 4.2. Симметричные биполярные импульсы для питания МРС с двумя магнетронами.

Обычно импульсный режим реализуется в виде непрерывной и последовательности униполярных или биполярных импульсов, равномерно распределённых во времени; при этом частота повторения импульсов составляет десятки-сотни килогерц, а длительность импульсов - единицы-десятки микросекунд. Импульсную работу магнетронов можно также организовать путём группировки импульсов в отдельные пакеты или пачки, т.е. в виде так называемого пакетно-импульсного режима. В работе [17,23] такой режим позволил существенно повысить частоту повторения импульсов, не увеличивая тепловой нагрузки на распылительную систему. В [24] пакетно-импульсная модуляция использовалась в источнике питания магнетрона на базе газоразрядного таситрона с относительно малым допустимым средним током, но большой амплитудой разрядного тока. Пакетно-импульсный режим также рекомендовался для использования в термоионных устройствах для осаждения плёнок с индукционным ионизатором паров металла [25]. В последние годы исследованиями и разработками пакетно-импульсных режимов для магнетронов и других ионно-плазменных устройств интенсивно занимаются в Германии [26,27]. На рис. 4.3 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие данный режим питания импульсных МРС.

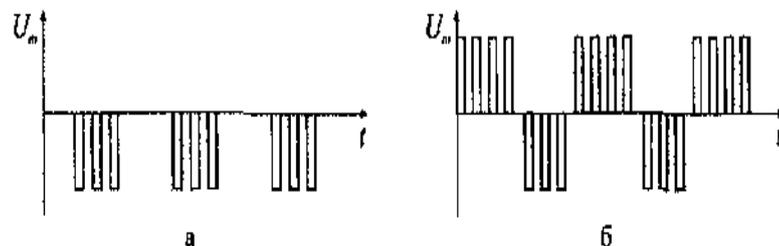


Рис. 4.3. Пакетно-импульсная модуляция униполярного (а) и биполярного (б) напряжения питания МРС.

В работе импульсной МРС можно выделить три основных периода: стартовый, квазистационарный - на вершине импульса тока и послеразрядный [17,23].

В стартовый период происходит формирование распыляющего разряда: разрядный ток нарастает до некоторого равновесного значения, определяемого параметрами цепи питания. Когда пауза между импульсами велика (> 1 мс) и мала концентрация остаточных заряженных частиц в разрядном промежутке, формирование распыляющего импульсного разряда происходит каждый раз заново со временем запаздывания порядка десятков микросекунд и его большим разбросом. Это, в свою очередь, приводит к флуктуации длительности импульсов разрядного тока и даже их пропускам.

Минимизация времени запаздывания (до нескольких микросекунд) и его разброса достигается поддержанием в МРС слабotoчного подготовительного разряда постоянного тока, создающего некоторую начальную концентрацию заряженных частиц. Исследования показали [17,23], что в период запаздывания после подачи импульса напряжения в МРС может возникать слабotoчный высоковольтный разряд, который так же, как и специально создаваемый подготовительный разряд, набирает некоторую критическую концентрацию частиц, после чего начинается собственно процесс формирования распыляющего разряда.

В случае малоиндуктивной цепи питания продолжительность последнего процесса определяет длительность переднего фронта импульса разрядного тока. Время формирования разряда можно также оценивать временем, во время которого напряжение на магнетроне снижается от амплитудного значения до равновесного, соответствующего напряжению поддержания разряда. Время формирования составляет единицы-десятки микросекунд и зависит от разрядных условий.

Время запаздывания и формирования распыляющего разряда снижаются при увеличении амплитуды импульсов напряжения и давления газа: первое - за счет повышения коэффициента вторичной ионно-электронной эмиссии катода-мишени, второе - из-за увеличения частоты столкновений электронов с газовыми молекулами. Время формирования возрастает при повышении амплитуды импульса тока, поскольку увеличивается время, необходимое для генерации большей концентрации заряженных частиц. В МРС с "несбалансированным" магнитным полем время запаздывания снижается по сравнению с "классическими" МРС, имеющими магнитное поле, локализованное около мишени, из-за расширения области ионизации газа.

Повышение частоты повторения импульсов и уменьшение длительности токовой паузы приводят к возрастанию остаточной концентрации заряженных частиц и снижению

времени запаздывания, так что при паузе менее 20-50 мкс отпадает надобность в подготовительном разряде [17,23]. Это условие автоматически соблюдается при использовании биполярных импульсов или среднечастотного синусоидального напряжения.

Квазистационарный период и распыление мишени начинаются с момента установления равновесного напряжения на распыляющем разряде. Равновесное напряжение близко к падению напряжения на разряде постоянного тока и составляет 400-900В в зависимости от давления газа, конструкции и материала мишени, величины и конфигурации магнитного поля. Разрядное напряжение, как правило, слабо зависит от величины тока. Однако это более-менее точно выполняется при прямоугольных импульсах напряжения и тока длительностью порядка 100 мкс и больше. Этот случай представлен на рис. 4.4, где приведены упрощённые диаграммы напряжения и тока МРС при питании униполярными импульсами. Здесь выброс на фронте импульса напряжения соответствует стартовому периоду, когда напряжение на магнетроне больше равновесного, F - частота повторения импульсов, T_1 и T_2 - длительности импульсов и пауз.

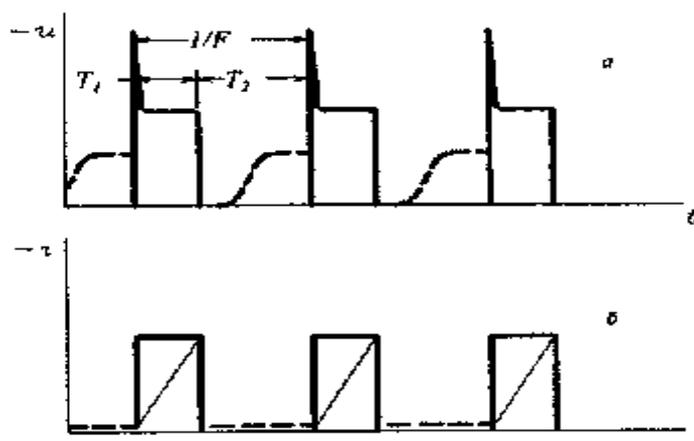


Рис. 4.4. Диаграммы униполярных импульсов напряжения (а) и тока (б) МРС с одним магнетроном.

Иногда в цепь питания магнетрона включают дроссель, например, для ограничения амплитуды тока при срыве в дуговой разряд. В этом случае токовый импульс может иметь треугольную форму (тонкая линия на рис. 4.4.6).

Если питание МРС осуществляется импульсами, амплитуда которых ненамного превышает напряжение поддержания разряда, паузы между импульсами значительные, а сами импульсы имеют длительность порядка или немного больше времени формирования, то распыляющий разряд не имеет равновесного значения напряжения, т.е. квазистационарной формы. Это наблюдается при использовании ёмкостных накопителей

энергии в качестве генераторов напряжения и малого балластного сопротивления [29]. При этом передний фронт импульса тока составляет значительную часть импульса или же ток нарастает в течение всего импульса. Последнее приводит к треугольной форме токового импульса даже в цепи с активным характером импеданса (тонкая линия на рис. 4.4.6). В этом режиме падение напряжения на разряде зависит от текущего значения разрядного тока, времени измерения и предыстории разряда, т.е. параметров предыдущего импульса тока и длительности паузы. Так, при импульсах длительностью до 20-50 мкс разряд имеет повышенное напряжение, которое на 100-200 В выше напряжения на разряде с длинными импульсами и сильно зависит от тока.

В послеразрядный период происходит деионизация (распад) остаточной плазмы магнетронного разряда. Основным механизмом деионизации - амбиполярная диффузия заряженных частиц к стенкам камеры с последующей рекомбинацией на них.

При использовании униполярных импульсов и подготовительного разряда в паузе между импульсами наблюдается следующая картина (штриховые линии на рис. 4.4) [28]: после окончания импульса тока напряжение на магнетроне спадает почти до нуля из-за шунтирования послеразрядной плазмой межэлектродного промежутка - этот период можно назвать периодом избыточной ионной проводимости, а практически все напряжение источника питания падает на балластном сопротивлении подготовительного разряда. Затем по мере распада плазмы напряжение достигает значения, соответствующего напряжению поддержания подготовительного разряда. Время восстановления напряжения подготовительного разряда составляет несколько десятков микросекунд, и оно может служить мерой продолжительности процесса деионизации.

В случае асимметричных биполярных импульсов (рис. 4.1, нижняя диаграмма) деионизация происходит в положительный полупериод, когда напряжение на магнетроне не достаточно для поддержания ионизационных процессов. Наличие напряжения не препятствует рекомбинации заряженных частиц на мишени и других поверхностях.

В случае симметричных биполярных импульсов (см. рис. 4.2) ионизация происходит в оба полупериода, но главным образом около магнетрона, имеющего отрицательный потенциал. В пространстве около второго магнетрона (который служит анодом) также происходит ионизация, но менее эффективно из-за отсутствия высокоэнергетичных вторичных электронов, генерируемых при бомбардировке мишени ионами и ускоряемых в катодном слое положительного пространственного заряда. В результате, в МРС со спаренными магнетронами в каждый полупериод происходит перераспределение концентрации заряженных частиц, сопровождаемое частичной деионизацией.

При питании МРС среднечастотным синусоидальным напряжением наблюдается аналогичная картина, но при работе на низкой частоте (50-400 Гц) происходит полная деионизация при напряжениях, меньше напряжения поддержания разряда, т.е. в области вблизи перехода через нуль.

На практике для питания МРС с одним магнетроном наиболее часто применяют напряжение (ток) в виде униполярных и ассиметричных биполярных прямоугольных импульсов рис.4.1. Такие импульсы создают условия более полного использования времени для передачи энергии в разряд.

Надо отметить, что реальные формы импульсов напряжения и тока магнетронов имеют сложную форму, которая только напоминает прямоугольную.

Для генерации импульсов применяют различные схемы (модуляторы); некоторые описаны в [16,23,28]. Их разделяют на три группы:

- генераторы напряжения, которые имеют очень низкое внутреннее сопротивление и позволяют поддерживать заданное напряжение на нагрузке,
- генераторы тока, которые имеют очень большое внутреннее сопротивление и позволяют поддерживать заданный ток в нагрузке,
- источники смешанного типа.

На рис. 4.5 приведена схема импульсного модулятора первого типа [16,19]. Здесь К и А - катод (мишень) и анод МРС. Ёмкостной накопитель энергии С обеспечивает постоянство униполярного напряжения на нагрузке независимо от потребляемого тока. S - электронный модулирующий прибор с низким внутренним сопротивлением, например, транзисторный или таситронный ключ [16,24,30,31]. Источник напряжения Е служит для заряда С.

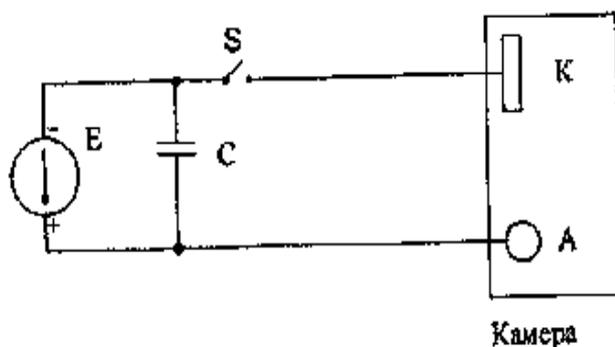


Рис. 4.5. Импульсный модулятор с ёмкостным накопителем энергии (С).

Эта схема позволяет получать амплитуду импульсов тока больше максимального тока источника Е, но имеет недостатки: значительные флуктуации тока и мощности

разряда в случае нестабильной вольт-амперной характеристики магнетрона, трудность возникновения и большие времена запаздывания и формирования разряда при включении S , обусловленные тем, что величина E равна напряжению поддержания разряда, которая всегда меньше напряжения зажигания. Поэтому импульсы тока имеют длительность фронта несколько десятков микросекунд, а при длительности импульсов порядка 10-50 мкс форма импульсов тока - треугольная (тонкая линия на рис. 4.4.б) [29]. Даже могут наблюдаться пропуски импульсов при большой паузе между ними.

Кроме того, требуется быстродействующая система для выключения S в случае срывов магнетронного разряда в дугу, иначе в месте дугообразования выделится практически вся энергия, накопленная в ёмкости C , с последующим взрывом этого места. На практике, последовательно с прибором S включают балластное сопротивление или индуктивность для ограничения тока магнетронного разряда и энергии дуги, величину E выбирают больше напряжения поддержания разряда, чтобы создать избыток напряжения в период формирования разряда, и вводят устройство для создания подготовительного разряда в паузе между импульсами. В таком случае схема на рис. 4.5 перестает быть идеальным генератором напряжения.

Модулятор по этой схеме больше всего подходит для создания положительных импульсов напряжения на мишени для перезаряда диэлектрических слоев или для подачи импульсов отрицательного смещения на подложку.

Модулятор второго типа (генератор тока) можно построить по схеме, показанной на рис. 4.5, если в качестве ключа S взять мощную электронную лампу с большим внутренним сопротивлением типа лучевого тетрода или пентода [24,28]. В этом случае ток магнетрона будет определяться потенциалом управляющей сетки лампы, а величина E выбирается намного больше напряжения поддержания разряда, что ускоряет его формирование. В результате длительность фронта импульсов тока не превышает нескольких микросекунд. Подобный электронно-ламповый модулятор обладает высоким быстродействием, обеспечивает широкий диапазон регулировки параметров импульсов и эффективное ограничение и выключение токов короткого замыкания нагрузки или дуги. Его недостатком является пониженный к.п.д. из-за падения напряжения на лампе порядка 600 В и затрат на накал катода, а также некоторая громоздкость конструкции.

Известно, что индуктивность может служить источником или ограничителем тока, поэтому импульсный модулятор, работающий в режиме генератора тока, можно создать на базе большой индуктивности L , включаемой последовательно с магнетроном (рис. 4.6).

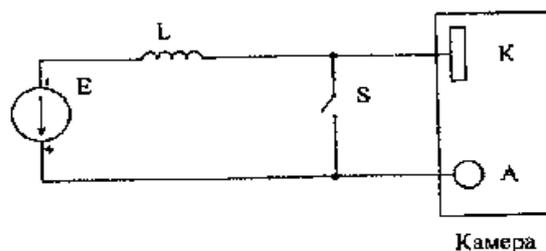


Рис. 4.6. Импульсный модулятор с индуктивным накопителем энергии (L).

Когда электронный ключ S замкнут, ток источника E идет только через дроссель L, запасая в нём магнитную энергию. Когда ключ разомкнут, источник и дроссель поддерживают ток в магнетроне. Если дроссель передаёт в разряд только небольшую часть своей энергии, то импульсы тока имеют почти прямоугольную форму. В качестве ключа следует применять высоковольтные транзисторы. Недостаток этой схемы заключается в возможности появления перенапряжений в случае отсутствия разряда в магнетроне, но это, в свою очередь, стимулирует его зажигание в начале импульса и уменьшает время формирования разряда. Для снижения перенапряжений и защиты транзисторов от пробоев применяют специальные гасящие элементы и устройства.

В случае возникновения дуг их ток не может превысить ток дросселя, а быстрое аварийное включение S шунтирует нагрузку и гасит дугу. В итоге, при мощности разряда около 100 кВт энергия дуги не превышает 0,1 Дж. Индикатором образования дуги является уменьшение напряжения до величины меньше напряжения поддержания магнетронного разряда.

В этой схеме ток регулируется изменением напряжения E, величины L и скважности импульсов. Последнее позволяет применять нестабилизированный источник постоянного тока. Кроме того, можно применять источник с напряжением меньше напряжения поддержания магнетронного разряда.

Модуляторы смешанного типа применяют для генерации асимметричных биполярных импульсов, в соответствии с функциями каждого полупериода. В отрицательный полупериод поддерживается расплывающийся разряд и модулятор должен работать как генератор тока. В положительный полупериод происходит перезарядка диэлектрических пленок на мишени электронным током, и модулятор должен работать как генератор напряжения. Данное сочетание характеристик модулятора можно получить в схеме, показанной на рис. 4.7 и являющейся комбинацией схем, приведенных на рис. 4.5 и рис. 4.6.

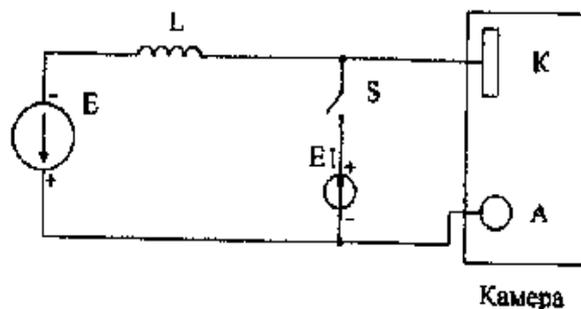


Рис. 4.7. Генератор асимметричных биполярных импульсов

Здесь источник постоянного тока E и дроссель L генерируют и ограничивают разрядный ток магнетрона. При замыкании электронного ключа (транзистора) S к катоду-мишени магнетрона подключается положительный полюс источника $E1$, который осуществляет перезарядку диэлектрических слоев на мишени с положительного потенциала (относительно катода) до отрицательного. Величина $E1$ не более 100 В, но ток этого источника не лимитируется. После выключения S дроссель L поднимает напряжение на катоде, пока не возникнет магнетронный разряд.

Необходимо отметить, что импульсное распыление материалов имеет свои особенности – при массопереносе вещества на подложку поток распыленных атомов должен изменяться во времени в соответствии с законом модуляции тока магнетронного разряда.

Амплитуда модуляции потока зависит от многих факторов и в некоторых случаях она настолько мала, что её можно не принимать во внимание.

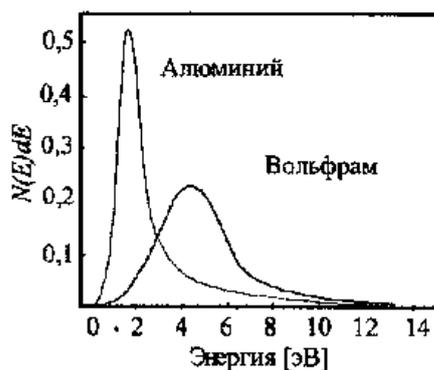


Рис. 4.8. Распределение распылённых атомов по энергиям.

Средние начальные кинетические энергии распылённых атомов составляют несколько электронвольт, а распределения распылённых атомов по энергиям показаны на рис. 4.8 на примере алюминия и вольфрама. При низком давлении газа некоторые атомы

могут долететь до подложки практически без столкновений и при расстоянии между мишенью и подложкой 10 см время пролета для атомов Al будет составлять 20-40 мкс. На самом деле, при реально используемых давлениях имеется значительное рассеивание распылённых атомов на молекулах рабочего газа. Это приводит к увеличению времени переноса этих атомов. Случайный характер рассеивания атомов в газе и разброс их энергии и углов вылета из мишени приводит к расширению функции распределения времени переноса (рис. 4.9).

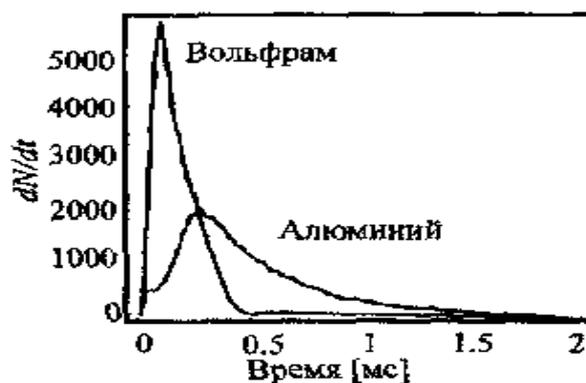


Рис.4.9. Распределение распылённых атомов по времени переноса до подложки [32].

Давление аргона 0,66 Па, расстояние между мишенью и подложкой 10 см

Как видно, большинство распылённых атомов имеют время переноса больше 40 мкс, соответствующего бесстолкновительному режиму. Атомы Al тратят больше времени на транспортировку, чем атомы W, поскольку они имеют меньшую начальную энергию (см. рис.4.8), малую массу и быстро термализуются в газе. На рис. 4.10 приведена функция распределения для времени прибытия всех атомов Al, распылённых во время единичного импульса длительностью 100 мкс, показанного пунктирной линией на поле того же рисунка. Таким образом, время прибытия атомов на подложку может быть больше длительности импульса тока распыляющего разряда и даже больше периода повторения импульсов.

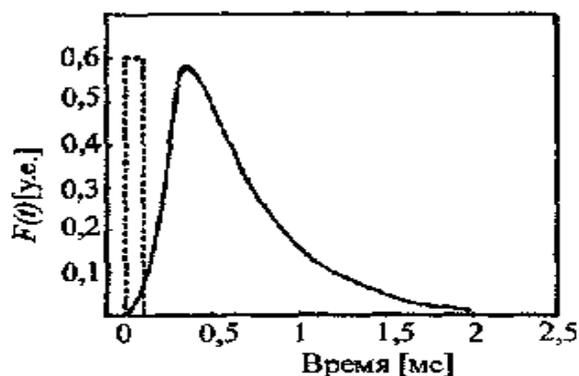


Рис. 4.10. Распределение атомов по времени осаждения [32]. Давление аргона 0,66 Па, расстояние между мишенью и подложкой 10 см.

В режиме повторения импульсов материал, распылённый из мишени во время различных импульсов, будет накапливаться на подложке.

Это приведет к формированию интегральной функции распределения времени прибытия распылённых атомов, которая будет равна сумме распределений от большого числа последовательных импульсов.

На рис. 4.11 и рис. 4.12 приведены результаты расчетов [33] для пакетно-импульсного режима питания магнетронного разряда при пяти импульсах в пакете. Давление аргона составляло 0,133 Па, расстояние между мишенью и подложкой - 3,6см. Длительность импульсов - 25 мкс, частота их следования внутри пакета и длительность токовой паузы изменялись. Расчет был сделан для импульсов, форма которых наиболее часто реализуется на практике: прямоугольной, имитирующей быстрое формирование магнетронного разряда в малоиндуктивной цепи питания, и треугольной, имитирующей замедленное формирование разряда или цепь питания с повышенной индуктивностью. Видно, что в режимах, когда длительность токовой паузы между импульсами составляет десятки микросекунд, а давление газа порядка 1-2 Па, наблюдается значительная амплитудная модуляция осаждающегося на подложку потока атомов. Уменьшение длительности токовой паузы приводит к снижению уровня модуляции, но она все равно сохраняется. В случае импульсов треугольной формы уровень модуляции потока осаждающихся атомов выше. Осаждение распылённого титана на подложку продолжается в течение десятков-сотен микросекунд после окончания пакета импульсов.

Для изучения переходного процесса в начальный период после включения магнетронной системы и условий выхода процесса осаждения на некоторый стационарный уровень были выполнены расчеты [33] для режима с непрерывной последовательностью импульсов (рис.4.13) для тех же значений параметров, что и в случае рис. 4.11 и рис. 4.12. Как видно, действительно, имеется переходной процесс выхода системы на некоторый "квазистационарный" уровень скорости осаждения.

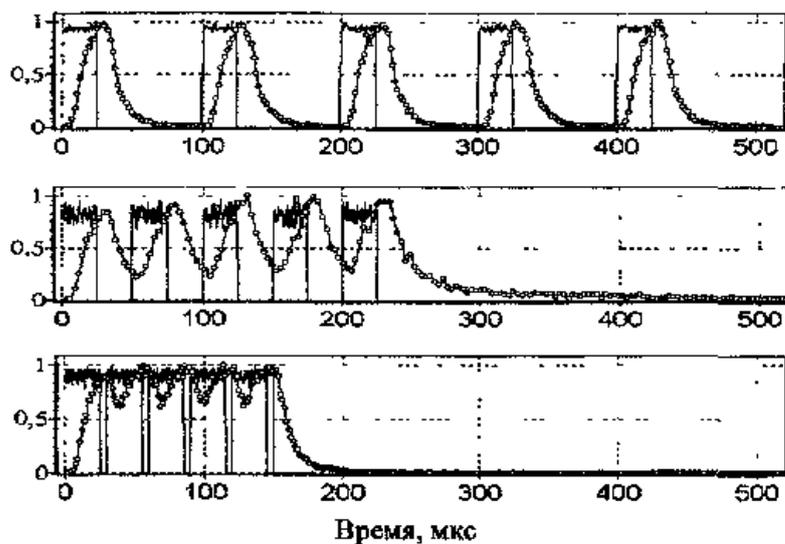


Рис.4.11. Динамика импульсного распыления (сплошные кривые) и осаждения (кривые с кружками) атомов Ti в пакетно-импульсном режиме при прямоугольной форме импульсов тока.

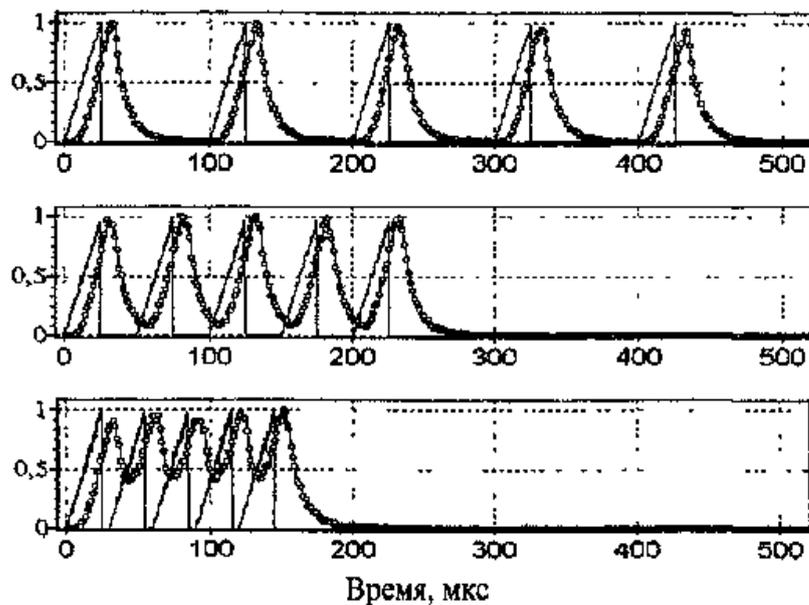


Рис. 4.12. Динамика импульсного распыления (сплошные кривые) и осаждения (кривые с кружками) атомов Ti в пакетно-импульсном режиме при треугольной форме импульсов тока.

В типичных режимах работы импульсных МРС (произведение давления газа на расстояние мишень-подложка порядка $1 \text{ Па}\cdot\text{см}$, длительность импульсов 25 мкс) длительность переходного процесса составляет несколько сотен микросекунд.

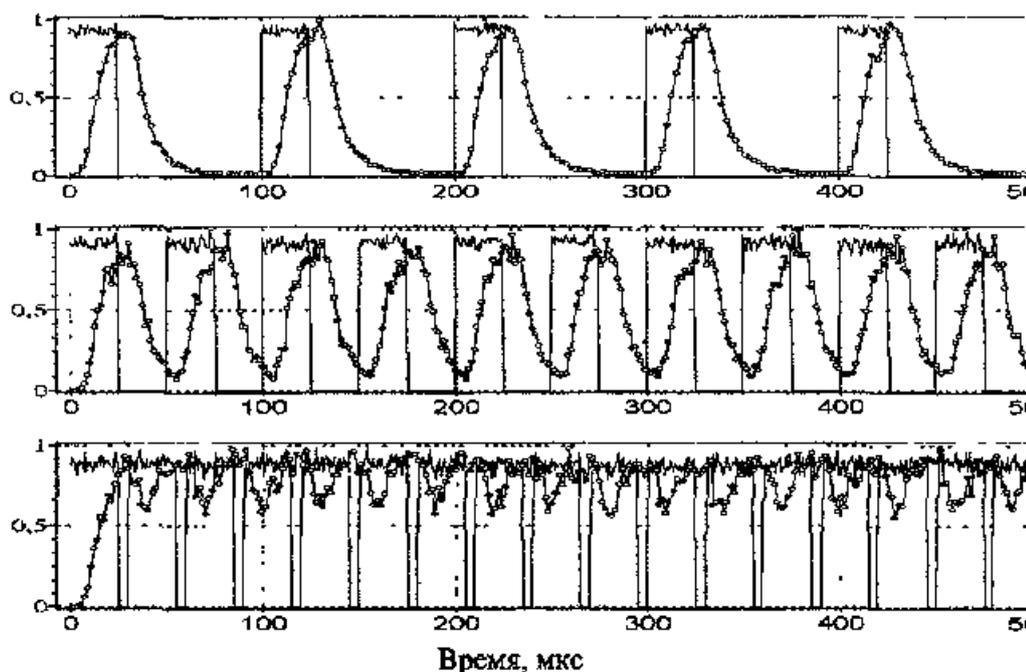


Рис. 4.13. Динамика импульсного распыления (сплошные кривые) и осаждения (кривые с кружками) атомов Ti при непрерывной последовательности прямоугольных импульсов тока/

При увеличении давления и расстояния мишень-подложка длительность переходного процесса возрастает, но уровень модуляции потока осаждаемого вещества снижается. Как и в режиме пакетированных импульсов, форма импульсов разрядного тока влияет на форму импульсов потока осаждающихся атомов и уровень его модуляции: он больше в случае треугольной формы импульсов.

При высоких частотах повторения импульсов (30-100 кГц) ширина функции распределения времен прибытия распылённых атомов намного больше длительности импульсов и периода их повторения, поэтому наблюдается практически постоянное, независящее от времени, осаждение материала мишени на подложку. Поскольку на высоких частотах также отсутствует временное изменение состояния поверхности мишени в реакционном процессе распыления, не будет какой-либо вариации состава осаждаемого покрытия, коррелирующей с модуляцией тока магнетронного разряда.

В следующем разделе будет рассмотрена реализация метода магнетронного распыления материалов на примере промышленной вакуумной автоматизированной установке Caroline D12A.

5. Применение импульсных МРС на примере промышленной установки Caroline D12A.

5.1. Назначение и устройство установки. Основные технические характеристики.

Вакуумная напылительная установка Caroline D12A рис.5.1.1 предназначена для мелко- и среднесерийного производства и проведения исследовательских работ в области осаждения тонких пленок методом магнетронного и термического распыления.



Рис.5.1.1. Автоматизированная установка магнетронного и термического напыления Caroline D12A.

В качестве подложек могут быть использованы различные материалы: ситал, поликор, керамика, кремний и т.д.

Установка обеспечивает напыление пленок Al, Cu, Ti, Cr, Si и других металлов и полупроводников, а также их оксидов и нитридов (при соответствующем выборе технологических режимов).

Технические характеристики установки приведены в таблице 5.1.1.

Таблица 5.1.1. Технические характеристики.

Количество подложек, обрабатываемых за 1 цикл (шт)	12шт. Ø100 мм. 24 шт. 60x48
Стартовое давление в рабочей камере, Па	10^{-3}

Расход подаваемых в камеру рабочих газов по одному каналу (л/час)	0÷9
Количество подаваемых (неагрессивных) газов до (шт.)	3
Количество подаваемых (неагрессивных) газов до (шт.)	1
Количество термических испарителей до (шт.)	2
Количество магнетронов в установке (шт.)	1÷4
Тип магнетронов для напыления пленок	Импульсный среднечастотный
Рабочий ток магнетронов, регулируемый (А)	0,5÷8
Рабочее напряжение магнетронов (В)	300÷650
Материал и размер мишеней: металлы, сплавы, РС, кремний (могут использоваться составные мишени не прямого охлаждения), мм	Ø 100×4÷12
Рабочее давление в вакуумной камере, Па	0,7÷0,3
Диапазон контроля сопротивления свидетеля (кОм)	0,2÷20
Погрешность измерения сопротивления (%)	±3
Рекомендуемая температура нагрева подложек, °С	50÷250
Нестабильность температуры подложек (%)	±5
Предельное остаточное давление в рабочей камере, (Па)	2×10^{-4}
Время подготовки установки к работе с учетом "разгона" крионасоса не более (мин)	110
Масса со стойкой питания и управления, кг.	До 1850

Установка состоит из агрегата технологического (1), шкафа управления (2) и форвакуумного насоса (3) (Рис.5.1.2).

Основой агрегата технологического является рабочая камера (4) с технологическими и внутрикамерными устройствами.

Камера рабочая и технологические устройства установлены на плите которая закреплена на сварной раме. Под рамой размещены ряд устройств для обеспечения работы установки. Высоко вакуумная система (5), в основу которой входит криогенный насос, закреплена на плите снизу. Затвор (11) отделяет систему откачки от камеры. Панель пневмоаппаратуры (6) служит для распределения сжатого воздуха по пневмоузлам. Блок водораспределительный (7) служит для распределения водяного охлаждения узлов установки. Блок гидроаппаратуры (8) предназначен для создания давления в гидроцилиндре механизма подъема и поворота. Механизм подъема и поворота (9) используется в качестве вспомогательного устройства для открывания и поворота крышки

камеры. После открывания и поворота крышки открывается доступ к технологическим устройствам для их обслуживания. Панель газонапуска (10) установлена изолировано от корпуса на специальном кронштейне под плитой. Для обеспечения техники безопасности и внешнего вида установки на раму навешены кожуха.

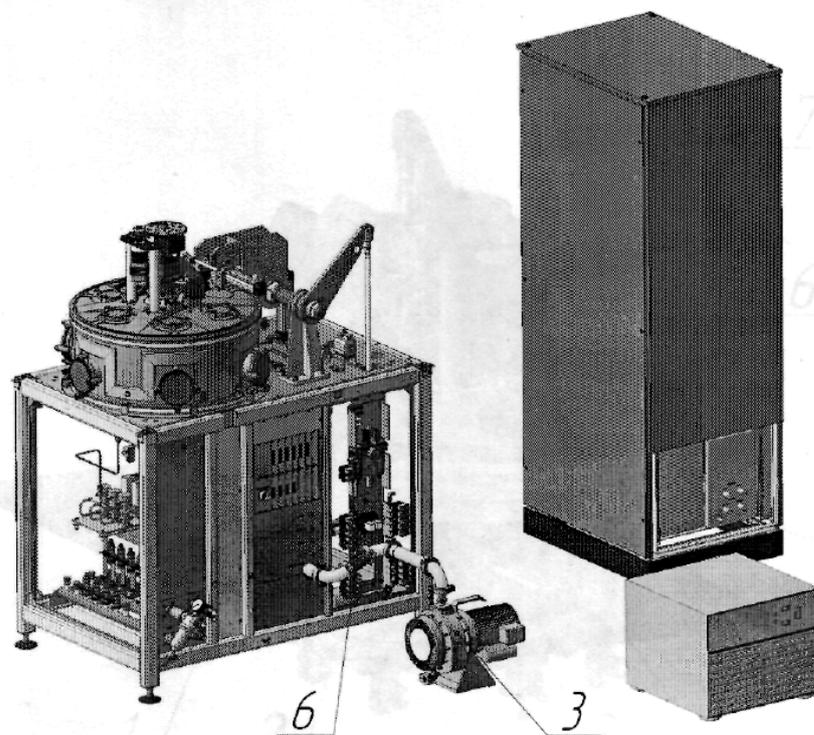
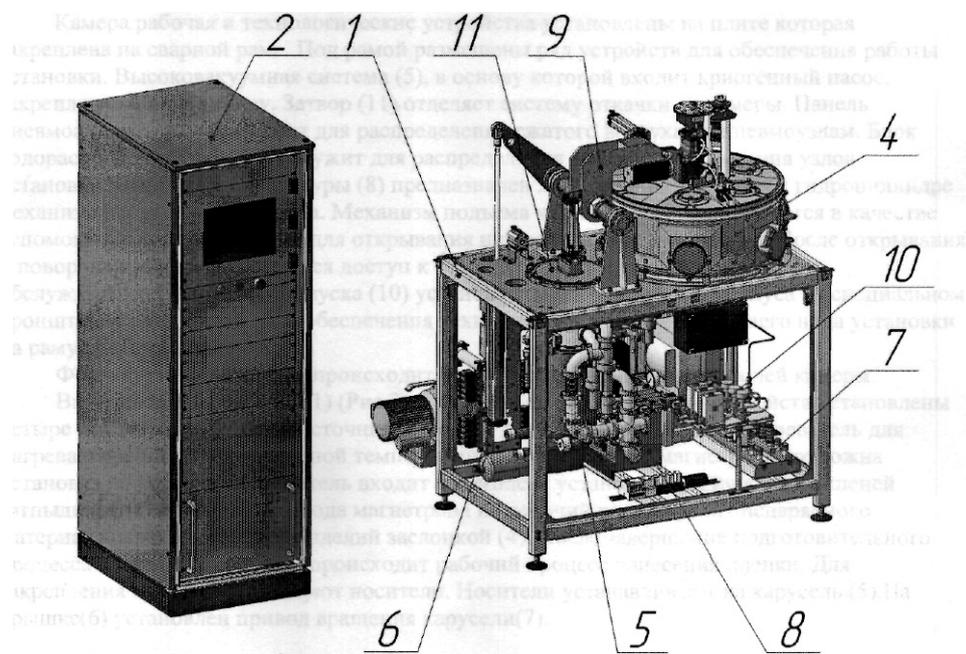


Рис.5.1.2. Установка Каролина Д12А.

Форвакуумным насосом происходит предварительная откачка рабочей камеры.

Внутри камеры рабочей(1) (Рис.5.1.3) в качестве технологических устройств установлены четыре магнетрона (2), один источник ионов (3) для очистки изделий и нагреватель для нагрева изделий до определенной температуры. Вместо одного магнетрона возможна установка испарителя. Испаритель входит в комплект установки. Для очистки мишеней (отпыливания) и на время выхода магнетрона на рабочий режим фронт испаряемого материала перекрывается от изделий заслонкой (4). После завершения подготовительного процесса заслонку убирают и происходит рабочий процесс нанесения пленки. Для закрепления изделий используют носители. Носители устанавливаются на карусель (5). На крышке(6) установлен привод вращения карусели(7).

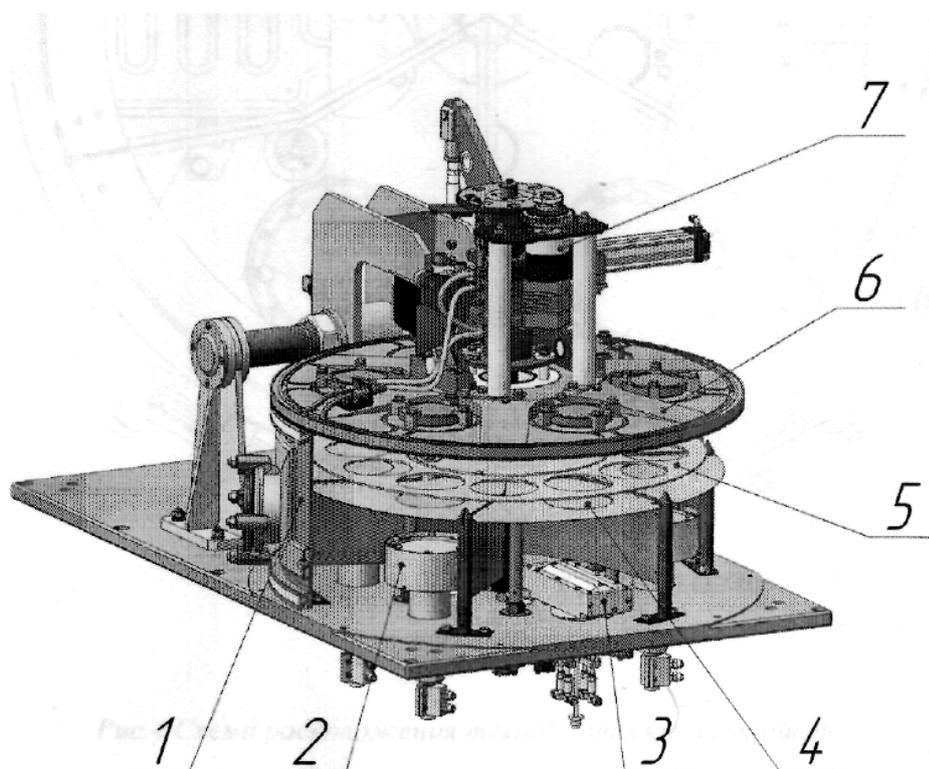


Рис.5.1.3. Внутрикамерное устройство

С целью регулировки частоты вращения он оборудован энкодером и преобразователем частоты. Для того чтобы нанести пленку одного материала на все изделия, карусель с носителями вращается с небольшой скоростью до тех пор пока толщина пленки не достигнет требуемой толщины или требуемого параметра сопротивления. Окончание процесса нанесения сплавов определяется по свидетелю или по времени.

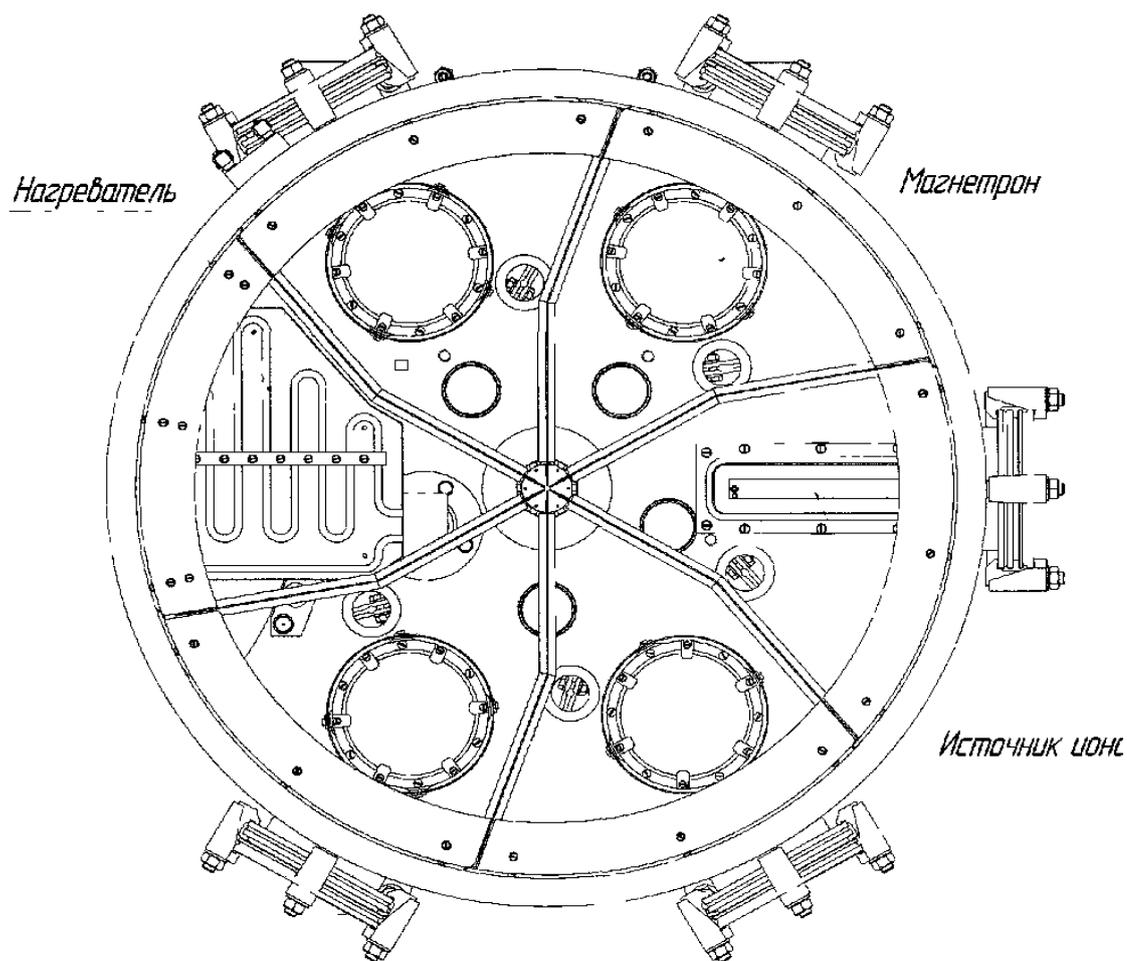
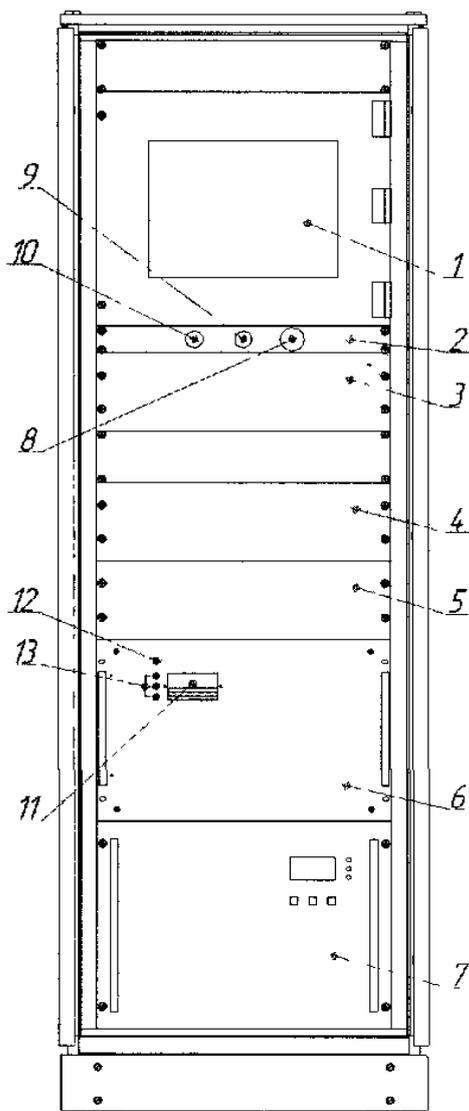


Рис.5.1.4. Схема расположения технологических устройств

Управление работой установки Caroline D12A осуществляется со шкафа управления рис.5.1.5.



- Блока питания магнетронов (5)
- Блок питания источника ионов (4)
- Система охлаждения (7)
- Блок контроллеров (3)
- Системный блок
- Блок силовой (6)
- Измеритель регулятор
- Вакуумметр
- Монитор (1)
- Панель управления
- Аварийное откл. питания (8)
- Откл. сервисного питания (9)
- Вкл. сервисного питания (10)

Рис.5.1.5. Шкаф управления

5.2. Основные блоки и модули установки.

Вакуумный пост установки обеспечивает безмаслянную высоковакуумную откачку рабочей камеры до остаточного давления $2 \cdot 10^{-4}$ Па и состоит из форвакуумного спирального насоса (со скоростью откачки 4 л/с и предельным вакуумом 1,6 Па) марки ANEST IWATA ISP-250 В и криогенного насоса CRIO-TORR 8, СТИ (США), имеющего скорость откачки 1500 л/с по азоту или 1200 л/с по аргону. Механический безмаслянный спиральный форвакуумный насос вынесен за установку.

Рабочая камера 4 установки (рис.5.1.2.) содержит полный набор устройств рис.5.1.3, необходимых для решения различных исследовательских и технологических задач. В зависимости от выбранной комплектации в набор входят от одного до четырех

магнетронных источников, один - два термических испарителя, устройство плазменной очистки подложек, карусель для позиционирования подложек и нагреватель подложек. Рассмотрим эти узлы подробнее.

На горизонтальном диске карусели диаметром 480 мм можно разместить до 12 полупроводниковых пластин диаметром 100 мм или 24 ситалловые подложки размером 48x60 мм. Карусель электрически изолирована от корпуса установки. Электрический вывод подачи на подложки постоянного отрицательного или импульсного напряжения смещения выведен наружу. На карусели установлен и держатель датчика сопротивления (свидетеля), контакты которого через коллектор также выведены наружу. Привод, установленный сверху на колпаке рабочей камеры, обеспечивает вращение загруженной карусели с регулируемой скоростью 0-20 оборотов/мин. С помощью отдельных приводов можно управлять и положением заслонок 4 рис.5.1.3 (открыта или закрыта), назначение которых - очистка мишени любого магнетрона перед напылением или очистка навески термического испарителя путем предварительного испарения.

Для нанесения за один цикл нескольких слоев различных материалов под каруселью располагаются магнетроны 2 рис.5.1.3 и рис.5.2.1 с круглыми горизонтальными мишенями диаметром 100 мм. Мишень удерживается на охлаждаемом водой основании прижимной рамкой, над которой расположен изолированный от корпуса установки анод магнетрона. Весь катодный узел окружен защитным экраном.

Кроме магнетронов под каруселью находится устройство плазменной очистки 3 рис.5.1.3 и рис.5.2.2. С его помощью проводится предварительная очистка подложек бомбардировкой ионами кислорода (или любого другого рабочего газа). Эта операция обычно занимает 3 мин.

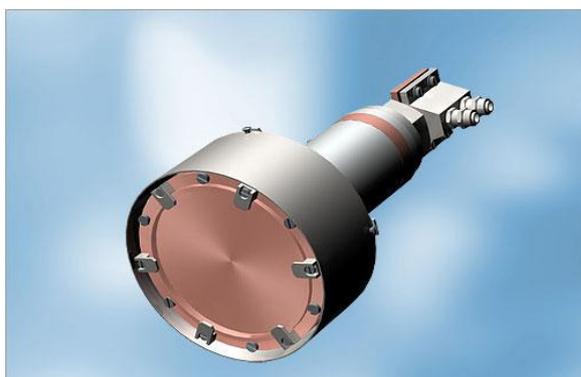


Рис.5.2.1. Магнетрон Д100.

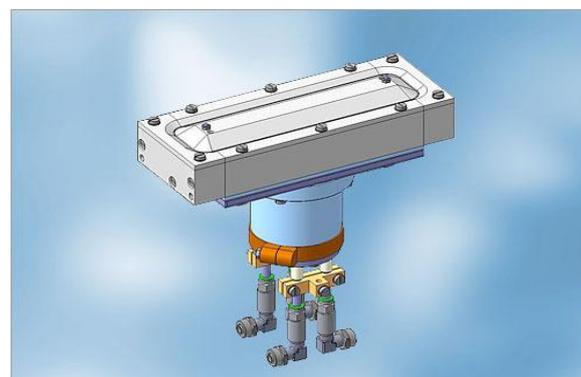


Рис.5.2.2. Источник ионов.

Перед нанесением пленок подложки нагреваются излучением резистивного нагревателя мощностью 2,5 кВт до заданной по технологии температуры (максимальная

300 °С). Температура измеряется с точностью $\pm 5\%$ с помощью платинового резистивного датчика, установленного на карусели. Технологические газы (аргон, азот и кислород) подаются в камеру через газораспределительную систему, выполненную из нержавеющей стали. Поток газов независимо автоматически контролируется трехканальными регуляторами расхода газов 10 рис.5.1.2, на базе РРГ-10 с запорными клапанами. Расход рабочего газа регулируется в диапазоне 0-9 л/час. Управление трехканальной прецизионной системой газонапуска производится в автоматическом режиме согласно технологической программе.

Стойка питания и управления 2 рис.5.1.2 установки располагается слева от вакуумного поста, вплотную к нему рис.5.1.1. В нее входят все блоки управления установкой, в том числе импульсный блок питания магнетронов на средние частоты типа EL разработки фирмы "ЭСТО-Эл". Блок содержит бестрансформаторный преобразователь тока промышленной частоты в импульсы с частотой до 40 кГц, схему стабилизации тока, мощности или напряжения разряда (по выбору), устройство дугогашения, а также средства защиты от короткого замыкания и перекоса фаз. Максимальная мощность блока питания составляет 6 кВт, ток - до 10 А. Значение выходного напряжения блока питания магнетрона достаточно, чтобы гарантировать его работу с любым типом мишени и реактивного газа. Блок питания такого типа незаменим при нанесении диэлектрических слоев методом реактивного магнетронного распыления. По выбору технолога процесс нанесения покрытия может либо заканчиваться в автоматическом режиме, либо по достижении заданного времени напыления, либо после напыления на свидетеля слоя (только первого) заданного сопротивления. Процесс управляется в программируемом автоматическом режиме. Поскольку датчик сопротивления напыляемой пленки при каждом обороте вращающейся карусели попадает в зону плазмы работающего магнетрона, значение измеряемого сопротивления временно искажается. Чтобы исключить такое искажение показаний свидетеля, на приводе вращения карусели наверху рабочей камеры устанавливается датчик положения свидетеля относительно магнетрона (датчик стробирования). Схема измерения сопротивления свидетеля по команде датчика положения считывает информацию только тогда, когда свидетель находится за пределами зоны плазмы магнетрона. Измеренное значение сопротивления запоминается и воспроизводится цифровым индикатором, при каждом обороте карусели показания обновляются. Диапазон контроля сопротивления свидетеля 0,2-20 кОм с точностью $\pm 3\%$.

Блок питания нагревателя подложек и контроля их нагрева обеспечивает контроль заданного и фактического значений температуры (в диапазоне 50-300°С с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$), выводимых на экран дисплея установки, а также плавную подачу напряжения на

нагреватель, стабилизацию температуры изделий и отключение системы нагрева изделий при отсутствии вакуума или охлаждающей воды. В стойке управления предусмотрен блок подачи на подложку во время нанесения пленки напряжения смещения.

Производительность установки - не менее четырех процессов нанесения покрытия в смену. Мощность, потребляемая установкой от сети питания, не превышает 15 кВа.

5.3. Работа установки в автоматическом режиме.

Включение установки. Открыть подачу холодной воды, сжатого воздуха технологических газов, подать электропитание, при этом должен загореться индикатор (12). Включить автомат питания (11) и кнопку подачи сервисного питания (10) (рис.5.1.5). Убедиться в наличии всех фаз – индикаторы (13) должны гореть. Дождаться загрузки программного обеспечения (на мониторе появится главное меню) – установка готова к работе.

Далее работа установки осуществляется по **управляющей программе**, который представляет собой проект, созданный с помощью автоматизированной среды разработки АСУТП Master Scada компании ИНСАТ. Данный проект запускается автоматически после загрузки операционной системы Windows.

Перед переводом системы в режим исполнения необходимо произвести идентификацию оператора. В центре экрана появиться окно для ввода имени и пароля оператора. Нажать кнопку «ОК» и после перевода системы в режим исполнения – произойдет запуск проекта управляющей программы, а на экране появиться окно управления программатора и окно сообщений. При запуске программы необходимо просмотреть все сообщения и если среди них есть – «Загрузка конфигурации контроллера», дождаться изменения шрифта сообщений с жирного на обычный.

Установка имеет три режима работы: программный, программный режим с редактированием (с заданием) переменных и автономный режим.

Программный режим – режим работы установки по заранее созданной программе технологического процесса, в котором все системы находятся в автоматическом режиме под управлением программатора.

Программный режим с редактированием переменных – тоже, что и программный режим, но задания (переменные), т.е. установки давлений расходов газа, мощности и т.п. доступны для изменения (редактирования) пользователем, а управляющие соответствующими системами команды – также поступают от

программатора. Для редактирования какой либо из переменных (установок) необходимо перейти на соответствующую мнемосхему системы и ввести нужное значение параметра.

Автономный режим – режим работы установки, в котором каждая система управляется *отдельно* со своей мнемосхемы. Здесь возможен перевод из *автоматического режима к ручному управлению*. В ручном управлении блокировки, запрещающие некорректные действия оператора не снимаются. Этот режим не является основным и может быть использован для наладки установки.

Выбор одного из трех режимов установки производится в окне управления программатора на панели запуска. Для начала работы установки «Каролина Д12А» в автоматическом режиме (*программном или с редактированием переменных*) необходимо выполнить процедуру включения установки и процедуру проверки выполнения условий готовности систем. Для этого в окне управления системами установки рис.5.3.1 выбирают «контроль систем рис.5.3.2. Здесь отображается информация о готовности систем к работе, а также информация об аварийных ситуациях.

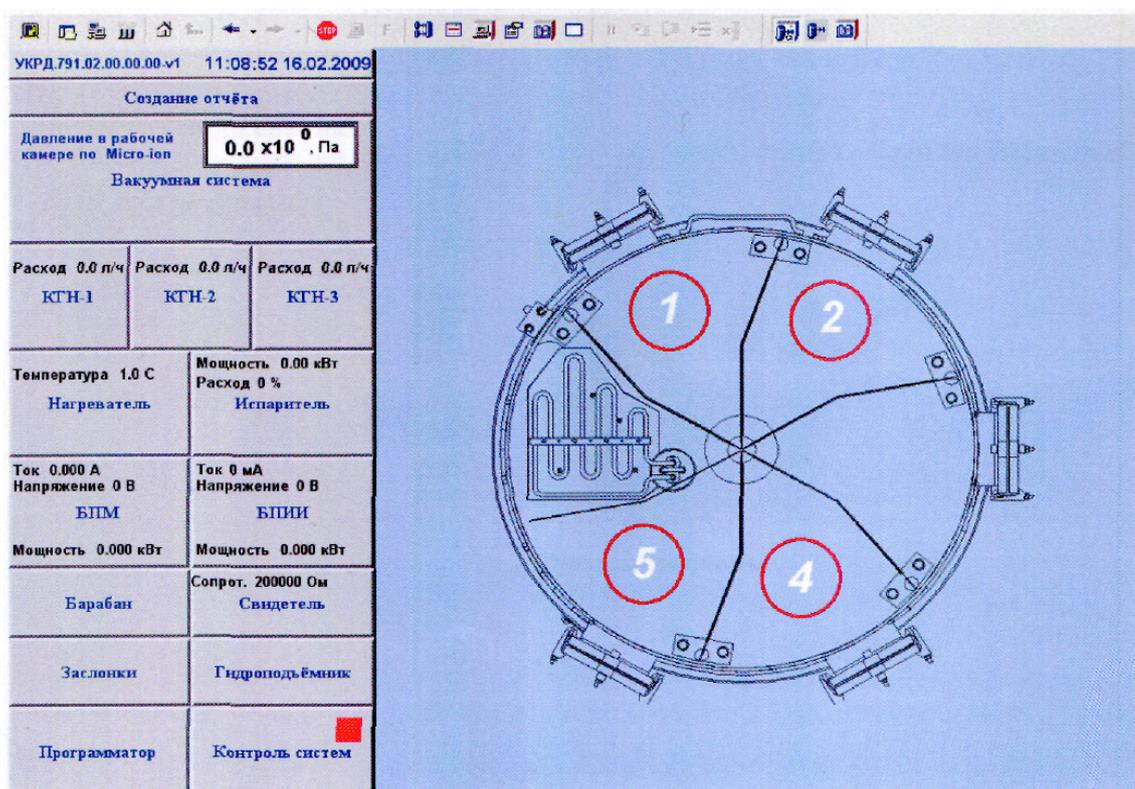


Рис.5.3.1 Окно управления системами установки

Аварии систем		Состояние установки	
<u>Вакуумная система</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Панели агрегата и крышки закрыты</u>	<input type="checkbox"/>
<u>Канал газонапуска 1</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Камера закрыта</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Канал газонапуска 2</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Дверь камеры закрыта</u>	<input type="checkbox"/>
<u>Канал газонапуска 3</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Сжатый воздух есть</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Блок питания магнетронов 1</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Уровень масла в гидростанции</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Блок питания магнетронов 2</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Есть проток в компрессоре КРН</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Нагреватели</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Есть проток в магнетронах, ключе</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Комплекс приводов</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Есть проток в крышке камеры, нагревателе 1, центр. стойке</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Испаритель</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Есть проток в двери камеры, колпаке камеры</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Гидроподъемник</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Есть проток в источнике ионов, испарителе, нагревателе 2</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
<u>Устройства охлаждения жидкости</u>	<input type="checkbox"/>		

Рис.5.3.2 Контроль систем.

Красный цвет означает отсутствие выполнения условия, например, нет сжатого воздуха, на рисунке напротив «Сжатый воздух» горит красный индикатор. Индикатор, находящиеся напротив названий систем установки обозначают наличие аварии в системе. Красный цвет обозначает аварию, зеленый цвет - все в порядке.

Когда установка полностью будет готова к работе, нажмите кнопку **ВКЛЮЧИТЬ** на панели управления программатора.



Рис.5.3.3 Панель управления установкой и вакуумной системой. Кнопки разблокированы.

Системы, которым необходимо выполнить процедуру включения, начнут выполнение этой операции в автоматическом режиме.

Когда все системы будут включены, индикатор состояния покажет состояние «Включено», значит - установка полностью готова к работе.

Для загрузки обрабатываемой пластины нажмите кнопку «Атмосфера» на панели управления программатора. Вакуумная система перейдет в состояние «Атмосфера». Загрузите обрабатываемую пластину в рабочую камеру и нажмите кнопку «Вакуум» или запустите программу тех. процесса, где первый шаг соответственно должен быть «Вакуум». Для контроля параметров проведения процесса перейдите к мнемосхеме управления системами установки. После завершения программы тех. процесса для выгрузки пластины нажмите кнопку «Атмосфера». Вакуумная система выполнит процедуру перехода в состояние «Атмосфера». Поменяйте пластину, дайте команду «Вакуум», дождитесь окончания перехода и запустите программу тех. процесса снова.

Вакуумная система установки может находиться в одном из четырех состояний – «Выключено», «Включено», «Вакуум», «Атмосфера».

Состояние «Выключено» - когда все клапаны закрыты и все насосы выключены, в рабочей камере форвакуум.

Состояние «Включено» - когда форвакуумный насос NZ1-1 выключен, включен и подготавливается криогенный насос, затвор рабочей камеры закрыт.

Состояние «Вакуум» - когда форвакуумный насос NZ1-1 выключен, криогенный насос находится в рабочем режиме, затвор рабочей камеры открыт и рабочая камера откачана до заданного давления.

Состояние «Атмосфера» - когда форвакуумный насос NZ1-1 выключен, включен и подготавливается криогенный насос или криогенный насос находится в рабочем режиме, затвор рабочей камеры закрыт.

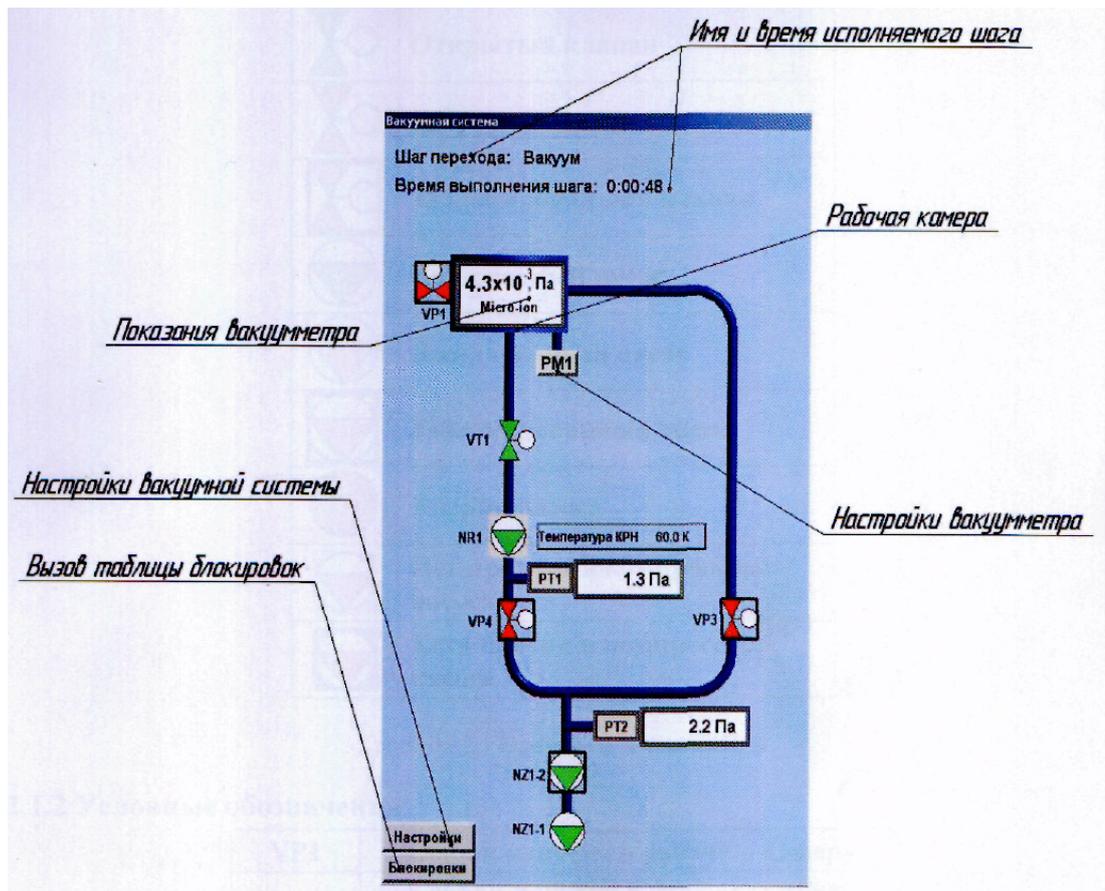


Рис.5.3.4 Вакуумная система

	Открытый клапан
	Закрытый клапан
	Заблокированный клапан
	Включенный насос
	Выключенный насос
	Заблокированный насос
	Авария насоса
	Нет протока в компрессоре насоса
	Есть проток в компрессоре насоса

Таблица 5.3.1 Элементы мнемосхемы

VP1	Клапан напуска в рабочую камеру
VP2	Клапан напуска в форвакуумную линию
VP3	Байпасный клапан
VP4	Форвакуумный клапан
VT1	Затвор рабочей камеры
NZ1-1	ФВН
NZ1-2	ДВН
NR1	КРН
PM1	Датчик Micro-ion
PT1, PT2	Преобразователь манометрический ПМТ 6 - 3

Таблица 5.3.2 Условные обозначения

На панели управления рис.5.3.5 находятся кнопки для ввода команд переходов из одного состояния в другое, датчик давления, кнопка включения режима стабилизации давления, индикаторы состояний, кнопки переключения режима управления, индикаторы выполнения задания по вакууму и стабилизации, индикатор аварии. Кнопки «Выключить», «Включить», «Вакуум», «Атмосфера» блокируются во время выполнения какого-либо перехода и доступны только тогда, когда состояние достигнуто. После ввода команды индикатор перехода отображает, в какое состояние переходит система, а индикатор состояния, - в каком состоянии находилась система. Когда оба индикатора горят возле одной кнопки, значит, система завершила переход и состояние достигнуто.

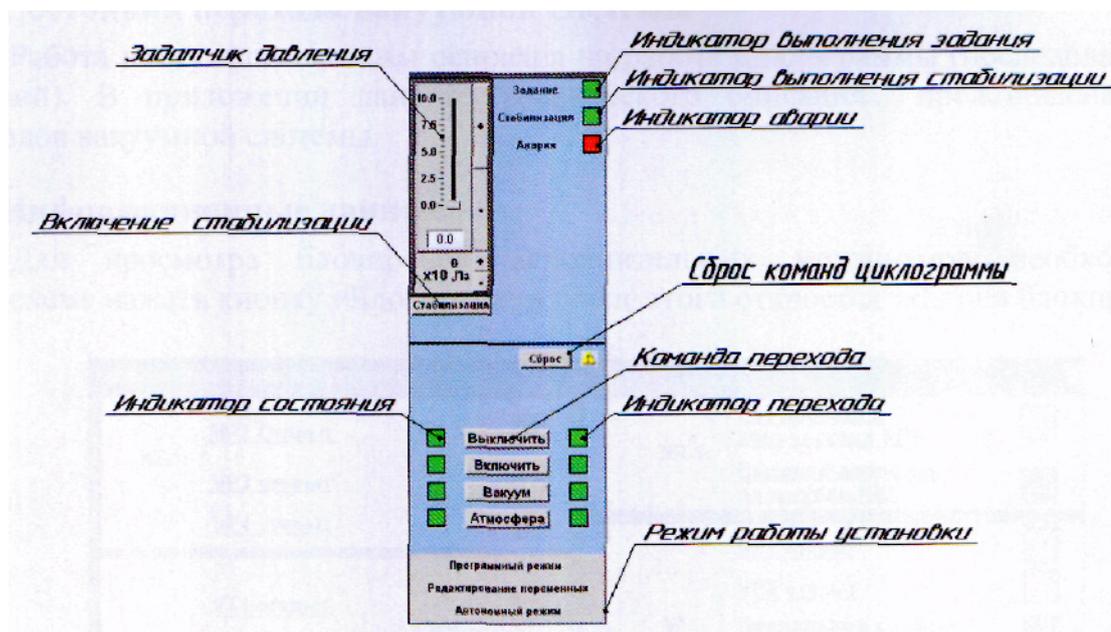


Рис 5.3.5 Панель управления вакуумной системой.

Кнопка «Сброс» предназначена для сброса команд вакуумной системы, используется в случаях когда условие шага не может быть выполнено длительное время.

При нажатии кнопки «Сброс» закрывается затвор рабочей камеры, далее закрывается форвакуумный клапан VP4, затем отключаются форвакуумный насос. После этих операции вакуумная система переходит в выключенное состояние.

Перед началом работы необходимо включить вакуумную систему. Для этого нужно нажать на панели управления вакуумной системой кнопку «Включить». Программа начнет выполнять процедуру включения, в результате которой крио насос будет подготовлен к работе. После этого вакуумная система будет готова к работе.

Для просмотра блокировок исполнительных механизмов необходимо на мнемосхеме нажать кнопку «Блокировки», после этого откроется таблица блокировок.

Таблица блокировок вакуумной системы	
NZ-1: <u>VP2 Открыт</u> <u>VP3 открыт</u> <u>VP4 открыт</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
VP1: <u>VT1 открыт</u> <u>VP3 открыт</u> <u>Камера открыта</u> <u>Дверь камеры открыта</u>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
VP2: <u>VP4 открыт</u> <u>VP3 открыт</u> <u>NZ1-2 включен</u>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
VP4: <u>Давление в ФВЛ превышает давление NR1</u>	<input type="checkbox"/>
NR-1: <u>Нет протока в компрессоре NR1</u> <u>Высокое давление на выходе NR1</u>	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/>
VT1: <u>VP1 открыт</u> <u>VP3 открыт</u> <u>Предельное давление на входе NR1</u> <u>Предельная температура NR1</u>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/>
VP3: <u>Открыт: VP4 или VP1</u> <u>Высокое давление ФВЛ</u> <u>Высокое давление в РК и NZ-1(2) включен</u> <u>VT1 открыт</u> <u>Атмосфера в ФВЛ</u> <u>Форвакуум в РК и NZ-1(2) выключен</u>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>

Рис.5.3.6 Таблица блокировок вакуумной системы.

Таблица блокировок отображает, по какой причине заблокирован элемент. Для просмотра состояния какого-либо элемента системы нажмите на изображение нужного вам элемента. Перед вами откроется окно управления выбранным элементом рис.5.3.7.

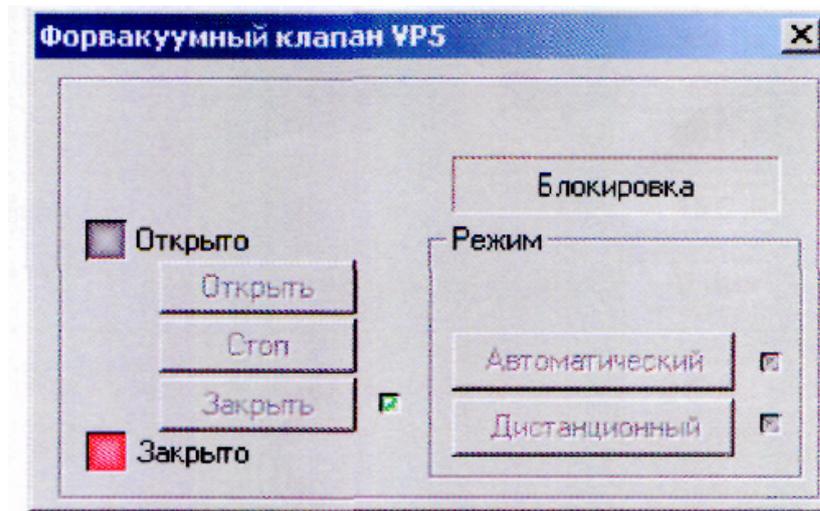


Рис.5.3.7 Окно управления форвакуумным клапаном.

Трехканальная система газонапуска установки может работать в двух основных режимах: автоматическом и ручном. По умолчанию включен автоматический режим.

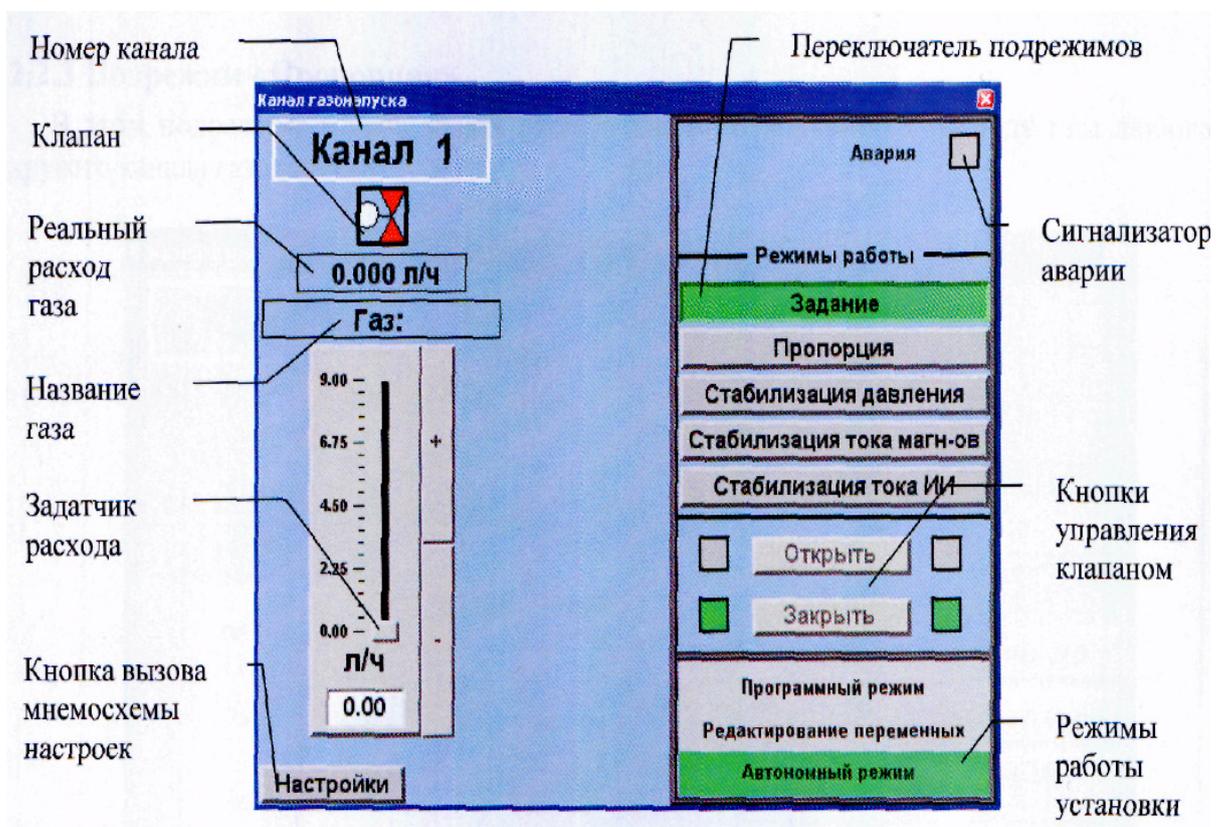


Рис.5.3.8 Мнемосхема канала газонапуска.

В автоматическом режиме имеется возможность выбора одного из режимов работы канала газонапуска:

- Задание расхода газа;
- Пропорция;
- Стабилизация давления;
- Стабилизация тока источника питания магнетрона;
- Стабилизация тока питания ионного источника.

В зависимости от выбранного подрежима область настройки будет меняться, а в случае выбора задания расхода газа она будет пустой. Клапан канала открывается с задержкой для предотвращения резкого скачка давления в случае одновременного открытия клапанов нескольких каналов газонапуска. Управление клапаном осуществляется кнопками «Открыть» и «Закреть». Если расход газа в данном канале равен 0, то клапан закрыт.

Блок питания магнетронов (БПМ) предназначен для обеспечения электропитанием магнетронных распылителей различного типа, используемых в вакуумном оборудовании для нанесения тонкопленочных покрытий.

Блок питания ионных источников (БПИИ) предназначен для обеспечения электропитанием ионных источников типа «протяженный радикал», используемых в вакуумном оборудовании для предварительной очистки изделий перед нанесением тонкопленочных покрытий.

Блок питания потенциала смещения (БППС) предназначен для управления условиями нанесения тонкопленочных покрытий, используется совместно с БПМ.

В зависимости от типа БП изображение мнемосхемы меняется в соответствии с типом БП.

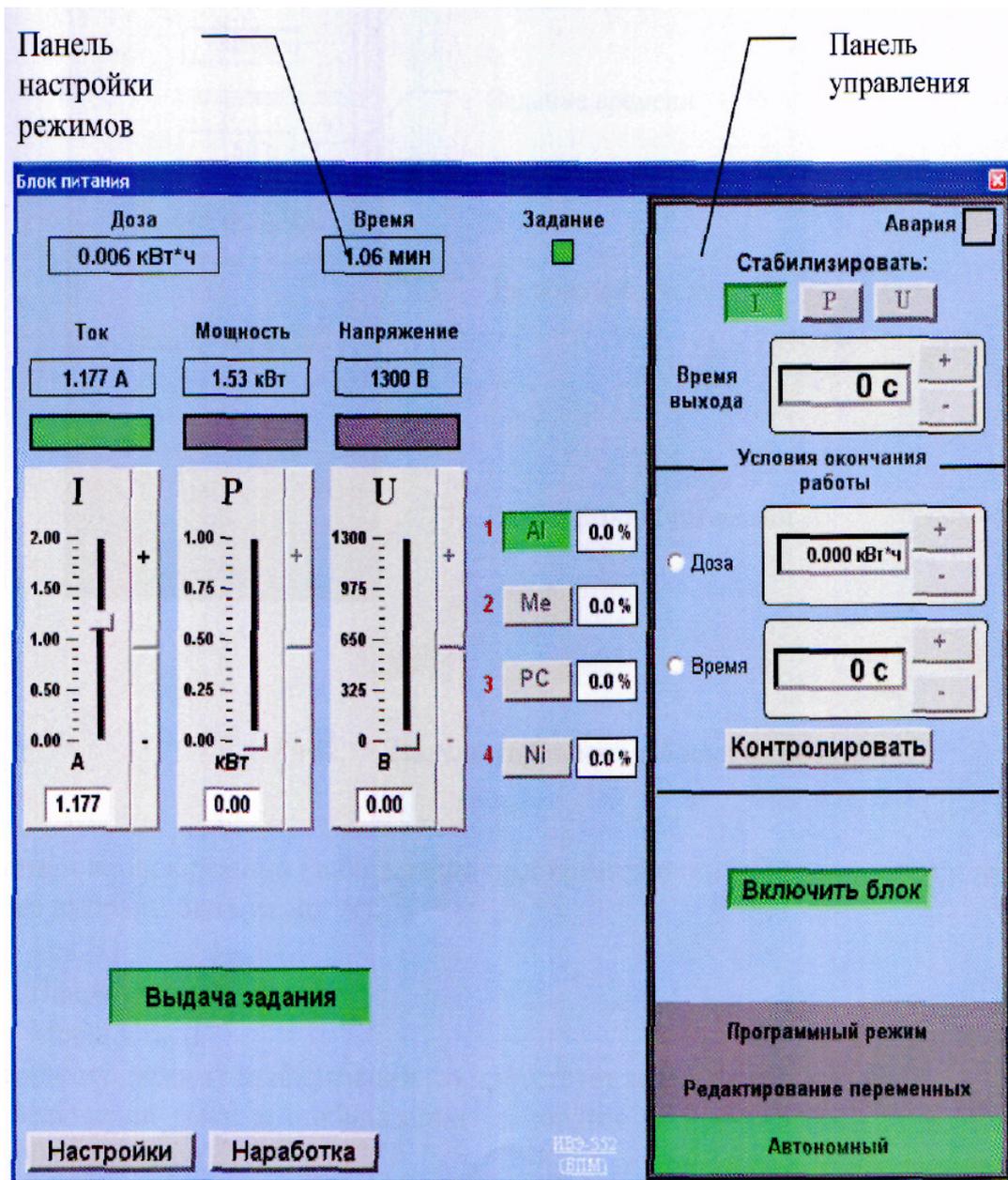


Рис.5.3.9 Мнемосхема блока питания (магнетронов).

Для задания режимов работы БП предназначена панель управления рис.5.3.9. Сигнал Аварии информирует о возникновении аварии непосредственно в БП. При отсутствии аварии цвет индикатора *серый*, при наличии аварии индикатор мигает красным цветом.

Нажатием кнопок режима стабилизации выбирается один из режимов стабилизации (два режима выбраны быть не могут):

- Ток (I)
- Напряжение (U)
- Мощность (P).

Выбранному режиму стабилизации соответствует зеленый цвет кнопки.

Управление нагревателем карусели установки осуществляется путем вызова соответствующей мнемосхемы в главном окне управляющей программы рис.5.3.10.

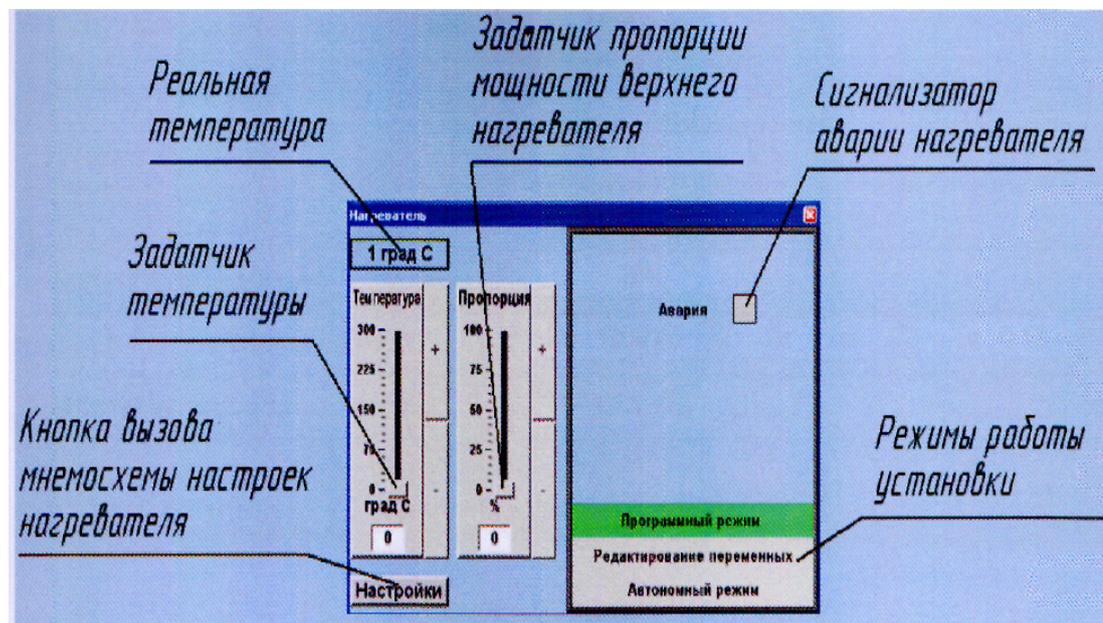


Рис.5.3.10. Мнемосхема нагревателя.

Для управления температурой нагревателя следует выставить её задатчиком температуры, после чего она будет поддерживаться автоматически. Над задатчиком показана реальная температура. Если реальная температура выше заданной, нагреватель не включается.

Примечание: нагреватель считается включенным, если заданная температура больше 50 градусов.

Для вызова мнемосхемы привода барабана необходимо нажать соответствующую ему кнопку в главном окне управляющей программы.

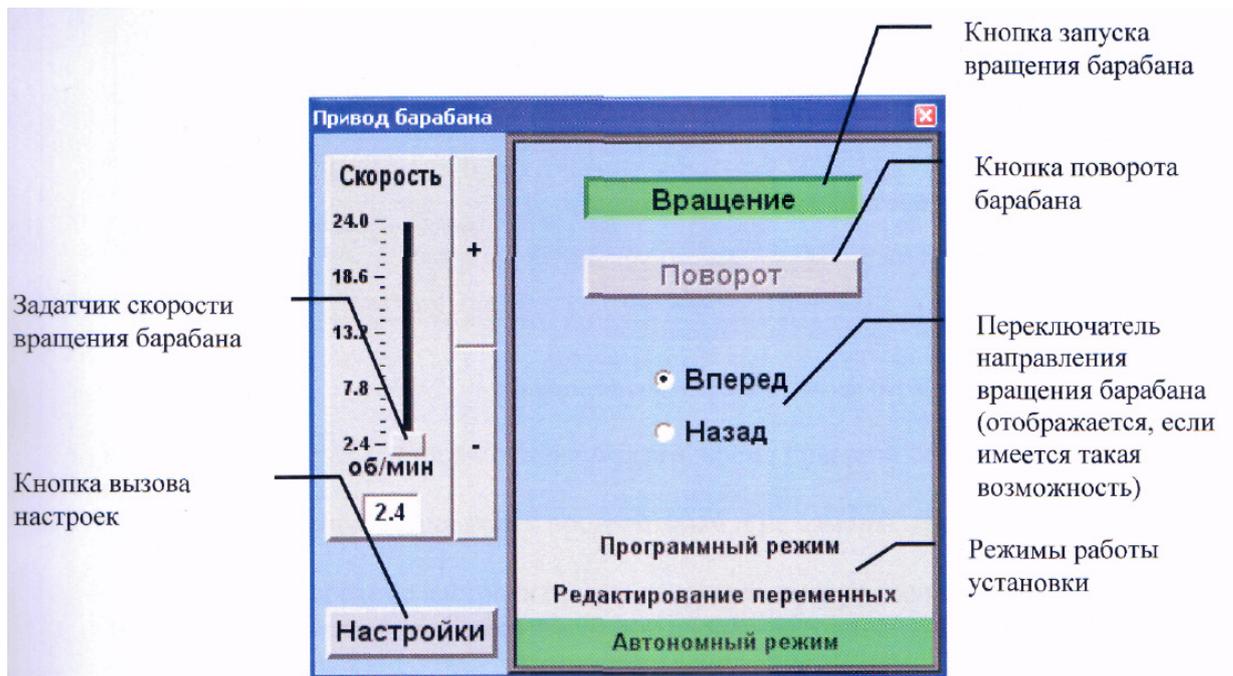


Рис.5.3.11 Мнемосхема привода барабана.

При нажатии на кнопку «Вращение» барабан начнёт вращаться. Скорость вращения задаётся задатчиком скорости.

На рис.5.3.12 приведена мнемосхема заслонок.

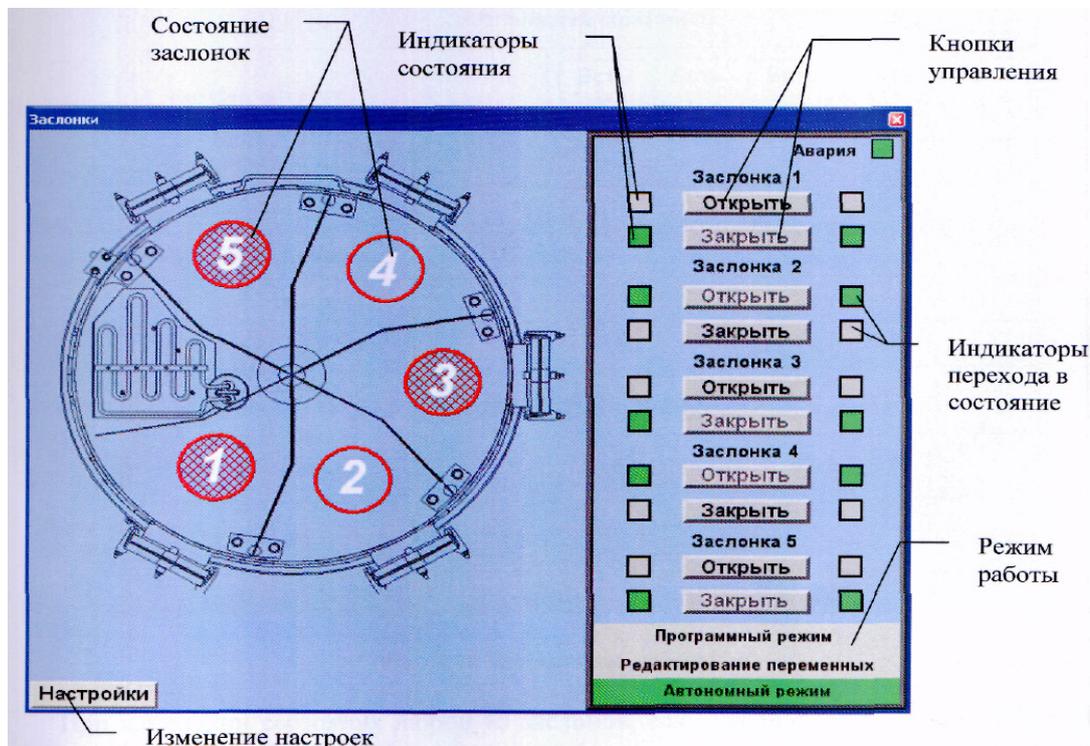


Рис.5.3.12 Мнемосхема заслонок.

Слева на мнемосхеме показано условное изображение рабочей камеры (вид сверху). Красным цветом показаны заслонки. Изображение динамизировано: в зависимости от фактического состояния заслонок их символы меняют свой вид (пустое кольцо - заслонка открыта, заштрихованное кольцо – закрыта. Когда заслонка находится в движении, её символ мигает.

Управление положением заслонок осуществляется при помощи кнопок «Открыть» и «Закрыть». Текущие (или исходные в случае движения) положения заслонок показаны сигнализаторами слева от управляющих кнопок, требуемые (адресуемые) положения заслонок показаны сигнализаторами справа от управляющих кнопок.



Рис.5.3.13 Мнемосхема свидетеля.

Свидетель предназначен для остановки процесса напыления в программном режиме по заданному сопротивлению. На мнемосхеме имеются два индикатора. Один отображает фактическое сопротивление свидетеля, другой - заданное в программаторе желаемое сопротивление. Остановка процесса напыления (сигнал готовности на программатор) поступает, когда фактическое сопротивление свидетеля снижается и становится равным заданному сопротивлению.

Расчет сопротивлений происходит при подаче разных значений тока на свидетель. Получая при этом значение напряжения (мВ) на свидетеле ($U_{св}$) и на последовательно подключенном сопротивлении в 1 кОм ($U_{сопр}$), рассчитываем сопротивление по следующей формуле:

$$R_{св} = U_{св}/I; \quad (\text{мВ/мА} - \text{Ом})$$

Где значение тока рассчитывается по формуле:

$$I = U_{сопр}/ R_{сопр}; \quad (\text{мВ/Ом} = \text{мА})$$

Блокировка измерения свидетеля происходит:

1. При выключении измерения сопротивления.
2. При включенном блоке питания источника ионов.

Шкала свидетеля ограничена сверху значением в 200 кОм. При большем значении R_{CB} или разрыве цепи – значение сопротивления свидетеля становится красным.

Для открытия/закрытия рабочей камеры служит гидроподъемник мнемосхема которого показана на рис.5.3.14.

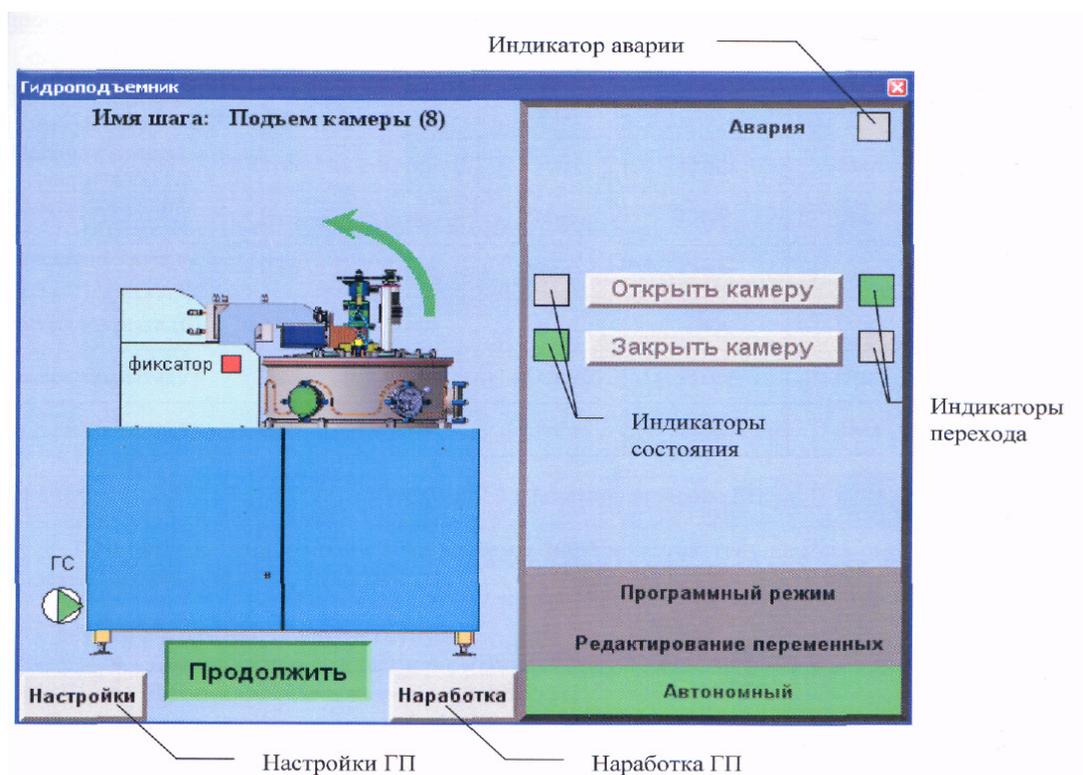


Рис 5.3.14. Мнемосхема гидроподъемника.

Для открытия рабочей камеры на мнемосхеме объекта нажмите «Открыть камеру», после чего начнет выполняться циклограмма перехода из состояния закрыто, в состояние открыто.

Подъем и опускание крышки камеры происходят только при удерживании оператором кнопки «Продолжить» на мнемосхеме гидроподъемника. Подъем, либо опускание, можно приостановить в любой момент, прекратив удерживать кнопку «Продолжить».

После окончания работы необходимо выполнить процедуру выключения вакуумной системы. Для этого на панели управления рис.5.3.5 нажимают кнопку «Выключить». После чего, отключают сервисное питание нажав кнопку (9) шкафа

управления установкой и подождав 7-10 с (время необходимое для корректного выключения компьютера) выключают автомат (11). Затем закрывают подачу холодной воды сжатого воздуха и технологических газов.

Подводя итоги, перечислим последовательность всех основных технологических операций, которые выполняет установка «Caroline D12A» в автоматическом режиме при напылении, например тонких пленок хрома на керамические подложки методом импульсного магнетронного распыления.

1. Предварительно (включение установки, запуск управляющей программы).
2. Форвакуумная откачка криогенного насоса до остаточного давления не более 9Па. При этом включается криосистема установки. Форвакуумная откачка продолжается. При достижении температуры крионасоса не более 281 К, закрывается форвакуумный клапан и отключается спиральный механический насос. Продолжается охлаждение крионасоса до рабочей температуры (приблизительно 14-15 К). Время выхода крионасоса на рабочий режим – около 2 часов.
3. Напуск атмосферы в рабочую (вакуумную) камеру.
4. Поднятие крышки камеры с помощью гидроподъемника.
5. Загрузка керамических подложек в вакуумную камеру.
6. Закрытие (опускание) крышки рабочей камеры с помощью гидроподъемника (операции 4-6 выполняются оператором).
7. При достижении крионасосом рабочей температуры, по заданной программе производится высоковакуумная откачка камеры до давления не более 10^{-3} Па (при этом сначала механическим спиральным насосом производится форвакуумная откачка рабочей камеры до давления не более 9 Па). Затем по заданной команде открывается затвор. Механический насос отключается и идет откачка только криогенным насосом.
8. При получении в рабочей камере давления не более 10^{-3} Па включается вращение карусели с подложками и нагрев.
9. При достижении заданной температуры нагрева подложек включается подача рабочего газа (Ar) в вакуумную камеру.
10. Затем для очистки подложек включается ионно-плазменный источник. Время очистки, также программно заданное, составляет около 3 минут.

11. После этого, включается импульсный блок питания напряжение, с которого подается на магнетрон, где установлена мишень из требуемого материала (например, Cr).
12. По заданной программе устанавливается необходимый режим работы магнетрона и производится очистка мишени (распыление материала мишени на закрытую заслонку). Время этой операции может быть от 1 до 3 минут.
13. После этого – заслонка открывается и производится напыление материала мишени на подложки. Напыление идет либо по времени, либо по «свидетелю» и прекращается автоматически по достижении заданного значения.
14. Закрывается соответствующая заслонка и выключается блок питания магнетрона. Прекращается подача рабочего газа (Ar) в вакуумную камеру, отключается нагрев карусели и при остывании подложек до заданной температуры прекращается ее вращение.
15. Далее происходит остывание карусели с напыленными подложками до заданной программой температуры.
16. После этого закрывается затвор и затем следует либо перезагрузка, либо процедура выключения установки.

Необходимо отметить, что при работе установки в автоматическом режиме (по заданной программе любой шаг выполнения технологического процесса можно контролировать, вызывая на экран магнетрона соответствующую этому шагу мнемосхему.

6. Технологические аспекты работы МРС.

6.1. Рабочие параметры магнетронов.

С помощью магнетронов работающих на постоянном токе, импульсных или ВЧ-магнетронов возможно получение тонких пленок из весьма широкого ассортимента материалов, включая многокомпонентные сплавы, полупроводники, их соединения, а также – диэлектрики.

Операция металлизации является одной из важнейших в различных технологических процессах, например – нанесение пленок алюминия и его сплавов при производстве интегральных схем ИС и БИС, поскольку на свойства тонких пленок алюминия оказывают значительное влияние давление газа, расстояние мишень – подложка, температура подложки и т.п.

К основным рабочим параметрам магнетронов можно отнести напряжение на электродах, разрядный ток, удельную мощность на мишени, давление рабочего газа и индукцию магнитного поля. Все эти параметры в магнетроне взаимосвязаны, и изменение одного из них приводит к изменению других.

Магнетроны 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 $5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$.

Рабочее давление магнетрона 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 магнетроне 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.

Одной из причин нестабильности рабочих параметров магнетрона 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.

6.2 Напыляемые материалы

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. В качестве примера в таблице 6.2.1 приведены результаты спектрографического анализа сложного сплава алюминия, где подтверждено хорошее совпадение компонентного состава в пленке с составом исходного материала в мишени.

Таблица 6.2.1

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.) [36].

Имеется опыт изготовления высококачественных шаблонов магнетронным распылением хрома и окиси железа с осаждением пленок на стеклянных подложках [37].

Этим методом успешно наносятся многослойные покрытия типа Сг - Au, Сг - Cu на металлические подложки, металлические пленки типа Сг - Cu - Al, W - Ti - Al, Ti - Pt - Au, пленки Ni - Сг - Au - Cu, используемые в производстве биполярных и МОП приборов, а также мощных кремниевых приборов.

С помощью магнетронов были получены сверхпроводящие пленки ниобия [38], а также пленки Nb₃Sn с температурой фазового перехода 18,3 К. Установлено, что для получения упорядоченной структуры пленок Nb₃Sn с высокой температурой фазового перехода в сверхпроводящее состояние (18,3 К) давление аргона должно быть 4-6 Па. При более низком давлении температура фазового перехода значительно снижается.

Широкий класс нитридов, окислов, карбидов, сульфидов, соленидов и других соединений был получен на основе реактивного распыления ряда материалов: NbN, TaN, CdS, CdSe, TiO₂, Al₂O₃, TaO и др. [39,40].

Пути оптимизации параметров магнетрона при ВЧ распылении пленок Al₂O₃ и влияние этих параметров на равномерность осаждения пленок по толщине, изменение потенциала подложки, соотношение Al и O₂, микроструктуру пленок, наличие загрязнений, диэлектрическую проницаемость, напряжение пробоя, плотность дефектов, внутренние напряжения в пленках, микротвердость и др. рассмотрены в работе [41].

6.3 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_p может быть выражена для планарной системы [35]:

$$v_p \approx q/\rho\tau, \quad (6.3.1)$$

где q - плотность материала, распыляемого с единицы площади катода;

ρ - плотность пленки;

τ - время распыления.

При распылении в аргоне

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

тогда для планарной системы:

$$v_p = \frac{i_+}{e} \delta \frac{A}{N\rho}, \quad (6.3.2)$$

где i_+ - плотность ионного тока на катоде;

σ - коэффициент распыления;

A — атомная масса распыляемого материала;

N — число Авогадро.

У магнетрона 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, $\sigma = a v_i$, где a есть постоянная величина [34], а $i_+ \sim i_s$, поскольку коэффициент вторичной эмиссии значительно меньше единицы. Вследствие этого скорость осаждения пропорциональна мощности разряда.

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.6.3.1 для меди при расстоянии мишень-подложка 100 и 50 мм. Так как ток разряда неравномерен на поверхности катода, то выражение (6.3.2) носит приближенный характер.

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

$$\dot{m} = \mu I, \quad (6.3.3)$$

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:

$$\xi = U_K I / \dot{m}. \quad (6.3.4)$$

В расчете на один генерируемый атом энергетическая эффективность выражается:

$$\xi = IU_K \frac{m_a}{m}, \quad (6.3.5)$$

где m_a - молекулярная масса распыляемого вещества.

Интенсивность эрозии в зоне бомбардировки мишени ионами не равномерна, 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.

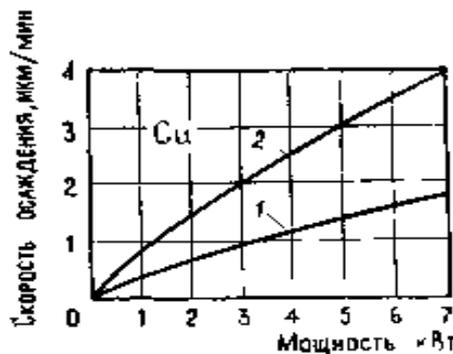


Рис.6.3.1. Зависимость скорости осаждения от подводимой мощности: 1- для расстояния 100 мм; 2-для расстояния 50 мм.

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

$$v_0 = \frac{tv_n}{B_m}, \quad (6.3.6)$$

где t - средняя толщина пленки за один проход подложки над мишенью;

v_n - скорость перемещения подложки;

V_m - 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 магнетроне 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.6.3.2). 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, обусловлено менее эффективным поступлением ионов на катод из-за уменьшения количества носителей зарядов [42]. Поэтому область давлений 0,3-0,8 Па обычно принимают за область рабочих давлений.

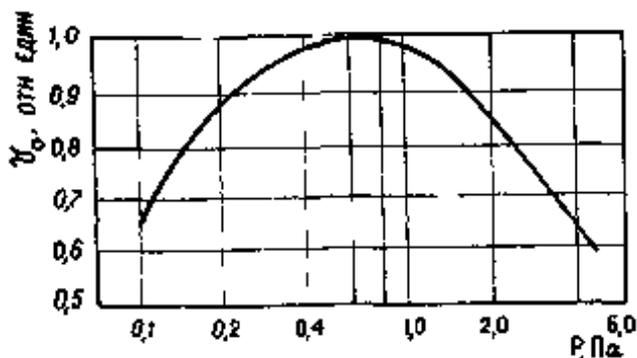


Рис.6.3.2. Зависимость скорости осаждения от давления

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.

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

Экспериментально при распылении мишеней из Cu, Cr и Al на установке «Caroline D12A» методом импульсного магнетронного напыления были получены следующие скорости роста пленок:

- для Cu – 250 Å⁰/мин;
- для Cr – 180 Å⁰/мин;
- для Al - 220 Å⁰/мин.

При этом во всех случаях мощность, подаваемая на магнетрон составляла 0,7 кВт (блок питания магнетрона работал в режиме стабилизации мощности), рабочее давление Ar было $P_{Ar}=1,7 \cdot 10^{-1}$ Па, а скорость его прокачки $Q=3$ л/час.

6.4 Равномерность распределения толщины распыляемых пленок.

Разрядная плазма магнетрона повторяет форму полюсных наконечников системы и при использовании плоских мишеней (планарных магнетронов) 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 [43]. 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 магнетрона 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.

Особенностью магнетронов 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 это изменение не превышает нескольких процентов, даже 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).

Равномерность распределения толщины пленок может быть повышена путем небольшого смещения подложек относительно оси симметрии МРС, а также оптимизации геометрии магнитного блока катода-мишени.

Для оптимизации положения подложки относительно мишени магнетрона был проведен ряд экспериментов по напылению хрома на установке «Caroline D12A». Подложки из ситалла марки СТ50-0,5 размером 60×48 мм устанавливались на карусель рабочей камеры с помощью специальных фиксаторов, которые позволяли в некоторых пределах изменять положение подложки относительно оси магнетрона.

Выбор в качестве осаждаемого материала – хрома, позволял оперативно судить о неравномерности распределения толщины получаемых пленок по площади подложки. Для этого, после напыления проводились измерения удельного поверхностного сопротивления тонких пленок хрома известным четырехзондовым методом (на цифровом измерителе удельного поверхностного сопротивления) не менее чем в 9 точках поверхности подложки. Минимальное значение удельного поверхностного сопротивления пленки хрома на подложке (при оптимальном ее расположении на карусели) составило 58 Ом/□ (в средней части), а максимальное – 60,7 Ом/□ (на углах подложки). Следовательно,

максимальная неравномерность толщины конденсата по всей площади подложки размером 60×48 мм составляет менее 3,3%, что соответствует техническим характеристикам на установку, приведенных в главе 5.

6.5 Адгезия пленок полученных магнетронным напылением.

Важным свойством пленок является адгезия с подложкой, которая при использовании магнетронов значительно выше, чем у пленок, полученных термовакuumным 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. 6.5.1 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 [44].

Таблица 6.5.1

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 напряжении смещения $U_{см}$ на подложке наступает насыщение ионного тока $I_{см}$, вытягиваемого из граничного слоя плазмы магнетрона (рис.6.5.1). Кривая 1 снята при расстоянии подложка - мишень 50 мм, кривая 2 - при расстоянии 100 мм. Таким образом, в магнетроне 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.

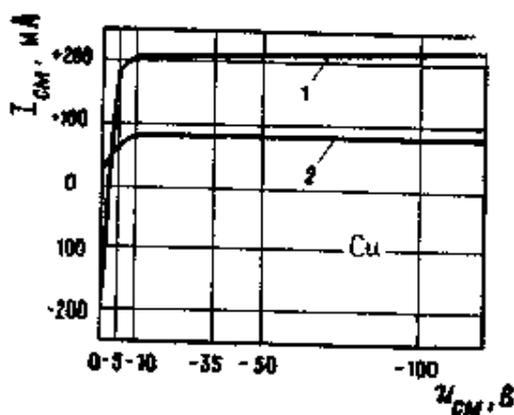


Рис. 6.5.1. Зависимость ионного тока от напряжения смещения.

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.

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 магнетронов.

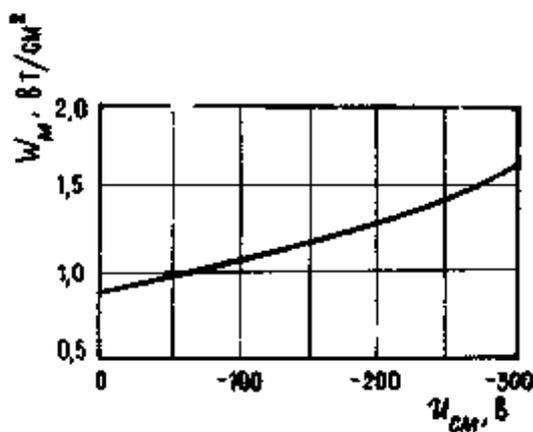


Рис.6.5.2. Зависимость тепловой нагрузки от напряжения смещения.

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.6.5.2).

Таким образом, при магнетронном напылении тонких пленок параметры работы МРС могут существенно влиять на величину адгезии и структуру получаемых пленок (аморфная поликристаллическая, текстурированная и т.п.). При этом скорость осаждения, температура подложки, энергия бомбардирующих подложку частиц, а также давление рабочего газа в камере являются определяющими параметрами магнетронного напыления.

6.6 Анализ пленок

Анализ пленок, полученных на установке «Caroline D12A» методом импульсного магнетронного напыления проводился различными способами. Например, измерение скорости роста осаждаемых пленок Al, Cu или Cr сводилось к измерению их толщин и контролю времени самого процесса напыления. Измерение толщин, полученных слоев проводилось, как на традиционном микроинтерферометре МИИ-4, так и на более современном приборе – профилографе – профилометре типа (KLA Tencor P-16⁺) по известным методикам.

Равномерность распределения толщины конденсата контролировалась в различных точках поверхности подложки цифровым измерителем удельного поверхностного сопротивления (ЦИУПС) работа которого основана на использовании известного четырехзондового метода.

Кроме этого качество поверхности, а так же структура пленок, получаемых на установке «Caroline D12A» методом импульсного магнетронного распыления, контролировалась с использованием растрового электронного микроскопа «Supra-25» (Германия).

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 обзорных статей 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. Вейте пишет: «Конструкция плоского магнетронного распылительного устройства является пример ошеломляюще очевидного решения технологической проблемы, которая не поддавалась решению и осуществлению в течение более чем 30 лет».

Идея создания планарного магнетрона, витала в воздухе еще в начале 70-х годов и именно тогда, была предложена конструкция такого устройства с использованием локализации разрядной плазмы магнитным полем арочной конфигурации с замкнутым дрейфом электронов.

К настоящему времени накоплен значительный опыт разработки и использования магнетронов для решения различных технологических задач. Однако следует считать, что магнетроны 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 магнетроне, еще не ясны. Это объясняется многообразием и сложностью взаимосвязанных и трудноразделимых для аналитических и экспериментальных исследований процессов, происходящих в магнетроне, несмотря на его, относительно конструктивную простоту.

Перспективная значимость магнетронов оправдывает широкое развертывание исследовательских и конструкторских работ, направленных на создание новых модификаций например импульсных МРС [13], а также на совершенствование и оптимизацию этих устройств. Не трудно предвидеть, что в тонкопленочной технологии ближайшего будущего магнетроны серьезно потеснят другие традиционные методы нанесения тонких пленок, особенно в промышленных установках полунепрерывного и непрерывного действия.

Список литературы

1. Технология тонких плёнок (справочник). Т.1 / Под ред. Л. Майселла, Р. Глэнга. - М.: Сов. Радио, 1977.
2. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. ~ М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Белянин А.Ф., Пашенко П.В. Конструкции магнетронных распылительных систем (Обзор) II Техника средств связи, Сер. ТПО. 1992. Вып. 1-2. С. 6-27.//Белянин А.Ф., Пашенко П.В. Конструирование магнетронных распылительных систем, используемых для производства ГНС и устройств функциональной микроэлектроники И Там же. С. 28-47. // Бесоногов В.В.. Житковский В.Д., Пашенко П.В., Елисеев А.Ю. Конструкции магнетронов для распыления металлов // Там же. С. 48-51.
4. Thornton J.A., Greene J.E. Sputter deposition processes. - In Handbook of deposition technologies for films and coatings / Ed. R.F. Bunslmh. 2 ed. -USA: Noyes Publications. 1992, p.249-319.
5. Waits R.K. Planar magnetron sputtering // J.Vac.Sci.Technol. 1978.Vol. 15.No. 2. P. 179-187.
6. Вершина А.К., Агеев В.А. Ионно-плазменные защитно-декоративные покрытия.- Гомель: ИММС НАНБ, 2001.
7. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой: Физическое распыление одноэлементных твёрдых тел I Под ред. Р. Бериша. - М: Мир, 1984.
8. ПлешивцевН.В. Катодное распыление. -М.: Атомиздат, 1968.
9. ПлешивцевН.В., БажинаА.И. Физика воздействия ионных пучков на материалы. - М.: Вузовская книга, 1998.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987.
11. Thornton J.A. Substrate heating rates for planar and cylindrical-post magnetron sputtering sources II Thin Solid Films. 1984. Vol. 119. P. 87-95.
12. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. - М.; Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1971.
13. Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн.1 // Аверс (Киев). 2008.
14. HullA.W. The effect of a uniform magnetic field on the motion of electrons between coaxial cylinders II Phys. Rev. 1921. Vol. 18. No. 1. P. 31-57.

15. Мозгрин Д.В., Фетисов И.К., Ходаченко Г.В. Экспериментальное исследование сильноточечных форм квазистационарного разряда низкого давления в магнитном поле II Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 5. С. 422-433. 11 Fetisov I.K., Filippov A.A., Khodachenko G.V. et al. Impulse irradiation plasma technology for film deposition II Vacuum. 1999. Vol. 53. P. 133-136.
16. Кузьмичев А.И. Модуляторы для импульсного питания магнетронных распылительных систем. - В мат. 7 Междунар. симп. "Тонкие пленки в электронике". Йошкар-Ола, 1996. С. 237-240.
17. Kuzmichev A., Sidorenko S., Steffen H., Hippler R., Kulikovskiy V. Investigation of a pulsed magnetron sputtering discharge with a vacuum pentode modulator power supply/1 Vacuum. 2004. Vol. 72. No. 1. P. 59-69.
18. Colligon J.S. Energetic condensation Processes, properties, and products //J.Vac. Sci. Technol. A. 1995. Vol. 13. No. 3. P. 1649-1657.
19. Scholl R.A. Power systems for reactive sputtering of insulating films II Surf. Coat. Technol. 1997. Vol.93. P. 7-13. Scholl R.A. Asymmetric bipolar pulsed power: a new power technology II Ibid. 1998, v. 98, p. 823-827.11 Scholl R.A. Power supplies for pulsed plasma technologies state-of-art and outlook. - Whitenote 06A, 2/99 of Advanced Energy Ind., Inc. USA, 1999.
20. Sellers J Asymmetric bipolar pulsed DC. the enabling technology for reactive PVD//Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 98. P. 1245-1250.11 Seller J. Asymmetric bipolar pulsed DC The enabling technology for reactive PVD. ~ ENI Tech-Note. 1996.
21. Musil J., Lestina J., Vlcek J., Tolg T. Pulsed DC magnetron discharge for high-rate sputtering of thin films II J. Vac. Sci Technol. A. 2001. Vol. 19. No. 2. P. 420-424.
22. Lin J., Moore J.J., Mishra B. et al. Examination of the phenomena in pulsed-closed field unbalanced magnetron sputtering (P-CFUBMS) of Cr-Al-N thin films II Surf. Coat. Technol. 2007. Vol. 201. P. 4640-4652.
23. Денбновецкий С.В., Хипплер Р., Кузьмичёв А.И., Куликовский В.Ю. и др. Запаздывание возникновения разряда в импульсных магнетронных распылительных устройствах II Электроника и связь (Киев). 2000. Ка 8 (2). С. 195-198.
24. Кузьмичёв А.И. Перспективы применения газоразрядных и электровакуумных приборов в системах питания магнетронных распылителей II Электроника и связь (Киев). 1998. № 4, часть II. С. 384-388.
25. Кузьмичёв А.И. Пакетно-импульсное питание индукционных ионизаторов пара в термоионных устройствах // ВАНТ. Сер. ВЧМСП (Харьков). 1998. Вып. 4(5)/5(6), С. 16-18.

26. Mark G. Symmetric and asymmetric pulsed power supply applications (How to me DC-Pulse Power Supplies). - Presentation at European Workshop on Pulsed Plasma Surface Technologies. Dresden. Germany, 2002.
27. Winkler T., Kirchhoff V., Goedicke K. Requirements of new pulse power-supplies regarding reactive sputtering processes and adjustment of layer properties. - Presentation at European Workshop on Pulsed Plasma Surface Technologies. Dresden. Germany, 2002.
28. Кузьмичёв А.И., Куликовский В.Ю., Сидоренко С.Б. Динамические характеристики импульсной магнетронной распылительной системы I! Изв. АН (Москва). Сер. Физическая. 2000. Т. 64. № 7. С. 1317-1321.
29. Кузьмичёв А.И., Мельник Ю.И., Куликовский В.Ю., Богач П., Ястрабик Л. Характеристики импульсного магнетронного разряда при питании от емкостного накопителя энергии II Изв. АН (Москва). Сер. Физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1272-1278.
30. Kuzmichev A.I., Melnik Yu.I. Transistor pulse modulator for plasma technology. — В мат. 6-й Междунар. научно-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России". Москва, 2000. С. 12-15.
31. Bochkov V.D., Kuzmichev A.I. Application of gas discharge tacitrons in pulsed magnetron sputtering technology. — In Proc. 1st Int. Congr. on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials (5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows). Tomsk, 2000. Vol. 3. P. 177-180.11 Kuzmichev A.I., Bochkov V.D., Melnyk Yu.I. Study of the pulse magnetron sputtering system with a tacitron modulator. - In Proc, 15 Int. Symp. on Plasma Chemistry. Orleans. France, 2001. Vol. 6. P. 2125-2130.
32. Jonsson L.B., Nyberg T., Katardjiev I., Berg S. Frequency response in pulsed DC reactive sputtering process I/ Thin Solid Films. 2000. Vol. 365. P. 43-48.
33. Кузьмичёв А.И., Гончарук И.М. Моделирование методом Монте-Карло массопереноса распылённого вещества в импульсной магнетронной системе II Электроника и связь (Киев). 2001. № 12. С. 13-20. || Кузьмичёв А.И., Гончарук И.М. Моделирование переноса распылённых атомов в импульсной магнетронной системе. — В мат. 7-й междунар. научн.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России". Москва, 2001. С. 300-304. // Kuzmichev A., Goncharuk I. Simulation of the sputtered atom transport during a pulse deposition process in single- and dual-magnetron systems II IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. Vol.31.No. 5. P. 994-1000.

34. Thornton J.A. Magnetron sputtering basis physics and application to cylindrical magnetrons - Vac Sci Technol, 1978, v 15, N 2, p 171-177
35. Wasa K, Haykawa S Some features of magnetron sputtering - Thin Solid Films, 1978, v 52, N 1, p 31-43
36. Sputter ring technology/Company Catalog -Изготовитель фирма Airco Temescal Div 1975 - 9 p
37. Vanan Vacuum Company Catalog -Изготовитель фирма Van an
38. Hausma P A new method for fabricating niobium oxide barrier Josephson junctions - J Appl Phys 1974, v 45, N 3, p 1472-1473
39. Clarke P J Magnetron DC reactive sputtering of titanium nitride and medium-tm oxide - J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 141—142
40. Joly J , Ranger J Depots de nitrure de tantale par pulverisation est odigue reactive a l'aide d'une cible magnetron - Le Vide, 1975, N 1Б2, p 34-36
41. Nowicki R S Properties of RF sputtered Al₂O₃ films deposited by planar magnetron - J Vac Sci Technol, 1977, v 14, N 1, p 127-133
42. 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
43. Kirov K.L., Ivanov N A DC magnetron system for cathode sputtering - Vacuum, 1976, 26, N 6, p 237-241
44. Данилин Б.С. Получение тонких слоев с помощью магнетронной системы ионного распыления -Зарубежная электроника, 1978, № 4, с 87-105.
45. Голант В.Е., Жилинский А.Г., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы - М Атомиздат, 1977 -282с
46. Куроедов К.А. Распыление в разряде с дрейфующими электронами -Электронная техника Сер 3 Микроэлектроника, 1973, вып 3(43), с 87-90
47. Неволин Б.С., Сырчин В.К. Исследование разряда в магнетронных системах ионного распыления - Электронная техника Сер 3 Микроэлектроника 1977, вып 3(69), с 37-44