

УДК 533.9.924+621.793.18

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

И.В. СВАДКОВСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 23 февраля 2007

Рассмотрены вопросы функционирования магнетронных распылительных систем постоянного тока, определены перспективные направления развития метода, включающие понижение рабочего давления, разработку устройств несбалансированного типа и многокатодных распылительных систем. Освещены проблемы формирования компонентных пленок с использованием химически активной плазмы и перспективные методы технологической реализации реактивных процессов нанесения.

Ключевые слова: магнетрон низкого давления, несбалансированный магнетрон, реактивное распыление.

Введение

Наиболее распространенными устройствами ионно-плазменного нанесения являются магнетронные распылительные системы постоянного тока (*magnetron sputtering system* — MSS), в которых формирование пленок производится из аномального тлеющего разряда в скрещенных $E \perp H$ полях, что в сочетании с формой распыляемой поверхности мишени создает конфигурацию магнитной ловушки для электронов. Методы магнетронного распыления имеют большие перспективы промышленного применения благодаря высокой скорости нанесения и адгезии наносимых слоев металлов, сплавов и диэлектриков (в случае использования реактивных процессов) с возможностью управления параметрами пленок за счет изменения потенциала смещения на подложке, давления и состава газовой среды. В статье рассмотрены перспективы развития MSS метода, включающие понижение рабочего давления, разработку устройств несбалансированного типа и многокатодных распылительных систем, а также особенности реактивного нанесения компонентных слоев.

Магнетронные распылительные системы пониженного давления

Уменьшение рабочего давления MSS ниже уровня 0,1 Па позволяет управлять параметрами пленок, а также модифицировать процесс нанесения ионной бомбардировкой выращиваемой фазы. Реализация процесса *sight-of-line* нанесения (т.е. минимизация межкатодного взаимодействия при транспортировке распыленного потока) обеспечивает возможность формирования пленок с напряжениями сжатия, а в определенных случаях распыление ионами материала мишени. Возможность нанесения покрытий с неординарными свойствами, соответствующими зоне T зональной модели *Thornton*, открывает перспективы разработки новых технологических процессов формирования защитных покрытий и покрытий со специальными свойствами (антифрикционные, антикоррозионные и др.) [1]. Уменьшение

рабочего давления увеличивает гибкость проектирования распылительных систем за счет возможности увеличения дистанции "мишень–подложка", а также позволяет реализовывать процессы ионного ассистирования магнетронному нанесению (*Ion beam assisted deposition* — ИВАМ). Однако для функционирования MSS при пониженном давлении необходимо преодолеть определенные ограничения, связанные с физическими условиями формирования разряда [2].

Для обеспечения поддержания самостоятельного разряда необходимо, чтобы длина свободного пробега электронов была менее длины траектории электрона от катода к аноду (d). В стационарном состоянии ток электронов на анод определяется как $I_e = I_{eo} \exp(\alpha d)$, где I_{eo} — электронный ток из катода; α — ионизационный коэффициент. Такой же ток в стационарном процессе проходит и через катод, складываясь из электронного и ионного. Один вышедший из катода электрон рождает в промежутке $\exp(\alpha d) - 1$ положительных ионов, и все они приходят на катод. При этом каждый ион вырывает γ электронов за счет ионно-электронной эмиссии [3]. Для возникновения разряда низкого давления в MSS необходимо наличие источника первичных электронов для несамостоятельного разряда или обеспечение условий для поддержания самостоятельного разряда, описываемое уравнением:

$$\gamma(\exp(\alpha d) - 1) = 1. \quad (1)$$

Другим ограничением, препятствующим уменьшению рабочего давления MSS, является необходимость относительного увеличения плотности электронов в разрядном слое и холловского тока для поддержания неизменного разрядного тока [4].

Экспериментально установлено, что в определенной степени уменьшение рабочего давления MSS может быть достигнуто увеличением периметра разрядной зоны [5, 6]. При этом повышается чувствительность минимального давления к неравномерности магнитного поля вдоль разрядной зоны.

Наиболее очевидным путем поддержания условия (1) при понижении давления является увеличение напряженности магнитного поля у поверхности мишени. Магнитное поле, существенно увеличивая путь электронов от катода к аноду, повышает число ионизирующих столкновений. В результате каждого столкновения электрон отдаляется от мишени на дистанцию порядка ларморовского радиуса. В общем случае магнитное поле и рабочее давление в определенной мере оказывают одинаковое влияние на возникновение и развитие разряда в MSS [7]. Установлено, что в MSS, магнитное поле которого сбалансировано и формируется только одним источником магнитного поля, рабочее давление может быть понижено увеличением напряженности поля до определенного предела, который может быть преодолен только качественными изменениями в организации разряда.

Для понижения минимального давления в разряде MSS используется профилирование мишени. Профилированная мишень играет роль полого катода, что позволяет повысить концентрацию первичных электронов в разряде [8].

Понижение рабочего давления может достигаться радиальным ограничением области разряда магнитным полем [1, 9]. В случае сбалансированной конфигурации поля MSS часть силовых линий в периферийной области разряда выходит за пределы мишени, что обуславливает радиальный уход электронов из области разряда. Предотвращение попадания линий магнитного поля за края мишени увеличивает эффективность использования электронов и позволяет понизить рабочее давление. Подобное ограничение разряда в MSS может осуществляться как магнитной системой на постоянных магнитах, так и с помощью дополнительного источника поля [10]. Конструкции подобного типа получили название несбалансированных MSS (*unbalanced magnetron* — UBM). Достигнуто понижение рабочего давления UBM до уровня 10^{-2} Па с токами разряда до нескольких ампер [1]. Однако наряду с положительным эффектом такая конфигурация магнитного поля может уменьшить время нахождения электронов в разрядной области за счет повышения подвижности вдоль осевой составляющей поля на некотором расстоянии от поверхности мишени. Другим негативным фактором может быть искажение "арочности" силовых линий в области плотной плазмы в случае использования магнитной системы с единственным источником поля. Таким образом,

одной из задач, которые необходимо решать в процессе разработки MSS низкого давления, является формирование конфигурации магнитного поля, при которой баланс осевого и радиального ухода электронов из разряда носит оптимальный характер.

Другими вариантами распыляющих систем с улучшенной конфигурацией магнитного поля являются MSS с многополюсной системой ограничения плазмы, двухмишенные MSS с электрическими зеркалами, распылительные системы с замкнутой областью [1, 11, 12].

Понижение давления может также обеспечиваться использованием дополнительного источника электронов для создания условий самостоятельного разряда в MSS. Увеличение концентрации первичных электронов может достигаться за счет использования эмиссии из накаливаемого катода, полого катода, индуктивно связанной ВЧ или СВЧ плазмы, ионного источника с холловским током [13–15]. Наблюдается значительная разница в ВАХ самостоятельного и несамостоятельного разряда MSS, заключающаяся в уменьшении или отсутствии порогового напряжения зажигания разряда и значительном уменьшении минимального давления (при стимуляции СВЧ разрядом до 0,007 Па). При этом использование дополнительного разряда может приводить не только к повышению ионизации рабочего газа, но и к формированию ионов распыленного материала [1].

Логическим продолжением понижения давления в MSS является самораспыление (*self-sputtering*), при котором происходит ионизация распыленного материала, и возможно поддержание разряда в отсутствие инертного газа [1, 16]. Увеличение разрядного тока в MSS приводит к повышению рабочего давления. Однако для некоторых материалов (например, Ag, Cu) при достижении определенного давления и уровня плотности мощности наблюдается увеличение ионизации распыленных атомов. Дальнейший рост плотности мощности приводит к увеличению доли ионов металлов в распыляющем потоке, что позволяет резко понизить давление разряда вплоть до полного прекращения подачи газа. Для Cu пороговая плотность мощности составляет 50 Вт/см². Самораспыление наблюдается только для материалов с высоким коэффициентом распыления, а также для тех случаев, когда обеспечиваются условия охлаждения мишени [16], высокая плотность мощности на мишени и наличие рабочего газа для зажигания разряда. Максимальная скорость нанесения пленок ограничена возможностью охлаждения мишени.

Магнетронные распылительные системы несбалансированного типа

В сбалансированном магнетроне зона плотной плазмы ограничивается на расстоянии нескольких сантиметров от поверхности мишени. Если подложка установлена за пределами этой области, плотности тока ионов на подложку недостаточно для модификации структуры пленки. Однако для осаждения плотных пленок без больших внутренних напряжений предпочтительны большие потоки ионов низкой энергии (порядка 100 эВ) [2]. Необходимые для этого условия реализуются в UBM. При исследовании планарных магнетронов были выделены три группы с различной конфигурацией магнитного поля [17].

Первая группа — это обычный, или сбалансированный магнетрон, в котором внутренний и внешние магниты формируют поле, где все силовые линии, выходящие из мишени от одного полюса магнитной системы, замыкаются на другой в области мишени.

В UBM 1-го типа центральный полюс усилен относительно внешнего, а незамкнутые линии поля с центральной области имеют радиальную направленность. При этом практически устраняется осевая составляющая магнитного поля, что определяет низкий ионный ток на подложку. Применение UBM 1-го типа позволило получить покрытия с воспроизводимой пористостью, примерно в 1000 раз большей, чем у плотного материала [2, 18].

В UBM 2-го типа внешний полюс усилен относительно центрального, а область распространения покинувших ловушку электронов ограничена усиленным боковым полем. Осевое магнитное поле заставляет электроны, покинувшие область разряда, двигаться вдоль силовых линий по направлению к подложке. Для компенсации возникающего объемного отрицательного заряда ионы за счет амбиполярной диффузии вытягиваются из области разряда и ускоряются в направлении подложки. По сути, можно говорить о возникновении несамостоятельного разряда, поддерживаемого за счет генерации заряженных частиц основным

разрядом. При этом повышение концентрации энергетичных электронов приводит к увеличению сечения возбуждения атомов и диссоциации молекул в зоне "мишень–подложка". Эти особенности UBM предопределили повышенное внимание, уделяемое данному направлению в последние годы [2, 10, 12].

Продольная составляющая поля UBM 2-го типа (в дальнейшем просто UBM) достигается увеличением объема постоянных магнитов по внешнему краю мишени или применением дополнительного электромагнита [2, 19]. В работах [14, 20, 21] проведено сравнительное исследование характеристик трех конфигураций магнетронных распылительных систем диаметром мишени (Ti, нержавеющая сталь и графит) 80 мм: сбалансированного магнетрона — MSS (индукция на поверхности мишени в разрядной области $B_z = 0,065$ Тл), несбалансированного магнетрона с одним источником поля — UBM ($B_z = 0,09$ Тл), и магнетрона с дополнительным соленоидом — *magnetron with additional coil* — MAC ($B_z = 0,065$ Тл).

В исследуемых магнетронах плотность ионного тока на подложку определяется конфигурацией магнитного поля, уменьшается с увеличением давления и расстояния "мишень–подложка" и прямо пропорциональна току разряда. Так как скорость нанесения также пропорциональна току разряда при неизменном напряжении, при повышении скорости нанесения отношение ион/атом на определенном расстоянии остается постоянным. Установлено, что осевая составляющая магнитного поля играет основную роль в создании эффекта несбалансированности. Для UBM и MAC на оси устройств отмечены области с противоположным направлением вертикальной составляющей магнитного поля (B_z), при этом положение точки, в которой B_z изменяет направление на противоположное, зависит от соотношения периферийного и центрального магнитных потоков и тока соленоида. Для оценки степени несбалансированности введены понятия коэффициентов несбалансированности (K) и геометрической несбалансированности (K_G), которые характеризуют отношение периферийного и центрального магнитных потоков на поверхности мишени, а также относительное положение точки изменения направления B_z [14]. Установлено, что плотность тока подложки и отношение ион/атом, определяемое из соотношения (2), прямо пропорциональны K :

$$\frac{i}{a} = \frac{j(z, \gamma) A_m}{N_A e \rho V_p(r_2)}, \quad (2)$$

где $j(z, \gamma)$ — плотность ионного тока на подложке в точке, на расстоянии z от мишени под углом γ к оси; A_m — атомная масса распыляемого материала; ρ — плотность материала; $V_p(r_2)$ — скорость нанесения в точке подложки, расположенной на расстоянии r_2 от оси, определяемая коэффициентом распыления, распределением плотности ионного тока на мишень и компоновочными параметрами системы.

Установлено, что ВАХ подложки имеет области насыщения тока как в положительной, так и отрицательной области напряжений смещения, при отрицательном потенциале самосмещения порядка 15–30 В, который несколько увеличивается при уменьшении рабочего давления. При напряжении смещения порядка 60–80 В электронный ток на подложку достигал 1,7 А при токе разряда UBM 2,2 А. Суммарный ток подложки достигал 160 мА при разрядном токе 3 А в случае UBM, тогда как при работе MSS не превышал 35 мА при тех же условиях. Увеличение K приводило к увеличению разрядного напряжения и напряжения самосмещения подложки. Плотность ионного тока на подложку в MAC достигала 25 мА/см² при разрядном токе 2 А и расстоянии "мишень–подложка" 7,5 см и примерно на порядок величины превышала плотность тока MSS и в 3–4 раза — UBM [2].

Минимальное рабочее давление MSS ($K=1,23$) при использовании Ti мишени составляло 0,08 Па, тогда как для UBM ($K=3,19$) — 0,10 Па. Магнитные системы MSS и UBM одинаковы и различаются только усиленной магнитной обоймой внешних магнитов в UBM. Следует отметить, что минимальное рабочее давление MAC при $K=3,2$ составляло 0,04 Па и существенно отличалось от UBM. Этот эффект может быть вызван как более сильным искажением арочности магнитного поля вблизи поверхности мишени UBM, так и

ограничением радиального распространения электронов в промежутке "мишень–подложка" в МАС за счет усиления вертикальной составляющей магнитного поля на значительных расстояниях от мишени. Подобная МАС конфигурация линий магнитного поля наблюдается в многокатодных системах с замкнутой областью.

Магнетронные распылительные системы с замкнутой областью

Диапазон использования одиночных MSS и UBM ограничен в силу некоторых недостатков, одним из которых является "затенение" при обработке изделий, имеющих объемную поверхность. По этой причине был разработан ряд многокатодных распылительных систем [2, 11, 12]. В двухкатодных MSS магнитные системы могут конфигурироваться с идентичной или противоположной полярностью [11]. Такие конфигурации были описаны как "зеркальная" (*mirrored*) и "с замкнутой областью" (*closed field*). При зеркальной конфигурации полярность магнитных систем обоих магнетронов идентична. При конфигурации с замкнутой областью линии магнитного поля замкнуты между магнетронами, а подложка находится в области высокой плотности плазмы. Многокатодные устройства подобного типа получили обозначение CFUBMS (*closed field unbalanced magnetron sputtering*). Соотношение ион/атом для CFUBMS метода в 2–3 больше, чем в случае UBM, при этом влияние замкнутой области магнитного поля становится более явным при увеличении расстояния "мишень–подложка" [11]. Так как при пониженном давлении скорость формирования пленки пропорциональна квадрату расстояния, а плотность осевого электронного тока в CFUBMS зависит от градиента магнитного поля в зоне обработки, то отмечен рост соотношения ион/атом с увеличением расстояния до подложки [2, 22]. Потенциал самосмещения подложки в CFUBMS находится в качественном соответствии с UBM и уменьшается с увеличением давления. Последние конструкции магнетронов для CFUBMS систем разрабатываются с использованием редкоземельных магнитов, что позволяет повысить величину магнитного поля на поверхности мишени до 0,1 Тл [11]. Разработан ряд промышленных и исследовательских CFUBMS многокатодных систем [2, 12], в которых четное количество магнетронов окружает вращающийся подложкодержатель.

Для управления соотношением ион/атом в процессе нанесения используют также дополнительные источники магнитного поля, изменяющие напряженность в области подложки. Использование двухкатодной CFUBMS с дополнительным источником магнитного поля, расположенным под подложкой, позволило управлять осевой составляющей магнитного поля у подложки от 0 до 0,014 Тл. В результате формировались пленки Ti с микроструктурой от пористой с ориентацией решетки (0002) до плотноупакованной с ориентацией (1011) [23].

Сочетание высокой скорости нанесения пленок с большой плотностью ионного тока на поверхность конденсации послужило причиной резкого роста использования метода в микроэлектронике, машиностроении, оптике, медицине. Наносимые слои нитридов, карбидов, карбонитридов и др. обладают высокими показателями твердости, износостойкости, антифрикционными и антикоррозионными свойствами, жаропрочностью, химической инертностью и т.д. [2, 11, 24].

Многокатодные CFUBMS используются для нанесения многокомпонентных нитридов (TiAl)N, (TiZr)N, (CrZr)N и др. [2, 25]. При этом распылением мишеней с различной скоростью возможно управлять стехиометрией наносимых слоев. Например, изменение композиционного состава (TiAl)N покрытия обеспечивает возможность получения эффекта по двум направлениям: повышение коррозионной стойкости благодаря формированию поверхностного слоя электрокорунда и увеличение твердости из-за межзеренного алюминия в структуре нитрида. Многокатодные CFUBMS применяются для нанесения пленок на основе сверхрешеток (*superlattice*), т.е. многослойных периодических структур, состоящих из чередующихся слоев толщиной, сравнимой с периодами кристаллической решетки (5–10 нм). Сверхрешетки могут быть получены на основе нитридов, карбидов или оксидов одного металла или комбинации многокомпонентных слоев [11].

CFUBMS применяются для нанесения покрытий, обладающих свойствами "твердой смазки" (MoS₂, графит, материалы с гексагональной структурой решетки), т.е. низким

коэффициентом трения, и способных защищать взаимодействующие поверхности [2]. Получены покрытия, сочетающие низкий коэффициент трения с высокой твердостью. К ним относятся композитные слои на основе MoS_2 /металл, обладающие большей твердостью и износостойкостью, чем традиционные MoS_2 , но в то же время сохраняющие низкие фрикционные характеристики. В графитовых покрытиях в отличие от DLC преобладает sp^2 -гибридизированные связи, однако в зависимости от условий нанесения были зарегистрированы значения твердости от 15 до 40 ГПа. В CFUBMS в этом случае используются три углеродные мишени и одна мишень хрома. Независимым управлением мощностью разряда каждого магнетрона получают металл-углеродное многослойное покрытие [11].

Среди тенденций развития методов CFUBMS можно выделить так называемые дуплексные процессы создания покрытий. Типичным примером является плазменное азотирование низколегированной стали с последующим покрытием износостойким материалом, например TiN. Упрочненный азотированный слой обеспечивает плавный градиент твердости к поверхности изделия и лучшую адгезию покрытия. В результате обработанное изделие имеет высокую износостойкость и хорошую усталостную прочность [2].

Представляется перспективным развитие метода ионного ассистирования магнетронному распылению (IBAM), когда процесс распыления сопровождается ионной бомбардировкой подложки из ионного источника. Для реализации IBAM необходимо обеспечить совмещение диапазонов давления функционирования MSS и ионного источника (как правило, не более 0,1 Па), а также выполнить условие разрядной и электромагнитной совместимости устройств. Ионные источники с холловским током имеют наибольшие перспективы для процессов IBAM, что обуславливается идентичностью базовых физических процессов в разряде и приемлемыми диапазонами рабочих давлений. Пониженное рабочее давление MSS позволяет реализовать в сочетании с ТХУ перспективный метод ионно-ассистированного CFUBMS. В данном случае линии магнитного поля замкнуты между магнетроном и ионным источником, а подложка находится в области высокой плотности плазмы. MSS является эффективным источником электронов для поддержания разряда ТХУ, что дает возможность отказаться от других эмиттеров электронов, а разряд источника, в свою очередь, позволяет понизить давление работы MSS до 0,02 Па. С помощью ионно-ассистированного CFUBMS производится низкоэнергетическая (порядка 10 эВ) ионная бомбардировка подложки в процессе роста пленок из разряда МАС при дополнительной ионной бомбардировке ионами с энергией порядка 100 эВ из ТХУ [14, 20]. Реализация этого процесса позволяет независимо контролировать состав и энергию, а также угол падения бомбардирующих частиц на подложку, расширить диапазон энергий обрабатываемых ионов и обеспечить режимы ионного ассистирования независимо от режимов MSS.

Реактивные ионно-плазменные процессы нанесения

Эффект чувствительности параметров получаемых пленок к составу газовой среды в разряде широко применяется для формирования компонентных слоев ионно-плазменными методами. Используя сравнительно легко изготавливаемые мишени из металлов и сплавов, можно получать различные сложные соединения, меняя состав и давление реактивного газа, параметры разряда и температуру подложки. В общем случае при реактивном распылении образование химических связей может наблюдаться на трех стадиях процесса.

1. Поскольку в реактивных процессах применяется смесь инертного и активного газов, то на мишень поступает смешанный поток ионов, возбужденных атомов и молекул, которые не только участвуют в ее распылении, но и реагируют с ее атомами, что ведет к образованию на ее поверхности соединения.

2. В процессе транспортировки распыленных атомов от мишени к подложке возможен процесс их взаимодействия с частицами плазмы, в том числе и с образованием химических связей.

3. Конденсированные на поверхности подложки атомы за счет своей значительной энергии взаимодействуют между собой и с поверхностными атомами, в том числе и с адсорбированными из объема, что ведет к образованию химического соединения.

В случае реактивных ионно-плазменных методов затруднительно, в отличие от обычных химических равновесных процессов, отделить кинетику химического и физического взаимодействия реактивных частиц плазмы с обрабатываемым материалом. Особенностью физико-химических процессов в рассматриваемых методах является отсутствие детального баланса прямых и обратных процессов. Диссоциация, ионизация и возбуждение протекают в объеме плазмы в большинстве случаев за счет неупругих соударений, а рекомбинация или синтез соединений — на стенках разрядной системы или в периферийных зонах разряда за счет других, не детально обратных процессов, т.е. в данном случае налицо пространственное разделение процессов. При этом физические процессы в разрядной системе косвенным образом определяют кинетику гомогенных и гетерогенных реакций [2, 26, 27]. Влияние на скорость процессов, протекающих на поверхности, оказывает ионная бомбардировка, которая может приводить не только к замедлению или ускорению химических реакций, но и к смене направления их протекания.

Для создания условий эффективных химических превращений представляется перспективным управление параметрами E/p_0 и E/n_e (где p_0 — давление активного газа), что в общем случае может обеспечиваться "вторичным" разрядом, поддерживаемым в области подложки или мишени за счет основного. Условием существования вторичного разряда в отсутствие дополнительных источников напряжений является наличие объемного или поверхностного заряда в результате направленного ухода ионных или электронных потоков из основной разрядной области.

В общем случае, зависимости скоростей распыления от давления кислорода в рабочей зоне в общем случае имеют три отчетливо выраженных участка [2]. На первом участке при увеличении давления кислорода скорость распыления практически не меняется. При давлениях кислорода выше критического значения скорость окисления превышает скорость распыления материала мишени, и наблюдается падение скорости распыления. Это вызвано тем, что коэффициенты распыления оксидов, как правило, меньше, чем соответствующих металлов, что определяется более высокой энергией связи атомов. Так, у титана энергия связи Ti–Ti составляет 4,9 эВ, а энергия связи Ti–O — 6,8 эВ. У Al и Al₂O₃ — соответственно 3,2 и 19,2 эВ. Другим фактором, замедляющим процесс реактивного распыления, является снижение средней массы ионов (масса аргона — 40 а.е.м., кислорода — 32). На третьем участке вновь наблюдается незначительная зависимость скорости нанесения от давления, что вызывается распылением оксидной пленки, близкой по своему составу к стехиометричной. Для характеристики реактивного распыления используется так называемый "параметр отравления", определяемый как отношение скоростей поступления кислорода на поверхность и удаления материала. Очевидно, что скорость поступления кислорода на поверхность зависит не только от давления, но и от потока ионов, а также концентрации возбужденных молекул и атомов. Скорость удаления материала с поверхности пропорциональна плотности ионов на подложку и коэффициенту распыления, который собственно говоря, величина переменная, зависящая от поверхностной концентрации кислорода. С повышением "параметра отравления" увеличивается покрытие поверхности оксидной пленкой, и измеренный коэффициент распыления приближается к коэффициенту распыления его оксида.

Во многом аналогичные зависимости наблюдаются при использовании в качестве активной компоненты азота.

При распылении соединения с поверхности мишени в большинстве случаев происходит его фрагментация на атомные составляющие. Перенос материала в виде молекул или многоатомных кластеров возможен только для соединений с высокими энергиями связи. Вероятность взаимодействия распыленных атомов с активными частицами плазмы с образованием химических соединений определяется энергией связи, эффективным сечением взаимодействия, а также конфигурацией процесса, плотностью плазмы и давлением в промежутке "мишень–подложка". Для большинства из рассматриваемых процессов эта вероятность взаимодействия относительно мала.

Во многих случаях вероятно протекание химических реакций на поверхности подложки при условии поступления распыленного материала в присутствии активных частиц реактивного газа.

В реактивных процессах с использованием методов собственно ионно-плазменного распыления мишень является электродом разряда, а все три стадии процесса образования химической связи одновременны, неразделимы и взаимосвязаны между собой [28]. Скорость нанесения и поверхностное состояние мишени зависят от большого числа параметров реактивного процесса и одновременно сами влияют на них. Формирование соединения на мишени создает условия для образования поверхностного заряда, что оказывает влияние на стабильность и воспроизводимость характеристик разрядной плазмы и существенно снижает эффективность процесса распыления. Изменение скорости нанесения меняет быстроту поглощения пленкой активного газа и парциальное давление в разряде. В результате этого при одинаковой мощности скорость нанесения может различаться на порядок, а состав пленки значительно изменяться. Наличие гистерезисной взаимосвязи параметров реактивного процесса существенно усложняет контроль происходящих в нем явлений [29]. В то же время, именно область гистерезиса представляет наибольший практический интерес, так как здесь можно совместить большую скорость распыления, присущую чистой мишени, и высокое давление реактивного газа, необходимое для получения стехиометрических пленок [30].

Для воспроизводимого нанесения пленок необходимо сбалансировать относительные потоки поступления распыленных атомов и атомов активного газа. При этом управление процессом может осуществляться как изменением мощности разряда, так и контролем концентрации активной компоненты в зоне разряда. Контроль активной компоненты в зоне разряда может осуществляться управлением расхода газа либо парциального давления [29, 31] при использовании специальных систем газового контроля — оптических систем спектрального контроля [32] или квадрупольных масс-спектрометров [29].

Уменьшение "отравления" мишени и, как следствие, увеличение стабильности существования разряда может достигаться разделением зон распыления и химического взаимодействия. Для этого MSS отделяют от подложки перфорированным экраном для выхода распыленных атомов, а использование схемы с дифференцированной подачей газа: Ar — в зону MSS, а реактивного газа — в область подложки, позволяет расширить диапазон режимов воспроизводимого нанесения [2].

Проблемой для эффективного формирования плотных бездефектных диэлектрических покрытий (особенно оксидов) является возникновение микродуг на мишени. Поврежденный участок мишени может служить источником для возникновения дополнительного дугообразования, и в результате этот процесс может носить лавинообразный характер (например, это характерно при формировании пленок оксида алюминия [11]). В этой связи развивается метод импульсного магнетронного распыления — *pulsed magnetron sputtering* (PMS) [11, 31, 33], в котором импульсный разряд постоянного тока с частотой 10–250 кГц препятствует образованию дуг и стабилизирует процесс реактивного распыления. При этом мишень распыляется в течение длительности импульса, который выбирается меньше времени, необходимого для образования пробоя и развития дуги. При отсутствии отрицательного напряжения скопившийся заряд на поверхности оксидной пленки компенсируется за счет притока электронов из разряда.

Имеются две разновидности импульсного питания магнетронов в режимах PMS: униполярное импульсное питание, когда напряжение на мишени изменяется от рабочего напряжения до нуля, и биполярное импульсное распыление, когда напряжение на мишени реверсируется и становится положительным в течение периода отсутствия рабочего отрицательного напряжения [31]. Благодаря высокой подвижности электронов, для предотвращения образования микродуг обычно достаточно положительного импульса длительностью 10–20% от периода. Допустимая частота следования импульсов служит функцией реактивности распыляемого материала. Для нанесения TiO_2 пленок методом PMS достаточная частота составляет 30 кГц, в то время как для нанесения Al_2O_3 исчезновение микродуг наблюдалось при частоте более 70 кГц. Уровень положительного напряжения не оказывает влияния на вероятность дугообразования, однако увеличение положительного напряжения от 10 до 20% от рабочего приводило к повышению скорости осаждения почти на 50%, что обуславливается улучшением отчистки мишени в течение реверсирования напряжения [11].

Симметричное биполярное импульсное напряжение применяется в двухкатодных магнетронных системах. В этом случае два магнетрона подключаются в противофазе, и в любой момент времени одна мишень является анодом, а вторая — катодом. По окончании рабочего импульса катод свободен от оксидов, а при смене полярности напряжения выступает в роли эффективного анода, что позволяет избежать проблемы исчезновения анода, когда все поверхности в камере покрываются слоем диэлектрика [31].

Применение метода PMS в сочетании с контролем давления реактивного газа дает возможность воспроизводимо наносить плотные оксидные пленки со скоростями, соизмеримыми с процессами формирования металлических слоев [11], что предопределило масштабное промышленное использование в процессах нанесения пленок и многослойных структур оксидов Al, Ti, Zr, Cr, Si, Y, Ta и др. Возможность поддержания на заданном уровне стехиометрических параметров при условии контроля толщины позволяет формировать на подложках большой площади структуры с воспроизводимыми оптическими характеристиками [2, 11, 34].

Заключение

Анализ гомогенных и гетерогенных процессов, происходящих в объеме разряда и на поверхности обработки, позволяет выделить основные направления развития методов магнетронного нанесения тонкопленочных слоев. Наряду с понижением рабочего давления представляется перспективным использование двуразрядных систем, а также управление параметром E/p непосредственно в зоне обработки, что может обеспечиваться несамостоятельным "вторичным" разрядом, поддерживаемым за счет основного. Условием существования вторичного разряда в отсутствие дополнительных внешних источников напряжений является наличие объемного или поверхностного заряда в результате направленного ухода ионных или электронных потоков из основной разрядной области. При этом эффективным инструментом, управляющим направлением приоритетного дрейфа электронов в зоне "мишень-подложка", может быть магнитное поле. Преимущественный дрейф электронов из разряда вдоль магнитных силовых линий может приводить к возникновению поля поляризации и формированию сонаправленных низкоэнергетических потоков ионов вследствие амбиполярной диффузии. Использование несамостоятельного вторичного разряда, с одной стороны, увеличивает концентрацию электронов непосредственно в зоне обработки, что благоприятствует управлению соотношением ион/радикал/атом на поверхности конденсации и способствует химическим превращениям, а с другой стороны, обеспечивает бомбардировку низкоэнергетическими ионами из основного разряда в отсутствие смещения подложки.

DIRECTIONS OF MAGNETRON SPUTTERING SYSTEMS DEVELOPMENTS

I.V. SVADKOVSKI

Abstract

The aspects of functioning direct current magnetron sputtering systems have been investigated. Perspective directions of developing magnetron sputtering methods, including low-pressure sputtering, unbalanced magnetron sputtering and many cathodes sputtering have been defined. Also it have been investigated problems of components coating deposition using chemically active plasma and promising technologically methods reactive magnetron sputtering.

Литература

1. *Musil J.* // *Vacuum*. 1998. Vol. 50, № 3–4. P. 363–372.
2. *Свадковский И.В.* Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / Под ред. А.П. Достанко. Минск, 2002.
3. *Раїзер Ю.П.* Физика газового разряда. М., 1987.
4. *Rosnagel S.M., Kaufmann H.R.* // *J.Vac.Sci. Technol.* 1986. A 4/3, Mai/Jun. P. 1822–1833.
5. *Seino T., Sato T., Kamei M.* // *Vacuum*. 2000. Vol. 59. P. 431–436.
6. *Shidoji E., Ness K., Makabe T.* // *Vacuum*. 2001. Vol. 60. P. 299–306.
7. *Данилин Б.С.* Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М., 1989.
8. *Bradley J.W., Cecconello M.* // *Vacuum*. 1998. Vol. 49. P. 315–329.
9. *Ido S., Nakamuta K.* // *Jap. J. Appl. Phys.* 1993. Vol. 32, № 5A. P. 2112–2115.
10. *Ai R., Wasa K., Ichikawa Y.* // *Vacuum*. 2000. Vol. 59. P. 466–471.
11. *Kelly P.J., Arnell R.D.* // *Vacuum*. 2000. Vol. 56. P. 159–172.
12. *Kelly P.J., Arnell R.D.* // *Surf and Coat Technol.* 1998, Vol. 108–109. P. 317–322.
13. *Špatenka P., Leipner I., Vlček J., Musil J.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1997. Vol. 6. P. 46–52.
14. *Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M.* // *Vacuum*. 2002. Vol. 68, № 4. P. 283–290.
15. *Yonesu A., Watashi S., Yoshimi M., Yamashiro Y.* // *Vacuum*. 2006. Vol. 80. P. 671–674.
16. *Kadlec S., Musil J.* // *Vacuum*. 1996. Vol. 47. P. 299–311.
17. *Window B., Savvides N.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1986. Vol. 4, № 3(I). P. 453–507.
18. *Kelly P.J., O'Brien J., Arnell R.D.* // *Vacuum*. 2004. Vol. 74 P. 1–10.
19. *Iseki T.* // *Vacuum*. 2006. Vol. 80. P. 662–666.
20. *Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M.* // NEET' 2001 (New electrical and electronic technologies and their industrial implementation) II Int. symposium. Kazimierz Dolny, Poland, February, 14–17, 2001. P. 217–221.
21. *Голосов Д.А., Свадковский И.В., Завадский С.М.* // Электронная обработка материалов. 2002. № 6. С. 66–74.
22. *Arnell R.D., Kelly P.J.* // *Surface and Coating Technology*. 1999. Vol. 112. P. 170–176.
23. *Engstöm C., Berling T.* // *Vacuum*. 2000. Vol. 56. P. 107–113.
24. *Fox V., Jones A., Renevier N.M., Teer D.G.* // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 125. P. 347–353.
25. *Su Y.-L., Su C.-T., Yao S.-H., et al.* // *Vacuum*. 2006. Vol. 80. P. 1021–1031.
26. *Martin P.J., Netterfield R.P.* Optical films produced by ion-based techniques / *Progress in Optics XXIII*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 1986. P. 113–182.
27. *Pulker H.K.* // *Photonic Spectra*. 1990. P.100-104.
28. *Bunshah R.F.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1990. Vol. 18, № 6. P. 946–954.
29. *Sproul W.D., Rudnik P.J.* // *Surface and Coatings Technology*. 1989. Vol. 39/40. P. 499–506.
30. *Pekker L.* // *Thin Solid Films*. 1998. Vol. 312. P. 341–347.
31. *Sproul W.D.* // *Vacuum*. 1998. Vol. 51, № 4. P. 641–646.
32. *Бурмаков А.П., Балясников А.А., Зайков В.А., и др.* // Вакуумная техника и технология. 1994. Т. 4, № 2. С. 14–16.
33. *Kanai N., Nuida T., Ueta K., et al.* // *Vacuum*. 2004. Vol. 74. P. 723–727.
34. *Strumpf J., Beister G., Schutze D., et al.* // Presentation on the 40 th Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters. 1997. P. 1–10.