

УДК 533.9.924+621.793.18

**СКВОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ
ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ**

*канд. техн. наук Д.А. ГОЛОСОВ, канд. техн. наук С.М. ЗАВАДСКИЙ, С.Н. МЕЛЬНИКОВ
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Центр 10.1), Минск)*

Представлены разработанные методики для моделирования процессов магнетронного распыления. Показаны два этапа процесса моделирования: расчет профиля эрозии мишени; формирование профиля толщины тонкопленочных слоев для различных форм зон распыления и систем перемещения подложек (неподвижные подложка и магнетрон; линейное перемещение подложек; нанесение с барабанными вращающимися подложкодержателями при расположении магнетрона снаружи или внутри барабана). Анализ результатов моделирования свидетельствует о том, что погрешность моделей не превышает 10 %. Модели для формирования покрытия могут использоваться только для моделирования процессов магнетронного нанесения слоев при рабочем давлении в зоне нанесения не более 1 Па, так как не учитывают эффекты термализации распыленного потока.

Введение. В настоящее время магнетронное распыление заняло лидирующее положение среди всех других вакуумных методов получения тонкопленочных структур, продолжая совершенствоваться и развиваться. При этом требования заказчика к распылительным системам и процессам магнетронного распыления все более возрастают. Примерами таких требований заказчика являются: высокая равномерность толщины наносимой тонкой пленки; высокий коэффициент использования материала мишени; увеличивающийся размер подложек; высокая скорость нанесения слоев при реактивном магнетронном распылении с равномерным химическим составом по подложке; возможность нанесения тонких пленок на объемные детали с высокой равномерностью толщины. В прошлом магнетронные распылительные системы и технологии с их использованием разрабатывались и оптимизировались эмпирически только методом постепенного приближения (проб и ошибок), используя экспериментальный опыт, что требует значительных временных затрат и материальных ресурсов. Поэтому встал вопрос о разработке методов компьютерного моделирования магнетронных распылительных систем и процессов магнетронного распыления. Компьютерное моделирование позволяет уменьшить стоимость и время доводки ионно-плазменного оборудования и во многих случаях является единственным способом выбора оптимального решения.

Таким образом, целью работы была разработка относительно простой методики сквозного моделирования магнетронных систем от прогнозирования зоны эрозии магнетрона до формирования покрытия на подложке, которая бы оперировала реальными параметрами процесса и позволяла с достаточной для практического применения точностью производить расчет без использования мощных компьютерных ресурсов.

Математическое описание образования зоны эрозии мишени. При ионной бомбардировке скорость распыления материала мишени по толщине рассчитывается по формуле

$$v(r_1) = \langle Y(r_1) \rangle \frac{j_i(r_1) A_m}{N_a e \rho}, \tag{1}$$

где A_m – атомная масса распыляемого материала; ρ – плотность материала; $j_i(r_1)$ – плотность ионного тока на поверхности мишени на расстоянии r_1 от оси магнетрона; $\langle Y(r) \rangle$ – средняя по энергетическому спектру величина коэффициента распыления материала мишени (эффективный коэффициент распыления); N_a – число Авогадро; e – заряд электрона.

Исходя из формулы (1) скорость распыления материала мишени по толщине при прочих равных условиях зависит только от уровня ионной бомбардировки (плотности ионного тока) определенного участка мишени МРС, т.е. глубина эрозии мишени $h(r)$ на радиусе r_1 прямо пропорциональна произведению величины плотности тока разряда $j_i(r)$ на среднюю по энергетическому спектру величину коэффициента распыления материала мишени $\langle Y(r) \rangle$:

$$h(r_1) \propto j_i(r_1) \langle Y(r) \rangle. \tag{2}$$

Определим эффективный коэффициент распыления как

$$\langle Y(r_1) \rangle = \int_0^{U_i} f_i(U, r_1) Y(U) dU, \tag{3}$$

где $Y(U)$ – табличное значение коэффициента распыления материала мишени, зависящее от энергии ионов; $f_i(U, r)$ – функция распределения ионов по энергиям на уровне катода.

Функция распределения ионов по энергиям имеет сильную зависимость от напряжения разряда. Однако для большинства распыляемых материалов напряжение разряда изменяется в небольших пределах и составляет 350...500 В. Таким образом, для упрощения модели можно говорить, что функция распределения ионов по энергиям на уровне катода, а следовательно, и эффективный коэффициент распыления слабо зависят от координаты точки распыления и напряжения разряда.

На основе представленных выше выражений можно сделать вывод, что для определения профиля выработки и коэффициента использования материала мишени достаточно знать распределение плотности тока бомбардирующих мишень ионов, а для расчета полного времени работы мишени необходимо учитывать и эффективный коэффициент распыления.

Распределение плотности ионного тока на поверхности мишени может быть получено путем интегрирования актов ионизации во всем объеме плазмы:

$$j_i(r) = \int_0^{z^*} n_e(r, z) v_i(r, z) dz, \quad (4)$$

где n_e – плотность ионизирующих электронов; v_i – частота ионизации; z^* – граница плазмы. Средняя частота ионизации, определяющаяся функцией распределения электронов по энергиям:

$$v_i = n_a \langle \sigma_i v_e \rangle. \quad (5)$$

Здесь n_a – концентрация атомов или молекул рабочего газа; σ_i – сечение ионизации при столкновении электронов с атомами; v_e – скорость электронов [1].

Представим среднюю скорость электронов как сумму движений вдоль линий электрического поля $v_{||}$ (продольная составляющая) и перпендикулярно электрическому и магнитному полю v_{\perp} (поперечная составляющая, так называемый холловский ток):

$$\langle v_e \rangle^2 = \langle v_{||} \rangle^2 + \langle v_{\perp} \rangle^2. \quad (6)$$

Продольная составляющая

$$v_{||} = \frac{eE_z}{m_e} t \quad (7)$$

представляет собой колебательное движение электронов со скоростью от нуля (в нижней точке циклоиды) до $2v_{||}$ (в верхней точке циклоиды), зависит только от напряженности электрического поля и практически ее значение постоянно во всем объеме плазмы. Скорость дрейфа электронов в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям, определяется выражением

$$v_{\perp} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}, \quad (8)$$

где \mathbf{E} и \mathbf{B} – векторы напряженности электрического и индукции магнитного полей. Если предположить, что напряженность электрического поля не зависит от положения на мишени, можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим концентрацию актов ионизации в разряде магнетрона, является величина и направление вектора магнитной индукции над поверхностью мишени, что было подтверждено экспериментально [2].

Поскольку исходя из формул (5) – (8) электрическое поле практически не зависит от текущего радиуса, можно сделать вывод, что концентрация актов ионизации в каждой точке объема плазмы пропорциональна отношению величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля (B_r) к квадрату индукции магнитного поля:

$$v_i(r, z) \propto \frac{B_r(r, z)}{B^2(r, z)}. \quad (9)$$

Ионизация рабочего газа в основном происходит в области скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полей, где вектор магнитной индукции практически перпендикулярен вектору напряженности электрического поля и индукция магнитного поля имеет величину не ниже определенного значения.

Для определения зоны ионизации атомов рабочего газа необходимо установить критерии границ зоны. Нижняя граница зоны ионизации определяется толщиной зоны катодного падения потенциала (темного катодного пространства – ТКП). В стационарном режиме работы магнетронной распылительной системы около катода образуется слой положительного пространственного заряда, на котором падает большая часть разрядного напряжения. В темном катодном пространстве происходит разгон электро-

нов. Поскольку сечение ионизации электронным ударом снижается при большой энергии ионов, в этой зоне практически отсутствуют акты ионизации. Толщину ТКП можно оценить исходя из соотношения

$$d_{sh}^2 = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2e}{m_i} \right)^{1/2} \frac{(U_{pl} - U_i)^{3/2}}{j_i}, \tag{10}$$

где $j_i(r)$ – локальная плотность ионного тока; m_i – масса иона; ϵ_0 – электрическая проницаемость вакуума; U_i – напряжение разряда; U_{pl} – потенциала плазмы.

Расчеты показывают, что для большинства МРС толщина ТКП в зависимости от конфигурации магнетрона и плотности ионного тока составляет 1...5 мм, что составляет 5...7 % плазменной оболочки. Ионизация происходит за пределами катодного слоя, в плазме отрицательного свечения. В этой области электрическое поле очень слабое и оно практически не влияет на движение высокоэнергетичных катодных электронов и обеспечивает только сбор анодом низкоэнергетичных плазменных электронов для замыкания электрической цепи. Верхняя и боковые границы плазмы определяются способностью магнитной ловушки удерживать электроны. На некотором расстоянии от магнитной системы магнетрона напряженность магнитного поля ловушки ниже некоторой критической величины, при которой радиус циклотронного движения электрона превышает расстояние до подложки. В этом случае электроны не будут возвращаться обратно в зону ловушки и попадут на анод. Исходя из проведенных расчетов, можно предположить, что верхняя граница плазмы ограничивается величиной продольной составляющей индукции магнитного поля (B_r) порядка 0,02 Тл. Поэтому при расчетах в качестве граничных условий принято: $Z_{min} = Z_{ТКП}$ – нижняя граница зоны плазмообразования; $Z_{max}(r) = Z(r)$, где ($B_r \leq 0,02$ Тл) – верхняя и боковые границы зоны плазмообразования.

Для использования предложенного метода необходим предварительный расчет конфигурации магнитных полей. Распределение индукции магнитного поля и ее горизонтальной составляющей над поверхностью мишени определялось с помощью программного комплекса ELCUT (Quick Field) [3], особенностью которого является возможность использования ресурсов и результатов внешних подключаемых модулей (технология ActiveField). Данная технология включает набор объектов для решения и анализа задач моделирования магнитных полей. Для формирования матриц выходных данных и анализа результатов разработано программное средство *TargProf*, которое использует технологию ActiveField. При этом объекты ELCUT обеспечивают постановку новой задачи, описание ее геометрической модели, построение сетки конечных элементов, ее решение. Разработанная программа с использованием технологии ActiveField обеспечивает создание матриц индукции магнитного поля $B(r, z)$ и горизонтальной составляющей индукции магнитного поля $B_r(r, z)$. В полученной матрице B_r с учетом представленных выше граничных условий выделялась зона ионизации рабочего газа, для каждой точки пространства, по формуле (9) рассчитывалась относительная частота ионизации и создавалась матрица выходных результатов. На последнем этапе для построения профиля зоны эрозии мишени производилось интегрирование столбцов матрицы относительной частоты ионизации и нормирование полученного профиля.

На рисунке 1 представлены результаты моделирования с использованием программного средства *TargProf* зоны эрозии протяженного магнетрона МСПР-616 с размером мишени 610×100 мм и магнитной системой на феррит-стронциевых постоянных магнитах марки 28СА260. Полученный в результате моделирования профиль зоны эрозии мишени с погрешностью, не превышающей 16 %, соответствует экспериментальным измерениям.

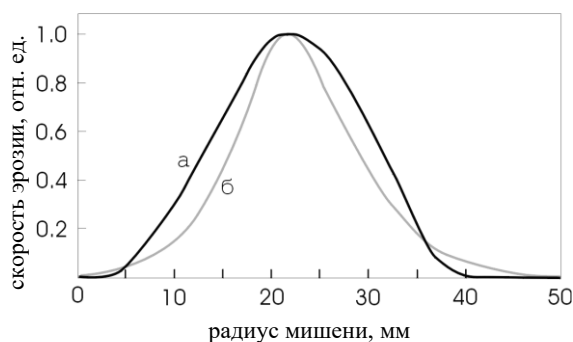


Рис. 1. Профили зоны эрозии мишени магнетрона МСПР-830, полученные в результате моделирования (а) и экспериментальных измерений (б)

Полученная в результате моделирования аппроксимационная кривая зоны эрозии мишени использовалась для формирования кривой распределения плотности тока разряда при расчете скорости нанесе-

ния слоев методом магнетронного распыления. При этом предполагалось, что плотность тока разряда пропорциональна скорости распыления мишени (формула (2)) и плотность ионного тока связана с плотностью тока разряда следующим соотношением:

$$j_i(r_1) = \frac{j_r(r_1)}{1 + \gamma_i}, \quad (11)$$

где γ_i – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала мишени.

При этом функция распределения плотности тока разряда должна удовлетворять соотношению

$$\int_{-\infty}^{\infty} j_r(r_1) dr_1 = I_r, \quad (12)$$

где I_r – ток разряда магнетрона.

Для определения скорости нанесения тонкопленочных слоев при магнетронном распылении использовался метод интегрирования распыленного потока с каждой точки зоны распыления. Рассмотрим особенности геометрической схемы модели системы магнетронного распыления (рис. 2).

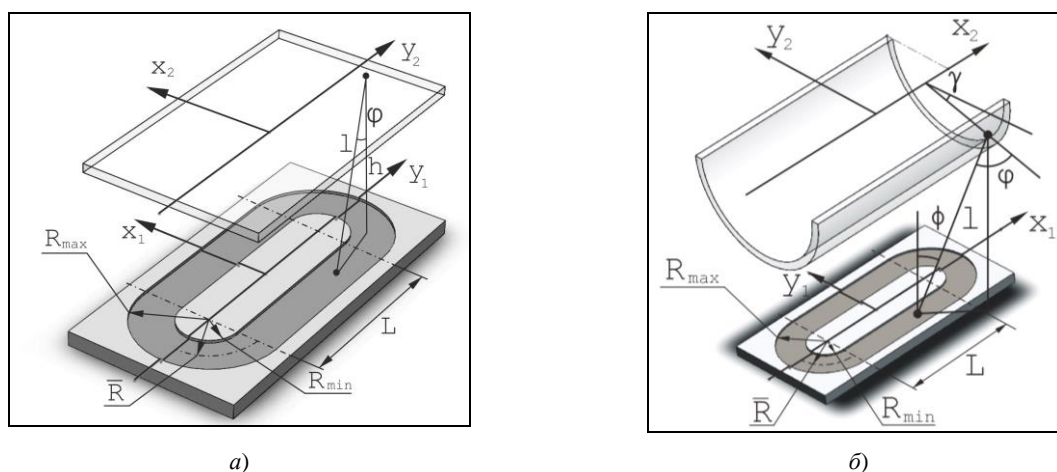


Рис. 2. Геометрические схемы модели системы магнетронного распыления:
 а – магнетрон с протяженной зоной распыления – плоский подложкодержатель;
 б – магнетрон с протяженной зоной распыления – барабанный подложкодержатель

Анализ процессов нанесения тонких пленок методом магнетронного распыления показывает, что определяющее влияние на скорость нанесения и распределение толщины нанесенных слоев оказывает механизм переноса распыленного вещества к поверхности конденсации [4]. Механизм переноса определяется протяженностью зоны термализации, т.е. расстоянием от точки распыления до точки, в которой распыленные атомы в результате потери энергии при столкновении с атомами рабочего газа достигают термодинамического равновесия с рабочим газом. Оценка протяженности зоны термализации была проведена на основе модели парных соударений в приближении жестких сфер [5]. При этом предполагалось, что распыленный материал мишени представлен преимущественно нейтральными атомами, концентрация распыленных атомов на несколько порядков ниже концентрации атомов рабочего газа Ar. Начальная энергия распыленных атомов E_a по порядку величины совпадает с поверхностной энергией связи и составляет 2...10 эВ [6; 7].

Согласно данной модели протяженность зоны термализации может быть определена как

$$R_T = N\lambda, \quad (13)$$

где λ – средняя длина свободного пробега распыленного атома в среде атомов Ar; N – среднее количество столкновений распыленных атомов с атомами Ar, при которых распыленные атомы теряют энергию и достигают термодинамического равновесия с рабочим газом:

$$N = \frac{\ln\left(\frac{E_g}{E_a}\right)}{\ln(1-\beta)}. \quad (14)$$

В формуле (14) E_a – средняя кинетическая энергия распыленных атомов; $E_g = 3/2kT$ – энергия теплового движения атомов рабочего газа; β – средняя относительная доля энергии, теряемая при упругом соударении частиц с массами M_a и M_g :

$$\beta = 2 \frac{M_a M_g}{(M_a + M_g)^2}. \quad (15)$$

Средняя длина свободного пробега распыленного атома рассчитывается по формуле

$$\lambda = \left(\sigma n \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\langle v_a \rangle}{\langle v_g \rangle} \right)^2} \right] \right)^{-1}, \quad (16)$$

где $\sigma = \pi(R_a + R_g)^2$ – эффективное газокинетическое поперечное сечение столкновений (полное микроскопическое сечение упругого рассеяния частиц) с радиусами R_a и R_g ; n – плотность атомов рабочего газа $n = p/kT$ (p – давление рабочего газа); $\langle v \rangle$ – средняя скорость атомов.

Рассчитанные на основе данной модели зависимости протяженности зоны термализации для атомов Al, Ti, W со средней кинетической энергией 5 эВ от давления рабочего газа Ar показали, что при давлениях менее 1,0 Па протяженность зоны термализации превышает расстояние мишень – подложка и наблюдается пролетный механизм переноса материала мишени [8]. Таким образом, модель разработана для случая магнетронного распыления при давлениях в камере менее 1,0 Па.

При построении модели были сделаны следующие допущения: (I) распыленные атомы имеют направленное движение и распространяются в пространстве по закону косинуса; (II) распыленные атомы не сталкиваются друг с другом и с атомами рабочего газа (т.е. отсутствует эффект термализации распыленного потока); (III) распыленные атомы конденсируются в точке соударения с подложкой и коэффициент прилипания распыленных частиц к подложке равен 1,0.

Для определения скорости нанесения тонкопленочных слоев на подложке использовался метод интегрирования распыленного потока с каждой точки зоны распыления. Как видно из рисунка 2, зону распыления в протяженных МРС можно разделить на четыре участка: два закругленных и два прямолинейных. При этом скорость нанесения в точке подложки с координатами (x_2, y_2) , расположенной на расстоянии l от точки распыления МРС с протяженной зоной распыления, может быть рассчитана как сумма скоростей нанесения из прямолинейных и закругленных участков зоны распыления:

$$V(x_2, y_2) = V_1(x_2, y_2) + V_2(x_2, y_2) + V_3(x_2, y_2) + V_4(x_2, y_2), \quad (17)$$

где $V_1(x_2, y_2)$, $V_2(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени; $V_3(x_2, y_2)$, $V_4(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с прямолинейных участков зоны распыления мишени.

Скорость нанесения пленки из участка закругления зоны распыления

$$V_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{r_1 v_r(r_1) \cos \varphi(r_1, \theta) \cos^n \phi(r_1, \theta)}{l^2(r_1, \theta)} dr_1 d\theta, \quad (18)$$

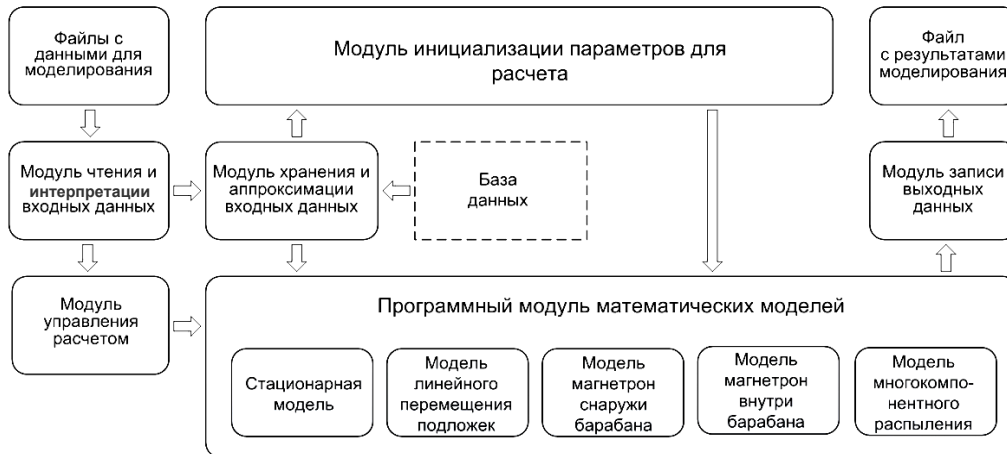
где R_{min} , R_{max} – минимальный и максимальный радиусы зоны эрозии мишени; $v_r(r_1)$ – скорость распыления материала мишени на радиусе r_1 ; l – расстояние от точки распыления до точки конденсации, ϕ – угол распыления; φ – угол конденсации; θ – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона; n – показатель степени косинуса угла распыления.

Для протяженных участков зоны распыления формула имеет вид

$$V_3(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{v_r(x_1) \cos \varphi(x_1, y_1) \cos^n \phi(x_1, y_1)}{l^2(x_1, y_1)} dx_1 dy_1, \quad (19)$$

где L – длина прямолинейного участка зоны распыления мишени; (x_1, y_1) – координаты текущей точки распыления.

Для решения задачи расчета распределения скорости нанесения покрытия разработан программный комплекс *Deposition* (рис. 3), который позволяет рассчитать скорость нанесения слоев в любой точке подложки для аксиальных и протяженных магнетронных распылительных систем, толщину наносимых слоев для различных форм зон распыления и систем перемещения подложек.

Рис. 3. Структура программного комплекса *Deposition*

Комплекс включает в себя разработанные математические модели следующих вариантов процесса нанесения: для расчета профиля толщины тонкопленочных слоев при магнетронном нанесении на рулонные полимерные материалы при линейном перемещении подложки (рис. 4); при магнетронном нанесении на подложки, расположенные на вращающемся барабанном подложкодержателе (рис. 5) для двух конфигураций процесса: I – магнетрон располагается снаружи вращающегося барабанного подложкодержателя; II – магнетрон располагается внутри вращающегося барабанного подложкодержателя.

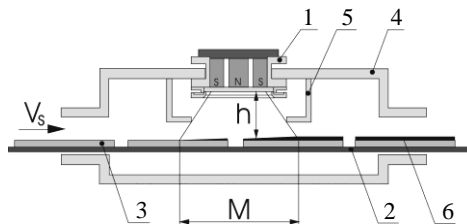


Рис. 4. Схема установки магнетронного нанесения на рулонные материалы и крупноформатные стеклянные подложки конвейерного типа:

1 – магнетронная распылительная система; 2 – системы перемещения подложки (пленки); 3 – подложка; 4 – камера; 5 – конструктивные элементы, ограничивающие зону нанесения; 6 – нанесенная пленка

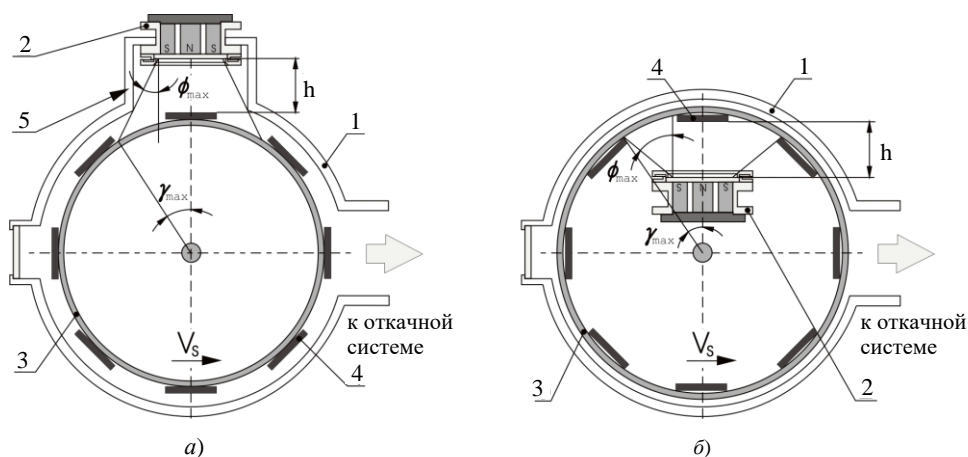


Рис. 5. Конфигурации процесса магнетронного нанесения тонкопленочных слоев на барабанный подложкодержатель:

а – внешнее расположение магнетрона относительно подложкодержателя (конфигурация I);
б – магнетрон расположен внутри подложкодержателя (конфигурация II)

Для верификации моделей проведены экспериментальные исследования по нанесению тонкопленочных слоев методом магнетронного распыления. В случае нанесения слоев на внутреннюю поверх-

ность барабанного подложкодержателя применена магнетронная распылительная система протяженного типа МСПР-616 [9; 10]. Для распыления использовалась мишень из Al (чистота 99,996 %) размером 616×100×10 мм. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления $2,0 \cdot 10^{-3}$ Па. Предварительно производилась очистка подложек с помощью протяженного ионного источника на основе ускорителя с анодным слоем [9; 10]. После этого производилась очистка поверхности мишени путем ее распыления на заслонку. Рабочий газ Ar подавался в область разряда магнетрона. Расход рабочего газа составлял 65 мл/мин. В процессе очистки мишени параметры процесса были постоянными и составляли: ток разряда $I_t = 5,7$ А; напряжение разряда $U_t = 380$ В; время распыления мишени 5 мин.

Тонкопленочные слои наносились на стеклянные подложки размером 700×50 мм, которые располагались на внутренней поверхности барабанного подложкодержателя $\varnothing 360$ мм. Подложкодержатель перемещался со скоростью 1,5 об/мин на минимальном расстоянии 80 мм от поверхности мишени магнетрона. Поток Ar в камеру $Q_{Ar} = 40$ мл/мин, при этом давление в камере составляло $p = 5,2 \cdot 10^{-2}$ Па. Нанесение слоев осуществлялось при двух различных режимах: мощность разряда МРС поддерживалась постоянной и составляла $P_t = 2,0$ кВт, время нанесения 10 мин. При этом напряжение и ток разряда составляли $U_t = 380$ В, $I_t = 5,7$ А соответственно; мощность разряда МРС поддерживалась постоянной и составляла $P_t = 1,0$ кВт. При этом напряжение $U_t = 320$ В, ток разряда $I_t = 3,1$ А. Время нанесения 12 мин.

Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08.

На рисунке 6 представлены результаты измерения распределения толщины пленок Al, полученных при двух различных режимах нанесения: ток разряда $I_t = 5,7$ А, время нанесения $t = 10$ мин (точки а и б); $I_t = 3,1$ А, $t = 12$ мин (точки в). Для сравнения на том же рисунке представлены результаты моделирования распределения толщины слоя Al, нанесенного методом магнетронного распыления на внутреннюю поверхность барабанного подложкодержателя (кривые г, д). Для расчета использовались следующие исходные данные: материал мишени – Al ($Y_{Al} = 0,35$; $\gamma_{Al} = 0,01$; $A_{Al} = 27$ а. е. м; $\rho_{Al} = 2700$ кг/м³). Минимальный, средний и максимальный радиусы зоны эрозии мишени принимались равными соответственно $R_{min} = 4$ мм, $\bar{R} = 22,5$ мм, $R_{max} = 44$ мм, длина прямолинейного участка зоны распыления $L = 514$ мм. Расстояние мишень – подложка составляло 80 мм.

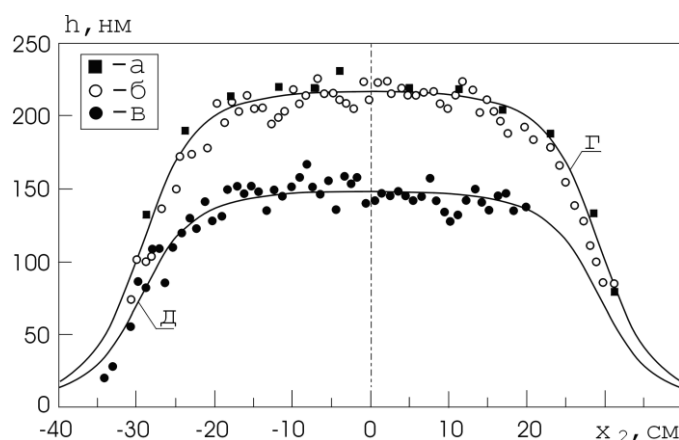


Рис. 6. Профили распределения толщины тонкопленочных слоев, нанесенных методом магнетронного распыления на внутреннюю поверхность барабанного подложкодержателя:
 а, б – измеренные распределения толщины пленки Al ($I_t = 5,7$ А, $t = 10$ мин);
 в – измеренные распределения толщины пленки Al ($I_t = 3,1$ А, $t = 12$ мин);
 г, д – результаты моделирования распределения толщины пленки Al для соответствующих режимов нанесения

Как видно, и для II конфигурации процесса результаты моделирования практически совпадают с полученными экспериментальными профилями. Погрешность модели для данной конфигурации процесса не превышала 10 %. На практике наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов и для других параметров процесса нанесения.

Также проведена верификация моделей для других конфигураций процесса. Получены профили распределения толщины нанесенных слоев при магнетронном нанесении тонкопленочных слоев на ПЭТ-пленку шириной 500 мм при линейном перемещении пленки; слоев Al и W, нанесенных на внешнюю поверхность барабанного подложкодержателя. Анализ результатов моделирования показал, что погрешность расчетов по всем предложенным моделям также не превышает 10,0 %.

Заключение. Для проектирования систем и процессов магнетронного распыления разработаны методы компьютерного моделирования, которые позволяют проводить сквозное моделирование магнетронного нанесения от этапа создания магнитной системы магнетрона до формирования покрытия на поверхности подложки. Методика прогнозирования эрозии мишени основана на определении зоны эффективной ионизации атомов рабочего газа, примерной концентрации заряженных части и допущении, что концентрация актов ионизации в каждой точке объема плазмы пропорциональна отношению величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля к квадрату индукции. Модели расчета распределения толщины тонкопленочных слоев основаны на интегрировании распыленного потока с каждой точки зоны распыления. Анализ результатов моделирования показывает, что погрешность моделей не превышает 10 %. Поскольку модели для формирования покрытия не учитывают эффекты термализации распыленного потока, то они могут использоваться только для моделирования процессов магнетронного нанесения слоев при рабочем давлении в зоне нанесения не более 1,0 Па.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда: учеб. рук. / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
2. Рогов, А.В. Исследование магнетронного разряда постоянного тока методом подвижного сеточного зонда / А.В. Рогов, И.Ю. Бурмакинский // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, № 4. – С. 27 – 30.
3. ELCUT программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tor.ru/elcut/>
4. Знаменский, А.Г. Магнетронное напыление при повышенных давлениях: процессы в газовой среде / А.Г. Знаменский, В.А. Марченко // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68, № 7. – С. 24 – 32.
5. Ласка В.Л., Митрофанов А.П., Карманенко С.Ф. // Электронная техника. Сер. Электривакуумные и газоразрядные приборы. – 1985. – Вып. 1, № 106. – С. 101.
6. Meyer, K. Thermalization of sputtered atoms / K. Meyer, I. Schuller, C. Falco // J. Appl. Phys. – 1981. – Vol. 52, № 9. – P. 5803 – 5805.
7. Бешенков, В.Г. Импульсы частиц, эмитированных мишенью при интенсивном облучении низкоэнергетичными ионами / В.Г. Бешенков, А.Б. Григорьев, В.А. Марченко // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 5. – С. 108 – 114.
8. Касинский, Н.К. Формирование заданного распределения толщины тонких пленок вакуумными методами осаждения / Н.К. Касинский, В.С. Томаль, В.Н. Ивахненко // Вакуумная техника и технология. – 2002. – Т. 12, № 4 – С. 197 – 204.
9. Ионно-плазменная система для нанесения многослойных структур методом реактивного ионно-лучевого и магнетронного распыления / Д.А. Голосов [и др.] // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20, № 4. – С. 227 – 234.
10. Установка для нанесения многослойных тонкопленочных покрытий на внутреннюю поверхность крупноформатных цилиндрических объектов ионно-плазменными методами: пат. 2737 Респ. Беларусь, МПК7 С 23С 14/00 / А.П. Достанко, И.В. Свадковский, Д.А. Голосов, С.М. Завадский; заявитель БГУИР. – № u 20050503; заявл. 17.08.05; опубли. 15.02.06. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – 6 с.

Поступила 27.02.2013

END-TO-END MODELLING OF THE PROCESSES OF APPLICATION OF COATINGS AT MAGNETRON DISPENSING

D. GOLOSOV, S. ZAVADSKY, S. MELNIKOV

Methods of modeling of processes of magnetron dispensing are presented. Two stages of modeling process are shown: calculation of the profile of target erosion; formation of the profile of thickness of thin-film layers for various forms of dispensing areas and systems of base displacement (immobile bases and magnetron; linear displacement of bases; application with drum rotatory substrate holders when magnetron is situated inside or outside a drum). The analysis of the results of modeling indicate, that model errors don't exceed 10 %. Models for coating formation can be used only for modeling of the processes of magnetron dispensing at working pressure in the application area not more than 1,0 Pa, for the effects of thermalization of dispensed stream are not taken into account.