

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 621.793.18

Магнетронное нанесение оптических покрытий при питании магнетронов переменным напряжением средней частоты

О. Д. Вольпян

ФГУП «Научно-исследовательский институт "Полнос" им. М. Ф. Стельмаха»,
Москва, Россия

А. И. Кузьмичев

Национальный технический университет "Киевский политехнический институт",
Киев, Украина

Рассмотрены особенности распылительной технологии нанесения оптических покрытий с помощью магнетронов, питаемых переменным напряжением средней частоты, и вопросы ее практической реализации. Показано, что эта технология обеспечивает получение оптических покрытий высокого качества.

Введение

При разработке и производстве оптической и квантово-оптической аппаратуры большое внимание уделяется покрытиям, наносимым на оптические элементы. Оптические покрытия выполняют различные функции (просветление, отражение, фильтрацию излучения и т. д.). Благодаря им существенно улучшаются параметры и характеристики аппаратуры, а значительная ее часть вообще неработоспособна без применения оптических покрытий. Велика роль этих покрытий при создании оптических систем для электронной информационной техники (дисплеев, средств записи – считывания и т. д.), в архитектуре, автомобилестроении (светоотражающие, светопоглощающие и энергосберегающие стеклянные ограждения).

Разработаны различные методы нанесения оптических покрытий, но если проанализировать удельный вес отдельных технологий, то можно видеть, что в последнее время все большее внимание уделяется развитию метода получения покрытий магнетронным распылением материалов в реакционной среде [1—3] и публикации американского общества вакуумных покрытий SVC [4]. Это объясняется тем, что магнетронные распылительные устройства (МРУ) являются весьма эффективным и простым инструментом для распыления мишеней и воздействия на осаждаемое вещество, особенно если сравнивать их с элек-

тронно-лучевыми испарителями или ионными пушками. МРУ обеспечивают воспроизводимое получение многослойных покрытий с заданными свойствами при относительно низкой температуре и высокой производительности на изделиях размером от нескольких миллиметров до нескольких метров. Магнетронные покрытия устойчивы к факторам внешней среды, в частности, к влажности и температуре, радиационному воздействию (солнечный свет, лампы накачки для лазеров и лазерное излучение и т. д.), механическим воздействиям.

МРУ ранее хорошо зарекомендовали себя в микроэлектронике, где был выявлен ряд их преимуществ по сравнению с электронно- и ионно-лучевой пушками и диодными системами катодного распыления на аномальном тлеющем разряде [5], но в микроэлектронике МРУ применяются в основном для распыления металлических и других проводящих материалов в среде инертного газа.

Внедрение магнетронного распыления в оптическую технологию потребовало решения нескольких проблем, вызванных тем, что МРУ должны работать в реакционной газовой среде. В самом деле, оптические покрытия по своему химическому составу в большинстве случаев представляют собой соединения металлов и полупроводников с газообразными химическими элементами, поэтому распыление проводят в реакционной среде (смеси распыляющего газа — это обыч-

но Ag и соответствующего реакционного газа, например, O_2 или N_2). Поскольку эти соединения являются диэлектриками, наличие реакционного газа в технологической камере приводит к образованию диэлектрических слоев также на электродах МРУ, что приводит к искрению и возникновению дугового разряда на мишени (катоде) и эффекту "исчезающего анода". Непрерывно изменяются характеристики магнетронного разряда и давление реакционного газа из-за его "жесчения", имеют место гистерезисные явления и неоднородность распределения плотности газа в камере. В результате резко снижается качество покрытий и становится невозможной стабильная работа МРУ на постоянном токе. Покрытия, близкие к стехиометрическим, получают только в режиме сильного отравления материала мишени при малой скорости распыления, когда вся поверхность мишени покрыта тонким слоем диэлектрика.

Проблемы борьбы с дугами и стабилизации работы МРУ в реакционной среде были решены двояко: либо путем применения для питания МРУ высокочастотного (ВЧ) напряжения — чаще всего 13,56 МГц, либо путем перехода к питанию напряжением низких (НЧ) и средних (СЧ) частот. К НЧ относят частоты звукового диапазона (до 15 кГц), а к СЧ — ультразвукового диапазона (до 1 МГц).

Использование ВЧ-систем приводит к таким проблемам, как высокий уровень электромагнитных помех, сложность эксплуатации, высокая стоимость, опасность облучения персонала, поэтому применять их в промышленности крайне нежелательно.

Второй путь, связанный с использованием переменного НЧ- и СЧ-напряжения вместо постоянного, оказался более предпочтительным, и его развитию стали уделять в последние годы большое внимание, особенно в США [2—4]. Однако в России такой подход еще не нашел широкого применения, что объясняется, во-первых, недостаточной информированностью технологов о преимуществах нового метода из-за малого количества публикаций о нем, а во-вторых, отсутствием необходимой аппаратуры и технологических разработок.

Цель данной работы — систематизировать сведения о МРУ, питаемых переменным напряжением средней частоты (СЧ МРУ), и обсудить особенности технологии нанесения оптических покрытий с их помощью. В работе предполагается использовать результаты оригинальных исследований авторов и материалы из мировой научно-технической литературы. Принцип работы МРУ и физические процессы в магнетронном разряде здесь не рассматриваются, так как эти вопросы хорошо освещены в литературе [5].

Энергетические характеристики различных технологий нанесения оптических покрытий

Для сравнения различных технологий и оценки возможностей МРУ удобно использовать диаграммы, показывающие диапазоны энергии частиц, участвующих в процессах формирования покрытий. Пример подобных диаграмм показан на рис. 1.

Общепринятыми технологиями нанесения оптических покрытий являются физические вакуумные (Physical Vapor Deposition — PVD) и термохимические газофазные (Chemical Vapor Deposition — CVD) процессы, хотя применяются и некоторые другие технологии, в частности, жидкостные методы [6—8]. Традиционным PVD-процессом является испарение с резистивным или электронно-лучевым нагревом испаряемого материала. Традиционным CVD-процессом является термическое разложение газовых прекурсоров с осаждением продуктов пиролиза и химических реакций на подложке.

Диаграммы на рис. 1 показывают, что для названных вариантов PVD- и CVD-технологий характерна низкая энергия частиц (до 0,1 эВ), которая ниже или только вблизи порога процессов, важных для формирования качественного покрытия (адсорбции осаждающихся частиц, десорбции примесей, поверхностной диффузии и т. д.). Соответственно, применение PVD- и CVD-методов по традиционным их вариантам приводит к пористой столбчатой структуре покрытий, низкой плотности, чувствительности его к внешней среде, недостаточной адгезии, нарушению стехиометрии и оптическим свойствам, не соответствующим современным требованиям. Приходится применять высокие температуры и активированную реакционную среду, чтобы как-то приблизить оптические свойства покрытий к свойствам аналогичного объемного материала и получить удовлетворительную адгезию, в том числе за счет термической очистки (десорбции) подложки перед осаждением, хемосорбции и приповерхностной диффузии (см. диаграммы в секции II на рис. 1).

В 1937 г. Б. Бергхауз, а через 27 лет Д. Мэттокс предложили сочетать испарительную технологию осаждения покрытий с их бомбардировкой ионами из плазмы газового разряда, окружающей подложку. Эта технология имеет много названий и модификаций: ионное осаждение (Ion Plating), термоионное осаждение, осаждение с ионным ассистированием (Ion Assisted Deposition), осаждение с ионным усилением (Ion Enhanced Deposition) и т. д. [9]. Для ускорения ионов к подложке прикла-

дывается внешнее напряжение отрицательного смещения (см. диаграммы в секции III на рис. 1). Частицы, участвующие в процессе ионно-ассистированного осаждения (см. диаграммы в секции I на рис. 1), имеют энергию как в низкоэнергетичной части (штриховая линия для частиц, полученных испарением или термическим разложением, а также для ионов, потерявших энергию при столкновениях с молекулами газа), так и в высокоэнергетичной части (сплошная линия для ионов).

Ионное ассистирование также выполняют с помощью дополнительной ионной пушки, формирующей ускоренный ионный луч (см. диаграммы в секции III на рис. 1) и направляющей его на подложку, на которой одновременно конденсируются испаренные частицы, т. е. испарительная технология комбинируется здесь с ионно-лучевой (Ion Beam Assisted PVD).

Ионную бомбардировку стали применять и для получения оптических покрытий в процессах как PVD, так и CVD [1, 4, 7, 10]. Поскольку энергию ионов можно регулировать в широких пределах,

возможно осуществление различных физических эффектов в целях улучшения характеристик оптических покрытий: уплотнения микроструктуры осаждающихся слоев, стимулирования химических связей для повышения адгезии и достижения стехиометрии. Энергию ионов выбирают, как правило, выше порога десорбции и распыления (см. диаграммы в секции II на рис. 1). Ионную бомбардировку можно использовать для предварительной ионной очистки подложек, а также для ионного травления наносимых слоев, удаления частиц, плохо связанных с подложкой или самим покрытием, легирования слоев методом субимплантации (см. диаграммы в секции I на рис. 1). В практической технологии оптических покрытий применяются два способа ионного ассистирования: с использованием ионов плазмы, с которой контактирует подложка; с использованием внешнего ионного луча, генерируемого автономной ионной пушкой. Последний способ хорошо сочетается с электронно-лучевым испарением в вакууме.

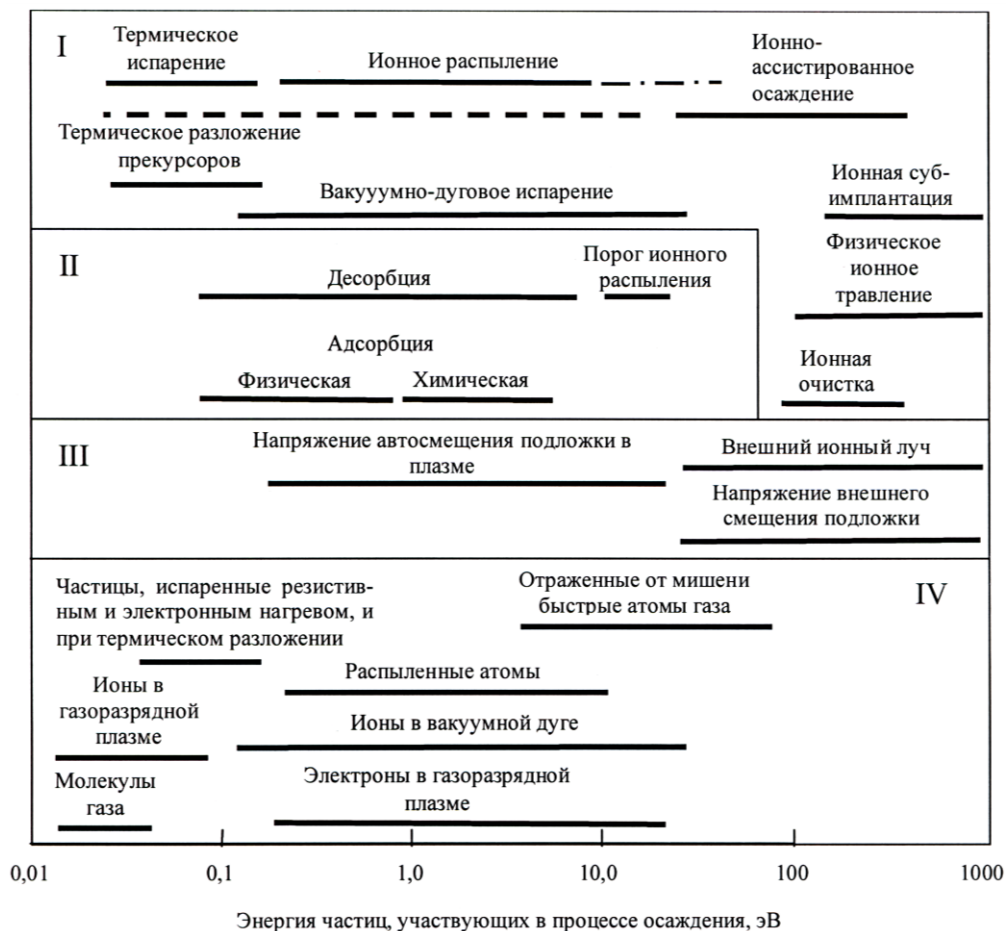


Рис. 1. Энергетические диаграммы процессов при осаждении оптических покрытий методами PVD и CVD:

I — энергия частиц, осаждающихся на подложки; II — энергетические характеристики базовых процессов на поверхности подложек; III — энергетические характеристики внешнего ионного луча и электрического воздействия на ионы, бомбардирующие подложки; IV — энергия частиц, генерируемых в PVD- и CVD-процессах

Наряду с испарительной технологией PVD была реализована распылительная "холодная" технология оптических покрытий, основанная на ионном распылении исходного материала [1, 6, 7]. Одним из вариантов такого подхода является применение двух ионных пушек — одна для распыления материала, другая для ионного ассистирования [7]. Более простым вариантом является использование ионного распыления мишени в его наиболее совершенной форме — распылении мишени в магнетронном разряде, т. е. с помощью МРУ [1—4, 7, 8].

Энергетические диаграммы на рис. 1 демонстрируют основные характеристики распылительной технологии: энергия распыленных атомов, осаждающихся на подложке, составляет единицы—десятки электрон-вольт (см. диаграммы в секциях I и IV на рис. 1). Этой энергии достаточно для адсорбции осаждающихся частиц и поверхностной диффузии адатомов, десорбции примесей и слабосвязанных частиц, уплотнения структуры покрытия, активации реакционного газа и обеспечения стехиометрии. К энергии распыленных атомов добавляется энергия электрически нейтральных атомов газа (бывших ионов), отраженных от распыляемой поверхности мишени с довольно большой остаточной энергией (см. диаграммы в секции IV и штрих-пунктирную добавку в секции I на рис. 1). В результате диапазон энергий частиц, воздействующих на подложку в устройствах ионного распыления, приближается к диапазону, характерному для ионно-ассистированного осаждения. Это является важной предпосылкой применения магнетронного разряда в оптической технологии.

При магнетронном распылении можно еще в большей степени повысить энергетику процессов на подложке путем подачи на нее напряжения отрицательного смещения и реализовать полноценную технологию ионного ассистирования. Поскольку подложки для оптических покрытий, как правило, являются диэлектриками, напряжение отрицательного смещения создают путем подачи на подложкодержатель ВЧ-напряжения.

Ускорение ионов из плазмы магнетронного разряда может также осуществляться отрицательным напряжением автосмещения (см. диаграммы в секции III на рис. 1), которое равно разности потенциалов между поверхностью изолированной подложки и плазмой. Автосмещение создается за счет зарядки подложки плазменными электронами. Его величина в МРУ с объемным магнитным полем, в так называемых несбалансированных магнетронах (Unbalanced Magnetrons), достигает 20—30 В при плотности ионного тока на подложку $> 1 \text{ mA/cm}^2$ [11]. Было предложено (Д. Тир,

Й. Мусил, В.-Д. Мюнц и др.) использовать в МРУ замкнутую конфигурацию объемного магнитного поля, которая создает для плазменных частиц своеобразную магнитную ловушку, в которой эффективно ионизируется и активируется газ [11]. Подобная система была применена для получения прецизионных многослойных оптических покрытий из оксидов металлов [12].

Поскольку реакционный газ активируется в плазме магнетронного разряда, то это стимулирует химические реакции на поверхности подложки в системах магнетронного распыления и способствует достижению стехиометрического состава покрытий. В случае неплазменных PVD- и CVD-методов требуются дополнительные средства для активации газа.

В то же время элементы МРУ имеют низкую рабочую температуру благодаря принудительному водяному охлаждению и сами по себе практически не взаимодействуют с реакционным газом. В случае термических (испарительных) устройств продолжительность работы горячих элементов (в первую очередь термокатодов) очень мала.

Интересно сравнить энергетические характеристики МРУ при питании постоянным и переменным током. Уже первые опыты с СЧ МРУ показали, что работа на СЧ может приводить к значительно более высокой температуре подложек, чем работа на постоянном токе. В работе [13] представлены результаты калориметрических измерений потоков энергии на подложку для обоих видов питания симметричного МРУ с двумя магнетронами (магнетронно-распределительной системы — МРС). Калориметр представлял собой дисковый коллектор частиц (аналог плоской подложки), снабженный термпарой и размещенный на расстоянии 4,4 см над центром одной из мишеней. Полученные данные приведены в табл. 1, и, как видно, поток энергии на подложку, нормированной на общее количество осажденных атомов, был больше на 64 % в случае разряда переменного тока.

В работе [13] был также проведен анализ источников этой энергии. Если сложить энергию конденсации, кинетическую энергию распыленных и осажденных атомов, а также атомов рабочего газа, включая отраженные от мишени, и энергию ультрафиолетового излучения из разряда, то получится только 15 % от всей выделяемой на подложку энергии. Поэтому были проведены измерения параметров плазмы обоих видов магнетронного разряда, которые показали (табл. 2), что имеются заметные отличия в энергии плазменных электронов, концентрации ионов в плазме и разности $\Delta\phi$ между потенциалами плазмы и подложки. Особенно впечатляет четырехкратная разница в концентрации ионов.

Таблица 1

Сравнение условий и параметров осаждения пленок AlN в симметричной МРУ с двумя магнетронами [13]

Вид питания МРС	Удельная мощность, Вт/см ²	Напряжение на мишени, В	Скорость осаждения, нм/с	Поток энергии на подложку, эВ/атом
35 кГц	2,6	345*	1,35	32,4
35 кГц	1,3	306*	0,7	32,8
Постоянный ток	1,3	260	0,82	20,0

* Среднеквадратичное значение переменного напряжения.

Таблица 2

Параметры плазмы магнетронного разряда в симметричной МРУ с двумя магнетронами для получения пленок AlN при удельной мощности 1,3 Вт/см² [13]

Вид питания МРС	Средняя энергия электронов, эВ	Концентрация ионов, 10 ¹⁶ /м ³	Δφ, В
35 кГц	3,2	6,40	7,0
Постоянный ток	2,4	1,63	6,7

Примечание. Давление газовой смеси Ag + N₂ около 1,3 Па при отношении потоков N₂/Ar = 0,18.

При осаждении диэлектрической пленки на изолированную подложку, находящуюся под плавающим потенциалом, средний ток подложки, обусловленный попаданием на нее ионов и электронов из внутрикамерной плазмы, равен нулю. Поэтому ее нагрев может быть вызван как ионами, ускоренными разностью потенциалов Δφ, так и высокоэнергетичными электронами из "хвоста" распределения по энергиям. Исходя из этого в работе [13] удельную энергию ионной бомбардировки оценили величиной 2,0 эВ/атом в случае разряда постоянного тока и 11,1 эВ/атом при переменном напряжении, а энергию электронной бомбардировки, соответственно, величинами 0,7 и 5,1 эВ/атом. Отсюда суммарный поток энергии, передаваемой плазменными частицами подложке, будет на 13,5 эВ/атом больше в случае разряда переменного тока. Это хорошо согласуется с разницей в 12,8 эВ/атом, получаемой из данных табл. 1.

Авторы работы [13] объясняют повышение энергии электронов и концентрации ионов в плазме СЧ-разряда тем, что в начале каждого полупериода разряд проходит через стадию возникновения и развития, сопровождаемую выбросами напряжения на электродах. Эти выбросы должны генерировать кратковременные потоки высокоэнергетичных электронов в сторону подложки. И действительно, такие потоки были обнаружены на фронтах тока импульсного магнетронного разряда, где энергия электронов достигала 100 эВ [14, 15], и в СЧ-магнетронном разряде, питаемом от контура ударного возбуждения [16]. Повышение энергии плазменных электронов связывают со стохастическим механизмом, в основе которого лежит ускорение электронов, попавших в нестационарный катодный слой пространственного заряда в начале каждого полупериода, когда по мере нара-

стания концентрации заряженных частиц граница плазмы отрицательного свечения быстро движется к поверхности мишени. Повышение частоты усиливает этот эффект.

Таким образом, наличие высокоэнергетичных плазменных частиц в СЧ МРУ может вызывать дополнительный нагрев подложек и более сильную активацию реакционного газа, чем в МРУ постоянного тока. Указанные факторы стимулируют получение с помощью СЧ МРУ стехиометрического состава и более лучших оптических характеристик покрытий.

Особенности работы МРУ при питании переменным напряжением

Питание устройств катодного распыления переменным напряжением 50 Гц в принципе не является чем-то новым — его уже применяли в начальный период развития тонкопленочной технологии [1, 17, 18], но потом от него отказались, поскольку системы с питанием на постоянном токе и ВЧ давали лучшие результаты. Так, пленки, получаемые на изолированных подложках в некоторых системах 70-х годов прошлого века при распылении в аномальном тлеющем разряде на переменном токе, содержали много примесей. Это было связано с тем, что потенциал зарядки осаждаемых пленок был меньше на частоте 50 Гц, они подвергались меньшему ионному воздействию, и слабее распылялись газовые адсорбаты.

Использовали частоту 50 Гц и для питания магнетронов [19], но это, как будет показано дальше, тоже имеет свои недостатки. Некоторое улучшение характеристик МРУ на этой частоте было достигнуто путем использования бестрансформаторных схем одно- или трехфазных выпря-

мителей—удвоителей с формированием униполярного импульсно-модулированного напряжения [20, 21]. Однако из-за большой (миллисекундной) длительности импульсов эти системы не годятся для получения высококачественных оптических покрытий из диэлектриков, хотя пригодны для получения проводящих покрытий в инертном газе.

В работе [22] было предложено питать МРУ, работающую в реакционном газе, переменным напряжением в килогерцовом диапазоне частот. Использование таких частот устраняло дуги при сохранении высокой скорости распыления металлической мишени. Затем для реакционного распыления были предложены новые МРУ, содержащие спаренные ("дуальные") магнетроны (Twin, Dual Magnetrons) с питанием синусоидальным переменным НЧ- и СЧ-напряжением [8, 13, 23—27]. В дальнейшем наряду с синусоидальным напряжением начали использовать прямоугольные импульсы [28—31], однако питание МРУ синусоидальным (точнее, квазисинусоидальным) напряжением занимает значительное место в промышленной технологии и продолжает развиваться.

Рассмотрим особенности работы МРУ переменного тока с одним и двумя магнетронами, используя усредненные осциллограммы напряжения и тока, снятые в начальный период работы магнетронов в реакционной среде, когда еще не успел образоваться заметный диэлектрический слой на катодах.

На рис. 2, а приведена упрощенная схема подключения источника переменного напряжения к обычному планарному одинарному магнетрону, который показан в сечении. На рис. 2, б приведена аналогичная схема для случая симметричного МРУ с двумя магнетронами (1 и 2). Полярность источника 4 на рис. 2, б соответствует полупериоду, когда магнетрон 2 имеет отрицательный потенциал относительно магнетрона 1 и выполняет функцию катода магнетронного разряда, а магнетрон 1 выполняет функцию анода. В следующий полупериод функции магнетронов меняются. МРУ на рис. 2, б находится под плавающим потенциалом относительно корпуса 3.

Работа при питании переменным напряжением $e(t)$ через активный балластный резистор иллюстрируется диаграммами напряжения на магнетронах u_m и тока i_m на рис. 3, а, б для МРУ с одним магнетроном и на рис. 3, в, г — для симметричной МРУ с двумя магнетронами. Напряжение u_m на рис. 3, а, б соответствует разности потенциалов между магнетроном и заземленным анодом, а напряжение u_m на рис. 3, в, г является разностью потенциалов мишеней обоих магнетронов. На рис. 3, а, в частота питания равна 50 Гц, а на рис. 3, б, г — около 20 кГц, т. е. существенно выше.

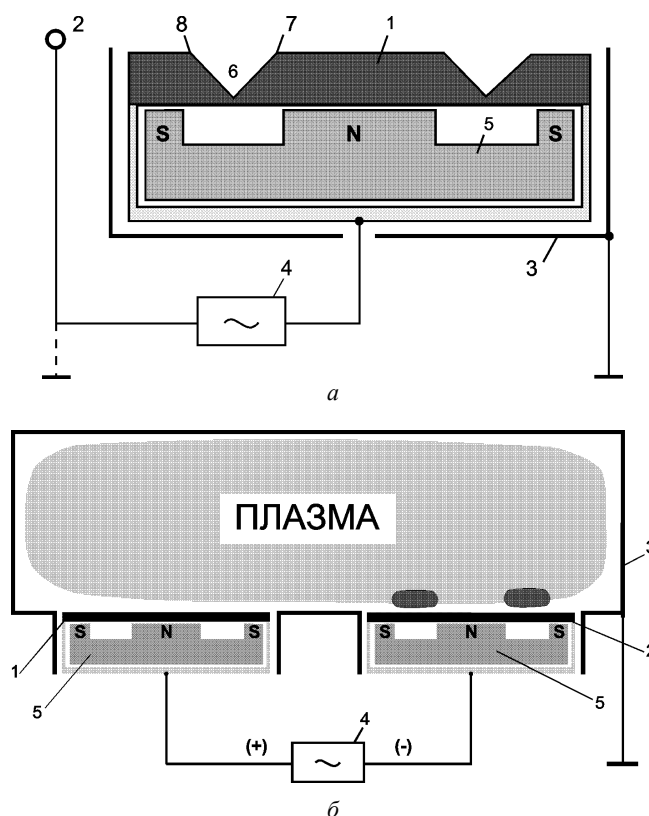


Рис. 2. МРУ:

а — с одним планарным магнетроном: 1 — катод-мишень магнетрона; 2 — анод (обычно заземляется); 3 — экран магнетрона или корпус камеры; 4 — источник переменного напряжения (вторичная обмотка согласующего трансформатора); 5 — магнитная система; 6—8 — зона эрозии мишени; б — с двумя планарными магнетронами 1, 2: 3—5 — см. рис. 2, а

Одной из основных особенностей НЧ- и СЧ-магнетронного разряда является то, что он возникает как бы заново при переполюсовке питающего напряжения. Разряд возникает, когда напряжение питания $e(t)$ становится равным напряжению возникновения (зажигания) разряда. Задержка возникновения разряда, отсчитываемая от момента перехода напряжения через нуль, обозначена на рис. 3, а как $\omega_1 t_{on}$. В момент времени $\omega_1 t_{off}$ напряжение $e(t)$ становится меньше напряжения поддержания самостоятельного разряда, последний прекращается и начинается пауза тока. Однако ток спадает до нуля не мгновенно, а в течение некоторого времени распада (деионизации) плазмы τ_d , пока не исчезнут в межэлектродном пространстве заряженные частицы из послеразрядной плазмы. Из-за низких давлений газа деионизация происходит вследствие рекомбинации частиц на электродах и стенках камеры. Поскольку величина τ_d составляет единицы—десятки микросекунд и при работе на низкой частоте намного меньше $\pi - \omega_1 t_{off}$, ток деионизации практически не виден на рис. 3, а.

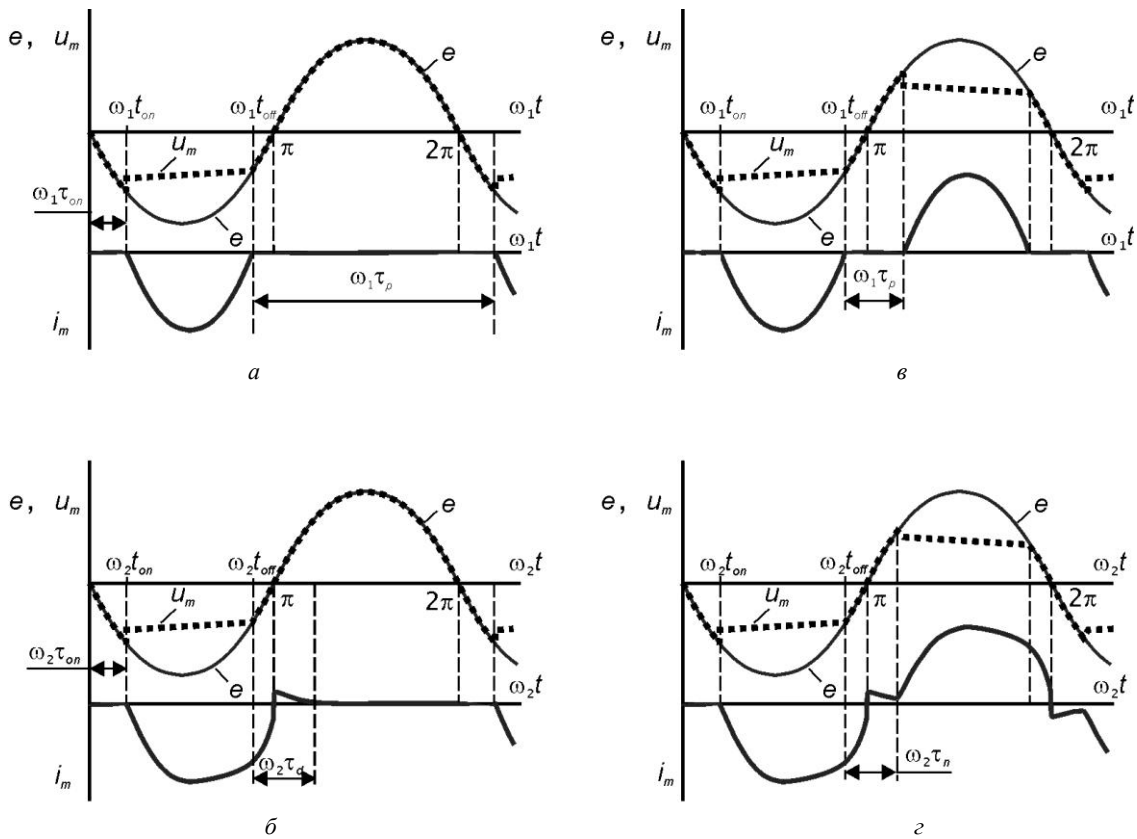


Рис. 3. Диаграммы напряжений и токов при питании переменным напряжением МРУ с одним (а, б) и двумя (в, з) магнетронами. Частота 50 Гц (а, в) и 20 кГц (б, з)

В положительный полупериод ток в случае одинарного магнетрона отсутствует, так как последний обладает вентильностью. На рис. 3, а пауза тока обозначена как $\omega_1\tau_p$. Однако в реальных условиях вентильность магнетрона не стабильна, и в положительный полупериод может возникнуть паразитный тлеющий разряд, переходящий в вакуумную дугу. Такой эффект называется обратным зажиганием, при котором анод и стенки камеры будут служить катодом. Их распыление приведет к загрязнению покрытий.

В случае симметричной МРУ с двумя магнетронами (см. рис. 2, а) разряд вновь возникает в положительный полупериод, а пауза тока $\omega_1\tau_p$ длится с момента прекращения разряда на катоде-мишени одного магнетрона до момента возникновения разряда на катоде-мишени второго магнетрона (см. рис. 3, в). В результате диаграммы напряжений и токов на рис. 3, в получаются симметричными, а генератор и повышающий трансформатор равномерно нагружаются в оба полупериода. МРУ со спаренными магнетронами также более эффективно использует время работы генератора питания, поскольку у нее меньше $\omega_1\tau_p$.

Если частота повышается настолько, что время деионизации послеразрядной плазмы $\omega_2\tau_d$ стано-

вится больше $\pi - \omega_2 t_{off} + \omega_2\tau_{on}$, ток в цепи магнетрона не прекращается в момент перехода $e(t)$ через нуль, так как он поддерживается за счет заряженных частиц из послеразрядной плазмы. Поэтому в случае несимметричного МРУ ток продолжает течь и в начале положительного полупериода до полного завершения деионизации, т. е. в период $\omega_2\tau_d$ (см. рис. 3, б). В случае симметричного МРУ деионизация не успевает завершиться к моменту возникновения разряда на катоде-мишени второго магнетрона, и новый разряд возникает на фоне послеразрядной плазмы (см. рис. 3, з). Можно считать, что на отрезке времени $\omega_2\tau_n$ в МРУ существует несамостоятельный разряд. При этом напряжение возникновения разряда во второй и последующие полупериоды всегда меньше напряжения возникновения разряда в самый первый полупериод, так как наличие остаточных заряженных частиц облегчает повторное возникновение разряда.

При работе на частоте вблизи 1 МГц и на более высоких частотах время деионизации τ_d становится намного больше периода изменения переменного напряжения, ток магнетрона не успевает отслеживать изменение напряжения, а форма разрядного тока становится похожей на меандр с некоторой модуляцией на вершине.

Имеются некоторые особенности в поведении потенциала плазмы магнетронного разряда при питании переменным напряжением. И в несимметричной, и в симметричной МРУ потенциал плазмы близок к потенциалу положительного электрода.

При этом в случае одинарного магнетрона в отрицательный полупериод потенциал плазмы обычно не более чем на 20 В отличается от потенциала корпуса и заземленной оснастки технологической камеры, поэтому распыляется только мишень магнетрона, находящаяся под большим отрицательным потенциалом относительно плазмы магнетронного разряда. В положительный полупериод при низкой частоте питания, когда деионизация послеразрядной плазмы завершается в отрицательный полупериод (см. рис. 3, а), плазма в камере отсутствует и, соответственно, распыления камеры и оснастки также не происходит. Но на повышенных частотах, когда деионизация продолжается и в положительный полупериод (см. рис. 3, б), послеразрядная плазма приобретает положительный потенциал мишени, а анод, стенки камеры и заземленная оснастка бомбардируются ионами и могут распыляться.

Таким образом, МРУ с одним магнетроном присуще несколько недостатков:

- низкая энергетическая эффективность и потери рабочего времени. Это объясняется тем, что в отрицательный полупериод внешнее напряжение либо ниже напряжения поддержания разряда, либо наоборот выше, и нужен дополнительный балластный элемент для поглощения избыточного напряжения. Значительная часть отрицательного полупериода и весь положительный полупериод не используются для распыления;

- опасность обратного зажигания, при котором может возникнуть паразитный тлеющий или дуговой разряд на аноде и стенках технологической камеры;

- при питании на частоте 50 Гц в случае возникновения дуги в любой из полупериодов ее длительность может достигать 10 мс, что совершенно недопустимо из-за возможности сильного разрушения электродов;

- опасность загрязнения покрытия продуктами распыления анода и стенок камеры. Чтобы это предотвратить, следует изготавливать анод и другие элементы МРУ из материала мишени (если это возможно);

- для МРУ с одинарным магнетроном характерно проявление эффекта "исчезающего анода" из-за образования на последнем диэлектрическом слое.

В симметричном МРУ, где магнетроны не заземлены и подключены к вторичной обмотке

трансформатора, система находится под плавающим потенциалом относительно корпуса (см. рис. 2, б). При этом около магнетрона-катода образуется сильноионизованная область прикатодной плазмы магнетронного разряда, показанная на рис. 2, б над правым магнетроном в виде зачерненных овалов. Остальная часть камеры заполнена вторичной слабоионизованной плазмой, образующейся в результате диффузии из прикатодной области и ионизации газа рассеянными катодными электронами. Вторичная плазма обозначена на рис. 2, б серым тоном.

В любой из полупериодов потенциал вторичной плазмы близок к потенциалу того магнетрона, который является анодом, причем разность потенциалов между прикатодной плазмой и анодом порядка 10—20 В, которая вполне достаточна для обеспечения прохождения электронного тока на анод в условиях компенсации пространственного заряда электронов. Поскольку плазма имеет большую площадь контакта со стенками камеры, тепловые токи заряженных частиц из плазмы на стенки весьма большие, и они как бы замыкают плазму с корпусом. В результате в оба полупериода разность потенциалов между плазмой и корпусом не превышает десятка вольт, при которых ионного распыления стенок и оснастки не происходит, хотя возможна десорбция газовых молекул.

Таким образом, симметричные МРУ с двумя магнетронами потенциально обеспечивают получение более чистых покрытий, чем МРУ с одним магнетроном.

Кроме того, благодаря попеременной работе каждой из двух мишеней в качестве катода происходят их ионная очистка от диэлектрических слоев и предотвращение эффекта "исчезающего анода", характерного для МРУ с одним магнетроном.

При работе на частоте 50 Гц остается опасность появления продолжительных дуг и в симметричной МРУ, но дуги возникают только на катодах. Это тоже является преимуществом таких МРУ перед одинарными магнетронами. Переход на средние частоты решает и эту проблему.

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению мощности СЧ-магнетронных разрядов, используемых в высокопроизводительных процессах нанесения оптических покрытий на большие подложки — архитектурные и автомобильные стекла и экраны дисплеев. Общая картина процессов, происходящих в СЧ МРУ большой мощности, мало отличается от вышерассмотренной, поскольку увеличение мощности связано с увеличением размеров мишеней при незначительном изменении удельных параметров магнетрон-

ного разряда, в частности плотности, разрядного тока [3, 27].

Образование дуговых разрядов в МРУ с реакционной газовой средой

Как известно, наибольшая производительность процесса нанесения диэлектрических оптических покрытий достигается при распылении металлических мишеней в реакционной газовой среде [1, 23]. Однако такой процесс сопровождается скачкообразными переходами из режима магнетронного разряда тлеющего типа в вакуумно-дуговой разряд с катодными пятнами на мишени.

Причина возникновения дуг следующая. Магнетронный разряд локализован над поверхностью мишени в области скрещенных электрических и магнитных полей, где силовые линии магнитного поля параллельны поверхности мишени. Соответственно, в этой области мишень интенсивно распыляется и образуется зона эрозии (см. поз. 6 на рис. 2, а). В этой зоне состав поверхности мишени соответствует составу ее материала, так как материал не успевает прореагировать с газом из-за непрерывного ионного распыления. За границами зоны распыления 7 и 8 (см. рис. 2, а) плотность ионного тока быстро падает до очень малой величины, при которой практически не распыляется мишень, и образуется слой диэлектрика в результате взаимодействия рассеянного распыленного материала с реакционным газом. Такой процесс называют "отравлением" мишени. Аналогичный слой образуется на всех поверхностях, куда попадает распыленный материал, т. е. на подложках (это полезный эффект), аноде и других элементах технологической камеры (это вредный эффект). Толщина диэлектрического слоя на мишени постепенно нарастает по мере удаления от границ 7 и 8.

Во время существования магнетронного разряда некоторая часть ионов попадает на диэлектрический слой и заряжает его как конденсатор. Наибольшая напряженность поля в диэлектрике будет устанавливаться вблизи границ 7 и 8, где слой диэлектрика наиболее тонкий, а плотность тока рассеянных ионов — наибольшая. В первом приближении напряженность поля в слое для плоского конденсатора можно определить по следующей формуле:

$$E(t) = U(t)/d = j_i \Delta t / \epsilon_0 \epsilon,$$

где d — толщина слоя диэлектрика;

j_i — плотность ионного тока, заряжающего диэлектрический слой вблизи границы области распыления мишени;

Δt — время зарядки слоя;

ϵ_0 — электрическая постоянная;

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость слоя.

Для слоев SiO_2 и Al_2O_3 и $j_i = 1\text{--}2 \text{ мА/см}^2$ скорость нарастания напряженности электрического поля составляет $(3\text{--}6) \cdot 10^9 \text{ В/см}\cdot\text{с}$, а время Δt_{cr} , необходимое для набора критического (пробойного) значения напряженности поля $(3\text{--}10) \cdot 10^5 \text{ В/см}$ в типичных условиях магнетронного распыления, составит $0,1\text{--}1,0 \text{ мс}$ [29, 32].

Искровой пробой диэлектрика при достижении критической напряженности поля может привести (к счастью не всегда) к образованию катодного пятна дугового разряда. "Легкое" искрение без образования катодных пятен проходит незаметно для источника питания. Но если пятно возникло, а источник питания достаточно мощный, то установится квазистационарная вакуумная дуга на один или несколько полупериодов переменного напряжения, пока система автоматической защиты источника питания не выключит его и не прервет тем самым дугу. Осаждаемое покрытие будет иметь большие дефекты, так как продукты электрического взрыва диэлектрика и материала мишени из катодного пятна в виде пара, капель и твердых кусочков будут попадать на подложку. Повреждение покрытия будет сильнее в случае мощного МРУ, у которого в цепях питания накапливается большая энергия, рассеиваемая при пробое диэлектрического слоя на мишени и в дуговом разряде.

Искрение и дугообразование на мишени при реакционном распылении имеет и тот результат, что серьезно нарушается равновесие в процессах взаимодействия реакционного газа с распыленным материалом в камере и на подложке из-за гистерезисной природы этих процессов. Восстановление нового равновесия требует определенного времени, что также неблагоприятно сказывается на качестве осаждаемого покрытия.

Были предложены различные методы борьбы с этими явлениями: введение экранов между мишенью и подложкой и напуск реакционного газа только в зону подложки; введение быстродействующих систем обратной связи; выполнение мишени в виде вращающегося цилиндра, у которого равномерно распыляется все поверхность (но не торцы, на которых также возможно образование дуг) [1, 8].

Можно также применить традиционный бездуговой метод распыления, основанный на использовании ВЧ-разряда на частоте $13,56 \text{ МГц}$, но с заменой диэлектрической мишени на металличе-

скую. В этом случае в положительный полупериод будет происходить разрядка диэлектрического слоя электронным током из плазмы, что позволит избежать накопления большого положительного заряда на слое. Это в свою очередь предотвратит создание высокой напряженности электрического поля в слое и искровой пробой. Однако ВЧ-питание имеет много недостатков; кроме того, скорость распыления металлов в ВЧ-разряде (на частоте 13,56 МГц), по данным различных авторов [23, 33, 34], примерно в два раза ниже, чем в разряде постоянного тока той же мощности. Последнее объясняется различным характером распределения мощности между слоем положительного пространственного заряда около мишени и плазмой в разрядах постоянного тока и ВЧ-типа.

Таким образом, для предотвращения дугообразования необходимо питать МРУ знакопеременным напряжением. В работе [22] было показано, что разрядки диэлектрического слоя можно достичь и на более низких частотах, чем 13,56 МГц. Действительно, толщина диэлектрического слоя на мишени составляет несколько микрометров, и если ϵ материала слоя порядка 7, то обеспечивается достаточно низкое емкостное сопротивление слоя (около 100 Ом) при обычных размерах магнетрона на частоте 2,7 кГц. Если ϵ будет достигать 40, разрядка слоя будет обеспечиваться на частоте 470 Гц. Эти значения можно было бы считать нижним допустимым пределом рабочих частот, но авторы работы [22] рекомендуют использовать частоты порядка нескольких десятков килогерц, и уже на частоте 10 кГц они получали пленки TiO_2 путем распыления титана без каких-либо проблем с дугообразованием при мощности разряда около 500 Вт.

Следует заметить, что в [22] применяли одионарный магнетрон (см. рис. 2, а), поэтому разрядка диэлектрического слоя происходила во время положительного полупериода за счет электронного тока из распадающейся (деионизирующейся) плазмы (см. рис. 3, б). Но когда частота очень низкая, деионизация заканчивается в отрицательный полупериод (см. рис. 3, а), и разрядка может не произойти, если плазма успеет деионизоваться, пока модуль потенциала мишени превышает потенциал зарядки слоя. В последнем случае электроны не смогут попадать на диэлектрик, который может зарядиться до высокого потенциала, даже до потенциала плазмы, за один или несколько периодов с последующим пробоем.

Кроме того, при работе на низкой частоте также возрастает время зарядки слоя Δt , поэтому возникновение дуг на частотах ниже 10 кГц вполне

вероятно. Очевидно, минимальную частоту можно с некоторым запасом определить величиной $(\Delta t_{cr})^{-1}$.

Поскольку разрядка диэлектрического слоя должна осуществляться электронным током плазмы, который всегда больше ионного, то длительность разрядки всегда будет меньше длительности зарядки, и это обстоятельство не накладывает ограничений на верхний предел частот. Ограничение рабочей частоты сверху связано главным образом с техническими проблемами генерирования повышенных частот и согласования генератора с нагрузкой, а в некоторых случаях и со снижением скорости распыления (этот вопрос будет рассмотрен ниже). В работе [22] рекомендуется верхнее значение рабочей частоты 60 кГц.

Рассмотрим симметричное МРУ с двумя магнетронами (см. рис. 2, б). В таком устройстве благодаря тому, что разряд возникает в каждый полупериод, а мишени магнетронов попеременно играют роль катода и анода, разрядка происходит обязательно. Главное, чтобы диэлектрический слой не успел зарядиться до пробойного напряжения в отрицательный полупериод, до начала разрядки. Многие авторы [13, 23—25] и фирмы [35, 36], выпускающие оборудование, рекомендуют применять частоты в диапазоне 10—100 кГц и более, при которых величина Δt меньше минимальной $\Delta t_{cr} = 100$ мкс.

Решение проблемы "исчезающего" анода

Причина "исчезновения" анода та же, что и "отравления" мишени — покрытие всех поверхностей, на которых осаждается распыленный металл, слоем диэлектрика вследствие реакции металла с химически активным рабочим газом. Наличие диэлектрика на аноде или поверхности стенок технологической камеры, которые служат анодом, приводит к изменению импеданса системы (особенно на постоянном токе). Так, в [37] было показано, что осаждение диэлектрического слоя из оксида титана на стенках камеры, служащих анодом, при распылении титана приводило к увеличению напряжения поддержания магнетронного разряда с 362 до 498 В и изменению знака потенциала плазмы относительно заземленных стенок.

Увеличение разрядного напряжения можно объяснить тем, что функции анода начинают выполнять удаленные участки стенок камеры, на которых не осаждается диэлектрик. Для того чтобы электроны из плазмы магнетронного разряда могли достичь этих участков, необходимо дополнительное электрическое поле. Изменение знака потенциала плазмы обусловлено тем, что изменя-

ются условия замыкания токов плазменных электронов и ионов на поверхности стенок при осаждении на них диэлектрического слоя. Слой заряжается отрицательно относительно заземленных стенок и превращается в систему с плавающим потенциалом, помещенную в плазму магнетронного разряда.

Так как анодный ток стремится сконцентрироваться на тех участках, где импеданс меньше, то это приводит к изменению распределений плотности плазмы магнетронного разряда и толщины осаждаемого покрытия. При определенной толщине диэлектрического слоя анод вообще перестает служить проводником постоянного тока и как бы "исчезает". В условиях мощного магнетронного разряда это вызывает искрения и провоцирует дугообразование. Для борьбы с этими явлениями было предложено несколько методов [8, 25, 38, 39]:

а) регулярно очищать анодную поверхность или обновлять ее путем вращения анода;

б) экранировать поверхность анода от запыления при одновременном сохранении его контакта с плазмой магнетронного разряда;

в) принудительно распределять ток между несколькими анодами, равномерно размещенными вдоль мишени;

г) работать на средних частотах или коротких импульсах тока, при которых еще невелико емкостное сопротивление диэлектрического слоя на аноде (в этом отношении работа на ВЧ кардинально решает эту проблему, но она имеет известные недостатки);

д) применять симметричное МРУ с двумя магнетронами и питанием симметричным биполярным синусоидальным или импульсным напряжениям;

е) вводить в МРУ с одним магнетроном два анода с противофазным питанием на средних частотах.

В методе "д" благодаря попеременной работе каждой мишени в качестве катода и анода происходит очистка поверхности мишени от диэлектрического слоя в зоне ее эрозии во время катодного периода и тем самым обеспечиваются проводящие свойства мишени для анодного периода в течение всего срока работы. Поэтому в симметричных МРУ в течение всего технологического процесса имеются явно выраженные катод и анод (что повышает его производительность), а проблема "исчезающего" анода решается весьма эффективно.

В методе "е" около мишени М одинарного магнетрона размещают два анода А1 и А2 (рис. 4) [38], которые подключаются к крайним отводам вторичной обмотки трансформатора Тр, а мишень

М — к средней точке обмотки. На первичную обмотку подают напряжение средней частоты (~40 кГц), напротив нее размещается подложка П.

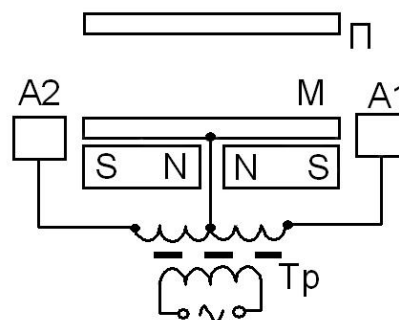


Рис. 4. МРУ с двумя анодами

В этой системе электродов плазма в каждый полупериод принимает потенциал того анода (назовем его первым), который имеет наибольший потенциал. Второй анод, который имеет наименьший потенциал, вместе с первым образуют диодное распылительное устройство, в котором второй анод является катодом и распыляется под действием ионной бомбардировки. Мишень и первый анод образуют магнетронное распылительное устройство, и если разность потенциалов между мишенью и первым анодом достаточна для возникновения магнетронного разряда, то мишень также распыляется.

В результате в каждый полупериод распыляются мишень и один из анодов, благодаря чему их поверхность очищается хотя бы частично от диэлектрических слоев, что обеспечивает решение двух проблем — подавление дугообразования на мишени и анодах и исключение эффекта "исчезающего анода". Для того чтобы покрытие не загрязнялось продуктами распыления анодов, их выполняют из материала мишени; кроме того, их охлаждают водой. Такой подход весьма интересен для приспособления имеющихся МРУ с одной мишенью к процессам реакционного распыления.

Скорость осаждения покрытий

Поскольку скорость осаждения покрытий является важным параметром, изучалось влияние на нее различных факторов, связанных с использованием переменного напряжения для питания МРУ. Еще в работах [33, 34] при сравнительном изучении распыления металлов в среде аргона на постоянном токе и ВЧ было выявлено, что скорость осаждения в первом случае примерно в два раза выше, чем во втором, при одинаковой мощности, вводимой в разряд. Кроме того, независимо от ви-

да питания скорость осаждения была прямо пропорциональна мощности разряда. Аналогичный вывод был сделан и при осаждении пленок Al_2O_3 путем распыления алюминия в атмосфере $Ar + O_2$ [33], хотя в этом случае скорость распыления составляла всего лишь несколько процентов от скорости распыления неокисленного алюминия в чистом Ar . На основании этого и с учетом того, что свойства магнетронного разряда на НЧ и СЧ подобны свойствам разряда на постоянном токе, а ионы в разряде успевают реагировать на изменение поля, было предположено, что работа на указанных частотах позволит сохранить скорость реакционного осаждения, получаемую в разряде постоянного тока с металлической мишенью, но позволит приобрести устойчивость против дуг. Это нашло экспериментальное подтверждение в [40]. В работах [13, 23, 25, 32, 37, 41, 42] изучалось влияние частоты, параметров импульсов тока и мощности МРУ на скорость осаждения пленок Al , Al_2O_3 , AlN , TiO_2 и других диэлектриков.

В [23] для исследования влияния частоты синусоидального напряжения на скорость осаждения пленок использовали симметричное МРУ из двух магнетронов с мишенями из алюминия, находящиеся под плавающим потенциалом относительно стенок камеры благодаря применению изолирующего трансформатора. Магнетроны были размещены на противоположных стенках, между которыми находился барабанный подложкодержатель. На рис. 5 представлены данные [23] для разных инертных газов и N_2 , нормированные на скорость осаждения R_0 , определяемое при питании постоянным током. Результаты, относящиеся к различным инертным газам при давлениях в диапазоне 0,15—1,7 Па, аналогичны — на частотах до ~30 кГц скорость осаждения не зависит от частоты и соответствует R_0 , затем она спадает и на частоте 13,56 МГц составляет примерно $0,5R_0$. В случае Ar соотношение скоростей осаждения на постоянном токе и частотах 60 Гц, 80 кГц, 0,5 МГц и 13,56 МГц представлено рядом 1:0,85:0,7:0,5.

Для всех используемых газов скорость осаждения пропорциональна мощности разряда. Измерения температуры воды, охлаждающей мишень, показали, что соотношения долей мощности, рассеиваемой на мишени на различных частотах, от общей мощности, поглощаемой разрядом, соответствуют вышеприведенному ряду для соотношений скоростей осаждения. Эти данные указывают на то, что интенсивность ионного распыления в магнетронных разрядах переменного тока на всех частотах (НЧ, СЧ и ВЧ) определяется мощностью, рассеиваемой в катодной области, которая в свою очередь зависит от частоты.

Аналогичные результаты [23] были получены при работе с азотом, когда на мишени и подложке получалась пленка AlN (см. рис. 5). Так как в этом случае разряд постоянного тока был нестабилен из-за часто возникающих дуг, то нормировка данных была проведена по скорости осаждения на частоте 13,56 МГц, при которой она была принята равной $0,5R_0$.

Таким образом, скорость осаждения AlN также снижалась с ростом частоты, но на частоте 80 кГц эта скорость была на 80 % больше, чем на 13,56 МГц. Причем при работе на частоте 80 кГц совершенно отсутствовали дуги, а свойства пленки (скорость травления и коэффициент преломления) не зависели от частоты.

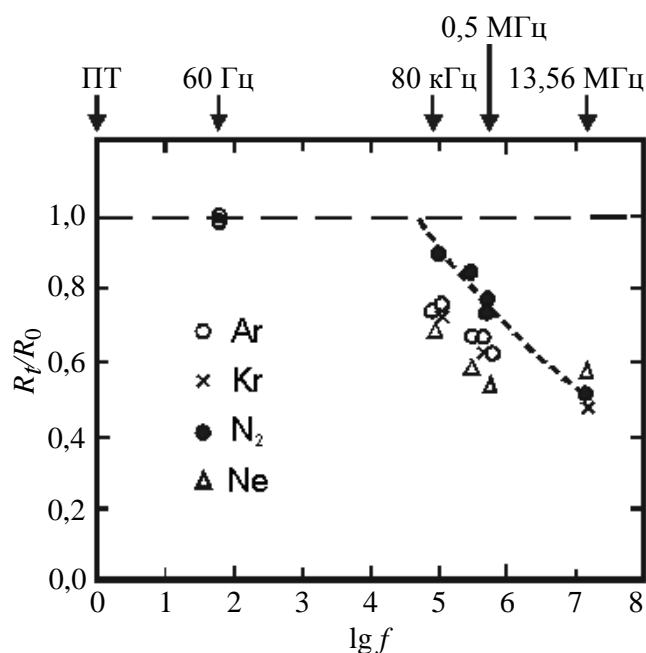


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения Al и AlN от частоты f переменного напряжения [23]. ПТ — режим постоянного тока

В табл. 3 приведены данные по скорости реакционного осаждения диэлектрических пленок в симметричном МРУ с двумя рядом расположенными магнетронами (см. рис. 2, б), мишени которых (материал — Al или Si) имели размеры $48,8 \times 8,8$ см и были подключены к изолированной обмотке повышающего трансформатора [25]. Частота составляла 40 кГц. Подложки перемещались во время напыления на расстоянии 6 см от мишеней. Представленные данные указывают на высокую эффективность работы МРУ на средних частотах и близость полученной скорости осаждения к скорости осаждения при работе на постоянном токе.

Таблица 3

Скорость осаждения диэлектрических пленок в симметричной МРУ с двумя магнетронами при частоте синусоидального напряжения 40 кГц [25]

Материал пленок	Мощность, кВт	Скорость осаждения*, нм/с
Al ₂ O ₃	4	1,9
	6	2,9
	7	3,3
Si ₃ N ₄	4	1,6
	6	2,3
	8	3,0
Si ₄₅ O ₂₇ N ₂₈	4	2,0
	6	2,9
	8	3,8

* Скорость осаждения отнесена к одному магнетрону, т. е. соответствует половинной мощности.

В работе [13] была измерена скорость осаждения пленок AlN, получаемых с помощью симметричного МРУ (см. рис. 2, б), питаемого переменным напряжением частотой 35 кГц или постоянным током при параллельном включении обоих магнетронов. Мишени магнетронов изготавливались из Al и имели размеры 9×21 см при расстоянии между ними 10 см. Давление газовой смеси Ar + N₂ было около 1,3 Па при отношении расходов N₂/Ar, равного 0,18. В табл. 1 приведены данные, полученные при размещении подложки напротив одной из мишеней на расстоянии 4,4 см. Видно, что скорость осаждения при питании переменным напряжением ниже скорости осаждения при распылении на постоянном токе, но ненамного. При переменном напряжении срывы в дугу отсутствовали, но они все время наблюдались при питании постоянным током.

Измерения скорости реакционного осаждения Al₂O₃ в аналогичном МРУ с двумя магнетронами и питанием симметричными биполярными импульсами показали [13]: при мощности разряда 2 кВт стехиометрический оксид алюминия осаждается со скоростью 2,3 нм/с, что составляет 60 % от скорости нереакционного осаждения Al в том же МРУ. При этом скорость осаждения Al₂O₃ не зависела от частоты повторения импульсов в диапазоне 50 Гц—164 кГц. Скорость осаждения Al снижалась в этом диапазоне частот, но не более, чем на 10 % относительно R₀. Оптические свойства Al₂O₃ также не зависели от частоты импульсов разрядного тока в диапазоне 7,5—164 кГц. В работе [32] не было замечено влияние частоты синусоидального напряжения в диапазоне 20—400 кГц на скорость осаждения Al₂O₃ в МРУ с одним магнетроном.

Источники питания переменным напряжением средней частоты

Параметры и характеристики источников питания оказывают значительное влияние на рабочие характеристики МРУ и параметры оптических покрытий [2]. От них также зависят скорость нанесения покрытий, производительность и экономичность технологического процесса. Поэтому выбор схемы питания МРУ — один из важнейших моментов разработки технологии получения того или иного покрытия. В настоящее время применяются несколько эффективных резонансных схем питания СЧ МРУ [3]:

- непрерывным синусоидальным напряжением;
- импульсно-модулированным напряжением от колебательного контура ударного возбуждения (импульсы напряжения представляют собой затухающие синусоиды);
- униполярными импульсами мегаваттной мощности при разряде конденсатора на магнетрон через индуктивность (форма импульсов напоминает полусинусоиду).

Термин “резонансная схема” означает, что в ней используются резонансные реактивные цепи (колебательные контуры), которые настроены на основную гармонику и делают колебания в цепи нагрузки похожими на синусоиду. Такие схемы хороши тем, что они обладают свойством ограничивать амплитуды токов или напряжений. К их достоинствам по сравнению с импульсными системами с прямоугольной формой тока следует отнести: малую амплитуду ВЧ-гармоник и более простое решение вопросов электромагнитной совместимости, а также более легкие условия работы генерирующих электронных приборов, — в первых системах крутизна изменения тока существенно ниже, чем во вторых.

В технике магнетронного распыления чаще всего применяют питание непрерывным синусоидальным СЧ-напряжением. В качестве источников обычно используют электронные генераторы (преобразователи, инверторы), которые либо специально сконструированы для этой цели, либо заимствованы из смежных областей. Пример последнего — применение для питания магнетрона ультразвукового генератора на 22 кГц [43].

Для получения максимальной энергетической эффективности в схемах источников используют ключевые электронные приборы (чаще транзисторы, реже тиристоры, тиратроны и электронные лампы); схемы на этих приборах описаны в литературе [44, 45]. Широко распространена схема резонансного двухтактного мостового инвертора,

показанная в упрощенном виде на рис. 6 для МРУ с двумя магнетронами (М1 и М2).

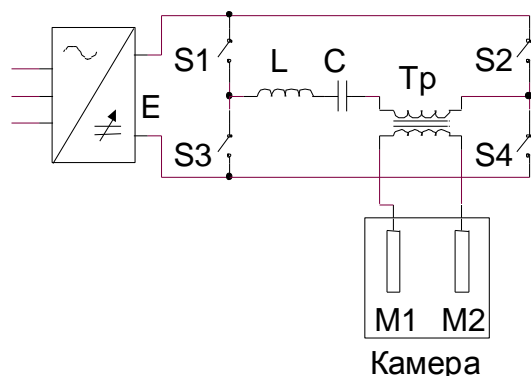


Рис. 6. Резонансный двухтактный мостовой инвертор для МРУ с двумя магнетронами

Инвертор благодаря поочередной работе пар транзисторных ключей S1/S4 и S2/S3 генерирует напряжение в форме меандра, которое через последовательный L-C контур, служащий резонансным фильтром, подается на первичную обмотку согласующего трансформатора Tr. Очередная пара транзисторов включается с некоторой задержкой для создания паузы между импульсами меандра, что уменьшает бросок тока при включении транзисторов и исключается сквозной неконтролируемый ток. Во время пауз происходят рассасывание зарядов в транзисторах и деионизация плазмы в МРУ. Паузы также прерывают дуговой разряд, если он возникает во время импульсов тока, и предотвращают возникновение нового дугового разряда на фронте следующего импульса.

Благодаря последовательному L-C контуру ток в цепи трансформатора близок по форме к синусоидальному, а вся система по своим характеристикам близка к генератору тока с большим внутренним сопротивлением, что предпочтительно для питания газового разряда. Регулирование мощности осуществляется путем изменения напряжения источника питания E или длительностью периода открытого состояния ключей. Первый вариант более предпочтителен, так как при этом меньше искажается форма кривых тока и напряжения.

В других вариантах схем используют параллельный резонансный контур, для этого включают конденсаторы параллельно первичной обмотке выходного трансформатора [46].

Существуют проблемы детектирования дуг в системах синусоидального напряжения (она обсуждается в [3]) и симметрии нагрузок для каждого полупериода. Для МРУ с одним магнетроном нагрузки являются явно несимметричными, для МРУ с двумя магнетронами — практически симметричными. Вообще для МРУ с двумя магнетро-

нами в наибольшей степени подходят первые две резонансные схемы питания.

В настоящее время для питания МРУ выпускаются генераторы непрерывного синусоидального напряжения мощностью 2—300 кВт на частоту 20—100 кГц и мощностью единицы-десятки киловатт на частоту до 450 кГц [35, 36].

Работа МРУ с питанием от колебательного контура с ударным возбуждением рассмотрена в [3, 16, 47]. Отметим, что данный способ питания по сути является одним из вариантов пакетно-импульсного режима [48].

Новым подходом к технологии магнетронного распыления является применение режима мегаваттных импульсов полусинусоидальной формы для одинарного магнетрона [49—51]: длительность полусинусоиды ~100 мкс, частота повторения — 50 Гц, импульсная удельная мощность разряда на мишени — до 3 кВт/см² при разрядном напряжении около 1 кВ. Импульсы получают путем разряда накопительного конденсатора на магнетрон через индуктивность. Этот режим напоминает вакуумную дугу по внешним параметрам, но на самом деле — это сверхплотный тлеющий разряд, ранее реализованный в мощных коммутаторах тока [52]. Большинство публикаций по этому методу относится к металлическим покрытиям, но в последнее время появилась информация о его применении для нанесения оптических слоев из оксидов металлов [53]. Главная особенность этого метода — осаждение покрытия с одновременной бомбардировкой собственными ионами, что позволяет получать очень плотные покрытия со стабильными свойствами.

Выбор материала для мишеней магнетронов при работе на средней частоте

Питание магнетронов переменным СЧ-напряжением накладывает определенные ограничения на выбор материала мишени. Очевидно, что материал должен обладать некоторой омической проводимостью (активной проводимостью или проводимостью на постоянном токе), чтобы электрический ток мог проходить через мишень. Диэлектрические мишени и мишени из нелегированных полупроводников заведомо не годятся, поскольку их импеданс на СЧ очень высокий. Наиболее простой подход — применять металлические мишени, что и делается в большинстве случаев. Однако при этом для получения стехиометрических оксидов (нитридов) необходимо значительно увеличивать концентрацию реакционного газа, чтобы металл, осажденный на подложку, успевал прореагировать с газом, образуя требуемое соединение. Уве-

личение давления реакционного газа приводит к повышению общего давления газа в камере, что нежелательно, так как это усиливает рассеяние распрыленных частиц и снижает их энергию, плотность покрытий и другие параметры, а также приводит к окислению металлических электродов. Повышенное давление газа создает проблемы и для откачки камер в технологических линиях непрерывного действия.

Выходом является использование керамических мишеней субстехиометрического состава, которые имеют пусть низкую, но металлическую проводимость [54—56]. Примеры возможных субстехиометрических составов приведены ниже:

Состав покрытий	Субстехиометрические составы для мишеней
TiO ₂	TiO _{1,55-1,95}
Nb ₂ O ₅	Nb ₂ O _{4,98}
Ta ₂ O ₅	Ta ₂ O _{4,5-4,9}
WO ₃	WO _{2,72-2,9}
ZrO ₂	ZrO _{1,75}

Керамики субстехиометрического состава имеют удельное сопротивление в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}—8 \cdot 10^1$ Ом·см, т. е. обладают достаточной проводимостью на постоянном токе и СЧ и химически стабильны при нагреве до 600 °С [55]. Требуемая добавка реакционного газа в рабочую газовую смесь составляет 10—30 %. Процесс распыления субстехиометрических мишеней является достаточно устойчивым и не требует быстрого плазменного мониторинга и внешней стабилизации технологического режима.

Такие мишени также позволяют осуществлять технологию осаждения оптических покрытий с малой шероховатостью в режиме сверхмощных униполярных импульсов тока магнетронного разряда [53], в котором ионизуется не только газ, но и распрыленные атомные частицы материала мишени, и происходит ассистирование процесса получения покрытия собственными ионами. Благодаря омической проводимости и высокой температуре плавления материала мишеней снижается вероятность возникновения на них дуг при большой плотности ионного тока.

Для реализации подобной технологии необходимо освоить производство мишеней из низкодисперсного плотного керамического материала, однако производство субстехиометрической керамики не сложнее производства керамических мишеней стехиометрического состава. В патенте [54] описан процесс изготовления субоксидных мишеней тугоплавких металлов (Ti, Nb, Ta, Mo, W, Zr, Hf), в патенте [55] — процесс изготовления субстехиометрических мишеней TiO_x длиной до 3,5 м

и диаметром трубчатой основы 150 мм для магнетронов с вращающейся мишенью мощностью до 100 кВт.

В случае нанесения покрытий из SiO₂ и Si₃N₄ применяют мишени из поликристаллического кремния, легированного бором, однако этот материал хрупкий и плохо обрабатывается, а мишени из него довольно дорогие. Было предложено [57] заменить кремний на сплав кремния с алюминием (торговая марка сплава SISPATM), в котором доля алюминия составляет 5—10 %. Данный сплав менее хрупкий, чем кремний, легче обрабатывается и более дешевый, чем чистый кремний. Характеристики оптических покрытий мало отличаются от получаемых с кремниевой мишенью.

Параметры оптических покрытий, наносимых с помощью СЧ МРУ

Параметры покрытий, наносимых с помощью СЧ МРУ, так же как и параметры, получаемые на постоянном токе, зависят от выбора рабочей точки на кривых зависимостей парциального давления реакционного газа и скорости осаждения покрытия (или скорости распыления металлической мишени) от величины потока реакционного газа, подаваемого в технологическую камеру. На рис. 7 приведен качественный вид этих зависимостей, известный из многих работ, в частности [58]. Для примера в качестве реакционного газа взят кислород.

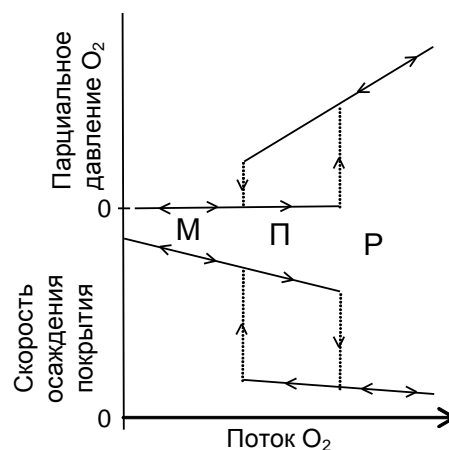


Рис. 7. Зависимости парциального давления и скорости осаждения покрытия от потока O₂ при распылении металлической мишени

Зависимости показывают три характерных режима работы: режим распыления металла (М), в котором металлическая мишень практически "не отравлена"; режим явного реакционного распыления (Р), в котором мишень "сильно отравлена" и распыляется соединение металла с газом (т. е. ок-

сид, нитрид и т. д.); переходная область (П). В режиме М скорость распыления и поглощение реакционного газа — максимальные; наоборот, в режиме Р — минимальные. Состав покрытия: в режиме М — близкий к материалу мишени, но с примесями газового элемента; в режиме Р — близкий к стехиометрическому. Режим П — нестабильный, с сильно выраженным гистерезисом. Реальные параметры зависят от многих факторов (рода газа, материала мишени, разрядного напряжения, плотности тока, параметров откачки, способ стабилизации рабочей точки).

Характерной особенностью СЧ МРУ является возможность их устойчивой бездуговой работы во всех режимах, в том числе в переходной области, где еще сохраняется относительно высокая скорость осаждения покрытия, а его состав уже близок к стехиометрическому с хорошими оптическими параметрами. Для стабилизации работы в области П обычно применяют систему регулирования потока реакционного газа с обратной связью по сигналу, который пропорционален парциальному давлению этого газа [2].

Для сравнения параметров покрытий, получаемых с помощью различных методов, включая СЧ-магнетронное распыление, на рис. 8 приведены диаграммы, показывающие значения величины внутреннего напряжения, плотности и показателя преломления для покрытий из TiO_2 [59]. На рис. 8, б, в также нанесены значения плотности и показателя преломления для объемных кристаллических структур TiO_2 — анатаза (А) и рутила (Р).

СЧ МРУ содержало два магнетрона и работало на частоте 40 кГц [59]. Мощность магнетронного разряда составляла 20—30 кВт; размер каждой мишени из Ti — 700×100 мм; давление газа $Ar+O_2$ устанавливалось 0,2—0,9 Па; расстояние от мишеней до стеклянных подложек — 130 мм; скорость прямолинейного движения подложек — 1 м/мин. Покрытия получали в режимах М и П (см. рис. 7) со стабилизацией парциального давления O_2 . Толщина покрытий составляла 0,2—0,5 мкм. Диаграммы 1, 1', 1'' на рис. 8 представляют результаты для СЧ МРУ. Для получения образцов также применялось распыление на постоянном токе с использованием одного магнетрона, работающего в режиме Р — диаграмма 2 на рис. 8, в.

Приведенные на рис. 8 данные указывают на то, что осаждение оптических покрытий из TiO_2 в СЧ МРУ с двумя магнетронами позволяет получить наилучшие параметры, приближающиеся к параметрам термодинамически самого стабильного объемного кристаллического материала — рутила.

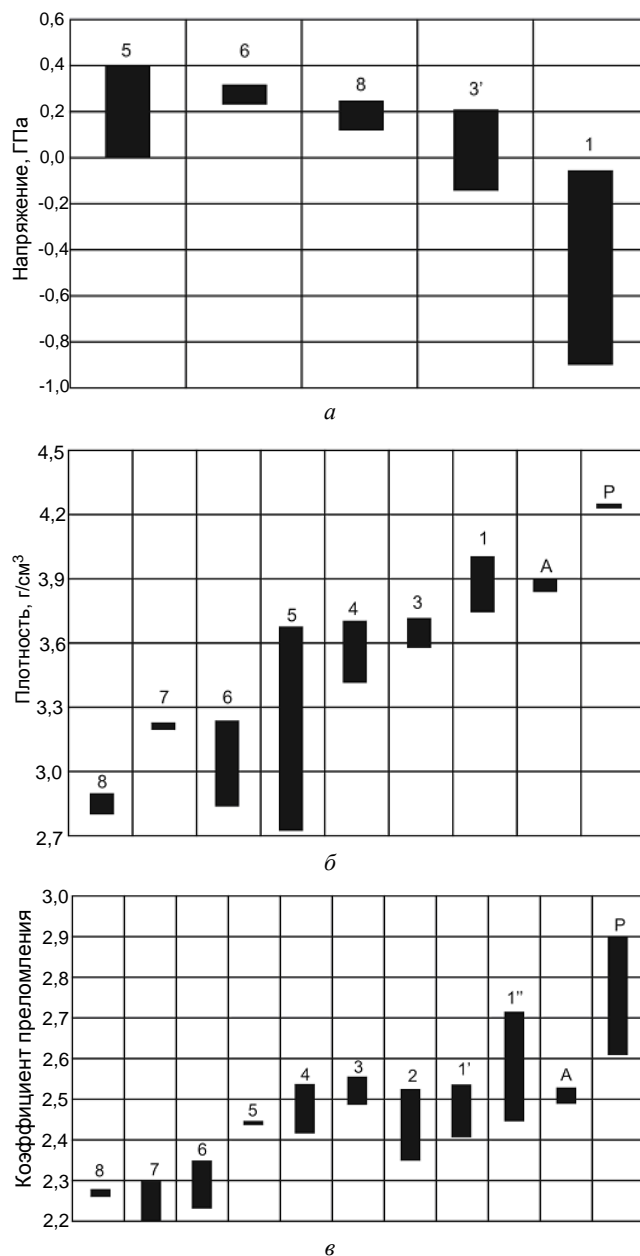


Рис. 8. Значения величины внутреннего напряжения (а), плотности (б) и показателя преломления (в) покрытий из TiO_2 , полученных различными методами [60]:

1, 1' — СЧ-магнетронное распыление; 2 — магнетронное распыление на постоянном токе; 3 — реакционное ионное осаждение; 3' — ионное осаждение; 4 — ионно-лучевое распыление; 5 — CVD с плазменным стимулированием; 6 — реакционное испарение; 7 — нанесение покрытия методом погружения в раствор; 8 — нанесение покрытия методом центрифугирования.

1', 1'' относятся к границам раздела покрытие/стеклянная подложка и воздух/покрытие, соответственно;

А — анатаз; Р — рутил

Полученные с помощью СЧ МРУ покрытия имеют сжимающие внутренние напряжения (см. рис. 8, а); их величина снижалась при увеличении давления газа. Этот факт, а также близость плотности покрытий к значениям плотности, полученным при использовании методов с ионной

бомбардировкой (диаграмм 3 и 4 на рис. 8, б) свидетельствует о значительной роли ионной бомбардировки и в СЧ МРУ. Важно отметить, что полученная высокая плотность покрытия является залогом его влагоустойчивости.

Высокие значения показателя преломления, полученные в режимах М и П, свидетельствуют о том, что в СЧ МРУ с двумя магнетронами имеет место существенная активация кислорода, способного связать атомы распыленного титана с образованием оксида. При этом скорость распыления (осаждения) на частоте 40 кГц в указанных режимах примерно в пять раз превосходила скорость распыления на постоянном токе в режиме Р [59].

На рис. 9 приведены зависимости, показывающие влияние мощности СЧ-разряда W в устройстве с одним магнетроном (мишень — Al, газ — Ag+O₂, давление — 0,8 Па, частота — 22 кГц) на коэффициент поглощения k и скорость осаждения пленок из Al₂O₃ [60]. Как видно, увеличение W приводит к существенному снижению k на длине волны 0,2 мкм, т. е. в области фундаментального поглощения материала, что связано с изменением структуры конденсата. "Насыщение" кривой $k(W)$ при 0,7—0,8 кВт и повышение k при дальнейшем увеличении W объясняется проявлением эффекта дефицита кислорода вблизи подложки, которого перестает хватать для образования стехиометрического оксида алюминия. Поглощение в области 0,35—0,8 мкм было очень малым ($k < 10^{-4}$).

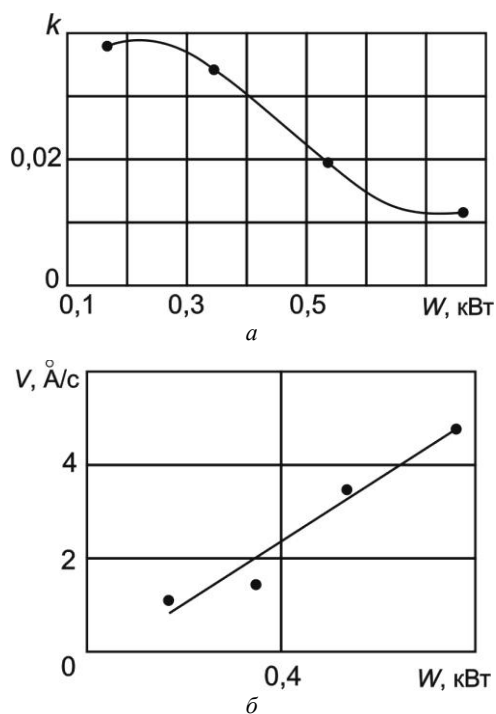


Рис. 9. Зависимости коэффициента поглощения на длине волны 0,2 мкм (а) и скорости осаждения (б) пленок Al₂O₃ от мощности разряда на частоте 22 кГц [61]

Имеется много данных и по другим материалам [61], которые подтверждают высокую эффективность магнетронного распыления при работе на переменном токе средней частоты.

Заключение

Высокое качество оптических покрытий, которые получают с помощью МРУ, питаемых переменным напряжением средней частоты, а также все более широкое применение последних в оптической технологии подтверждают перспективность данного метода магнетронного распыления. СЧ-магнетронный разряд отличается устойчивостью поддержания в среде реакционных газов при высокой скорости осаждения покрытий стехиометрического состава.

В настоящее время уже имеются образцы технологического оборудования, разработаны системы контроля и управления процессами магнетронного распыления на средней частоте, накоплен определенный технологический опыт получения оптических покрытий на подложках различного размера и из различных материалов.

Однако нельзя сказать, что СЧ-магнетронный разряд и технологические процессы на его основе досконально изучены. В большинстве случаев разряд и технологический процесс рассматривают формально как "черный ящик". Необходимо детальное исследование физических процессов в СЧ-разряде и их влияния на параметры потоков частиц, воздействующих на покрытие в период его реакционного осаждения. Необходимо изучить механизмы формирования структуры покрытий в условиях реакционного магнетронного распыления и их влияние на оптические свойства. Результаты фундаментального исследования СЧ-разряда позволят оптимизировать технологию магнетронного распыления и получить покрытия с уникальными свойствами, в частности, градиентные покрытия, необходимые для создания новой квантово-оптической аппаратуры.

Авторы представленного обзора надеются, что он будет способствовать развитию данной технологии в России и других странах СНГ.

Литература

1. Westwood W. D. In "Physics of thin films. Advances in research and development. Contemporary preparation techniques"/ Ed. M. H. Francombe, J. L. Vossen. — San Diego, USA: Academic Press, 1989. P. 1.

2. Вольпян О. Д., Мешков Б. Б., Яковлев П. П.//Сб. докл. науч.-практ. симп. "Функциональные покрытия на стеклах". — Харьков, 2003. С. 125.
3. Кузьмичев А. И., Вольпян О. Д.: Матер. 13-й науч.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России" и 20-м междунар. симп. "Тонкие пленки в электронике". — М., 2007. С. 336.
4. Proc. SVC techn. conf. CD-ROM, 1991—2006.
5. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Зубаков В. Г., Семибратов М. Н., Штандель С. К. Технология оптических деталей. — М.: Машиностроение, 1985.
7. Thin films on glass/Ed. H. Bach, D. Krause. — Berlin: Springer-Verlag, 1997.
8. Hill R. J., Nadel S. J. Coated glass. Applications and markets. — Fairfield, CA, USA: VOC Coating Technology, 1999.
9. Белевский В. П., Кузьмичев А. И. Методы термоионного осаждения для нанесения металлических покрытий. — Киев: Общ-во "Знание", 1984.
10. Martinu L., Poitras D.//J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. V. 18. № 6. P. 2619.
11. Кузьмичев А. И.//Сб. докл. науч.-практ. симп. "Функциональные покрытия на стеклах". — Харьков, 2003. С. 81.
12. Walls J. M., Gibson D. R., Teer D. G., Teer P., Hampshire J.: In proc. 46th ann. SVC techn. conf., 2003. P. 387.
13. Glocker D. A.//J. Vac. Sci. Technol. A. 1993. V. 11. № 6. P. 2989.
14. Kuzmichev A. I., Kulikovskiy V. Yu., Sidorenko S. B.: In proc. 14th int. symp. on Plasma Chemistry. Prague, 1999. V. 2. P. 729.
15. Bradley J. W., Backer H., Kelly P. J., Arnell R. D.//Surf. Coat. Technol. 2001. V. 135. P. 221.
16. Kuzmichev A., Bevza O., Steffen H., Hippler R.//Vacuum. 2005. V. 78. № 2—4. P. 611.
17. Холленд Л. В кн.: Пленочная микроэлектроника. — М.: Мир, 1968. С. 240.
18. Kumagai H. Y.//IEEE Trans. PHP. 1972. V. PHP-8. № 3. P. 7.
19. Марахтанов М. К., Понкратов А. Б., Потанов А. Ф.: Тез. докл. 11-й все. конф. "Генераторы низкотемпературной плазмы". — Новосибирск, 1989. Ч. 1. С. 105.
20. Кузьмичев А. И.//ПТЭ. 1997. № 6. С. 121.
21. Белянин А. Ф., Кузьмичев А. И., Пащенко П. В. и др.: Матер. 12-й науч.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России". — М., 2006. С. 252.
22. Cormia R. L., Trumbly T. A., Andreson S.: Пат. 4 046 659 США, 1977.
23. Este G., Westwood W. D.//J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 6. № 3. P. 1845.
24. Munz W. D., Petersein H., Scherer M.: Пат. 3 802 852 ФРГ, 1989.
25. Scherer M., Schmitt J., Latz R., Schanz M.//J. Vac. Sci. Technol. A. 1992. V. 10. № 4. P. 1772.
26. May C., Strumpf J.//Thin Solid Films. 1999. V. 351. P. 48.
27. Kirchhoff V., Kopte T., Winkler T. et al.//Surf. Coat. Technol. 1998. V. 98. P. 828.
28. Белевский В. П., Кузьмичев А. И., Массалитин Э. Ф. Импульсная ионная обработка и осаждение тонких пленок и покрытий. — Киев: Общ-во "Знание", Украина, 1991.
29. Schiller S., Goedicke K., Reschke J. et al.//Surf. Coat. Technol. 1993. V. 61. P. 331.
30. Кузьмичев А. И.//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 1999. Вып. 2(10). С. 29.
31. Gruen R.: Пат. 5 015 493 США, 1991. (Пат. 3 700 633 ФРГ, 1987).
32. Belkind A., Freilich A., Scholl R.//J. Vac. Sci. Technol. A. 1999. V. 17. № 4. P. 1934.
33. Maniv S., Westwood W. D.//Ibid. 1980. V. 17. № 3. P. 743.
34. Nyaiesh A. R., Holland L.//Vacuum. 1981. V. 31. № 7. P. 315.
35. Проспекты фирмы Advanced Energy, США.
36. Проспект фирмы Huttinger Elektronik, ФРГ.
37. Vancoppenolle V., Jouan P.-Y., Wautelet M. et al.//J. Vac. Sci. Technol. A. 1999. V. 17. № 6. P. 3317.
38. RAS — Redundant anode sputtering split inductor. Single-cathode reactive sputtering without the disappearing anode: Проспект фирмы Advanced Energy, США.
39. Чайрев В. И.: Тр. постоянно действующего науч.-техн. сем. "Электроракумная техника и технология". — М., 1999. Т. 1 (1997—1998). С. 62.
40. Вольпян О. Д., Хмельщиков М. В., Яковлев П. П.: Тр. междунар. науч.-практ. конф. "Нанотехнологии — производству—2006". — Фрязино, 2006. С. 259.
41. Sproul W. D., Graham M. E., Wong M. S. et al.//J. Vac. Sci. Technol. A. 1995. V. 13. № 3. P. 1188.
42. Kelly P. J., Arnell R. D.//Ibid. 1999. V. 17. № 3. P. 945.
43. Вольпян О. Д., Мешков Б. Б., Яковлев П. П., Обод Ю.Д.//Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 7. С. 36.
44. Артым А. Д. Ключевые генераторы гармонических колебаний. — Л.: Энергия, 1972.
45. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. — М.: Изд. дом Додэка-XXI, 2001.
46. Rettich T., Wiedemuth P.: In proc. 44th ann. SVC techn. conf., 2001. P. 214.
47. Кузьмичев А. И., Бевза О. Н.: Матер. 2-го межр. симп. "Нанотехнологии и фотонные кристаллы". — Калуга, 2004. С. 218.
48. Кузьмичев А. И.: Матер. 9-й конф. "Высокие технологии в промышленности России". — М., 2003. С. 40.
49. Мозгрин Д. В., Фетисов И. К., Ходаченко Г. В.//Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 5. С. 422.
50. Bugaev S. P., Podkovyrov V. G., Oskomov K. V. et al.//Thin Solid Films. 2001. V. 389. P. 16.
51. Kouznetsov V., Macak K., Schneider J.M. et al.//Surf. Coat. Technol. 1999. V. 122. P. 290.
52. Крестов В. А., Крижановский В. И., Кузьмичев А. И.//ПТЭ. 1986. № 5. С. 236.
53. Sarakinos K., Alami J., Wuttig M.//J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 2108.
54. Kido O., Mitsui A., Suzuki E. et al.: Европейская патентная заявка EP 0 852 266, 1998.
55. Vanderstraeten J. E. M.: Пат. 6 461 686 США, 2002.
56. Schintlmeister A., Wilhartitz P.: In proc. 46th ann. SVC conf, 2003. P. 296.
57. Ruske M., Brauer G., Pistner J. et al.//Thin Solid Films. 1999. V. 351. P. 158.
58. Berg S., Blom H.-O., Morandi M. et al.//J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. V. 7. № 3. P. 1225.
59. Szczyrbowski J., Brauer G., Ruske M. et al.//Surf. Coat. Technol. 1999. V. 112. P. 261.
60. Мешков Б. Б., Яковлев П. П.//Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 9. С. 69.
61. Чутко В. М.: Тр. постоянно действующего науч.-техн. сем. "Электроракумная техника и технология". — М., 2003. Т. 2 (1999—2002 гг.). С. 85.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2007 г.

Magnetron deposition of optical coatings with magnetron power supply by mid-frequency alternative voltage

O. D. Volpian

Federal State Unitary Enterprise "M. F. Stelmakh Research Institute–Polus", Moscow, Russia

A. I. Kuzmichev

National Technical University "Kiev Polytechnical Institute", Kiev, Ukraine

The features of sputtering technology for optical coatings deposition with help of magnetrons, which are power supplied by mid-frequency alternative voltage, are considered. The problems of practical realization of this technology are considered too. The technology is shown to ensure obtaining high-quality optical coatings.

УДК 533.951

Корпускулярная диагностика как инструмент исследования быстрых зет-пинчей

А. Н. Долгов, Д. Е. Прохорович

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва, Россия

Продемонстрирована возможность использования пассивной корпускулярной диагностики для изучения процессов в плазме микропинчевого разряда. Времяпролетным методом получены распределения (спектры) ионов по скоростям в зависимости от величины тока в разряде. Сравнительный анализ полученных спектров и результатов параллельных исследований, а также расчетов в рамках модели радиационного сжатия позволил связать появление устойчивых групп частиц в зарегистрированных спектрах с процессами, происходящими в разрядном промежутке.

Введение

Методы корпускулярной диагностики в списке методов, применяемых для исследования пинчующихся разрядов в среде тяжелых элементов, занимают весьма скромное место. Авторы намерены продемонстрировать плодотворность использования пассивной корпускулярной диагностики для изучения процессов в плазме быстрого Z-пинча. С точки зрения повышения достоверности в интерпретации полученных результатов измерений и их информативности представляют интерес одновременные измерения параметров корпускулярной эмиссии и иных параметров плазмы разряда, а также расширение диапазона используемых корпускулярных диагностик.

Постановка эксперимента и его результаты

Микропинчевой разряд осуществлялся в вакуумном устройстве типа низкоиндуктивной вакуумной искры [1]. Электроды системы (катод — цилиндрический, анод — конический) выполнены из железа и размещены в вакуумной камере (вакуум не хуже 10^{-4} Торр). Рабочая среда — пары материала электродов. Инициация разряда осуществлена с помощью вспомогательного разряда эрозионного типа, электроды которого размещены вне области протекания тока основного разряда. Источником тока основного разряда послужила батарея высоковольтных низкоиндуктивных конденсаторов. Максимум тока в разряде достигнут за время $\sim 1,5$ мкс после срабатывания системы инициации разряда.