_____ ЛАБОРАТОРНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 539.23

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОДЛОЖКИ ПРИ МАГНЕТРОННОМ НАПЫЛЕНИИ РАВНОМЕРНЫХ ПО ТОЛЩИНЕ ПОКРЫТИЙ

© 2019 г. А. В. Рогов*, Ю. В. Капустин

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

> *e-mail: alex-rogov@yandex.ru Поступила в редакцию 19.04.2018 г. После доработки 18.05.2018 г. Принята к публикации 15.08.2018 г.

Для магнетрона с дисковым катодом разработана аналитическая модель напыления на плоскую, смещенную относительно магнетрона, наклонную, вращающуюся подложку. В качестве исходных данных использовались: угловое распределение распыленных атомов, профиль зоны эрозии катода и энергетическая эффективность распыления, измеренные непосредственно на магнетроне, который применялся для проверки результатов расчетов. Это позволило косвенно учесть такие эффекты, как рассеяние и диффузию распыленного материала при его транспортировке до подложки, а также конструктивные особенности магнетрона. Расчет и экспериментальная проверка его точности проводились для Си. Представлены результаты численного анализа наличия положения подложки, оптимального по критерию максимального переноса распыленного материала на подложку. Показано, что существует единственный набор оптимальных параметров позиционирования, соответствующих данному требованию. Проведен сравнительный анализ эффективности массопереноса при наклоне и без наклона подложки. Показано, что наклон обеспечивает значительный (>60% для использованного магнетрона) прирост массопереноса. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологического процесса напыления при повышенных требованиях к равномерности толщины покрытия и для комплексной разработки напылительного оборудования.

DOI: 10.1134/S0032816219010221

введение

Использование магнетронов с дисковым катодом для напыления покрытий с малой неравномерностью толщины затруднено из-за неоднородности потока распыленных атомов [1]. Как было показано в [2], такие покрытия могут быть получены при напылении на смещенную, расположенную параллельно плоскости распыляемого катода магнетрона, вращающуюся подложку. Этот способ размещения является частным случаем позиционирования смещенной относительно магнетрона наклонной вращающейся подложки [3, 4]. При этом как для частного, так и для общего случая актуальны вопросы наличия положения подложки, оптимального по критерию массопереноса распыленного материала, а также оценки преимуществ, которые дает наклон подложки.

Для оценки эффективности процесса напыления удобно использовать коэффициент массопереноса:

$$K_d = \frac{\Delta m_d}{\Delta m_s} \cdot 100\%,\tag{1}$$

где Δm_s , мг — полная масса распыленного с катода магнетрона материала; Δm_d , мг — масса осажденного на подложку материала.

Этот параметр можно увеличить кратно количеству подложек, которые возможно одновременно разместить вокруг магнетрона. Коэффициент массопереноса определяет себестоимость процесса напыления. Наличие оптимума по коэффициенту массопереноса позволило бы минимизировать размеры вакуумной камеры и, следовательно, снизить необходимую производительность откачной системы, а также расход рабочего газа.

Данная работа посвящена исследованию наличия оптимального положения подложки при напылении, разработке алгоритма его расчета, выявлению общих закономерностей при оптимальном позиционировании и сравнению опи-



Рис. 1. Схема размещения подложки (а) и фотография оборудования для магнетронного напыления покрытий (б). I – распыляемый катод магнетрона; 2 – подложка; 3 – привод вращения на основе карданной передачи; α_0 , x_0 и z_0 – соответственно угол наклона и смещение центра подложки вдоль осей Xи Z; ω – угловая скорость вращения подложки; r – расстояние от оси вращения подложки до интересующей точки; R_0 – радиус катода магнетрона.

санных выше способов размещения вращающейся подложки при напылении.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема взаимного размещения магнетрона и подложки, а также фотография использованного оборудования представлены на рис. 1.

Вращение подложки в вакуумной камере осуществлялось с использованием магнитной муфты, установленной на фланце вакуумной камеры. Телескопическая конструкция вала привода вращения *3* обеспечивала возможность изменения длины в осевом направлении при изменении положения подложкодержателя *2*, а карданная передача — возможность наклона подложки. Для позиционирования подложки использовался шаблон.

Эксперименты по напылению проводились на установке с цилиндрической вакуумной камерой



Рис. 2. Карта линий уровня: сплошные линии – для коэффициента неравномерности толщины покрытия K_u , % (значение K_u указано прямым шрифтом), пунктирные – для коэффициента массопереноса K_d , % (значение K_d указано курсивом) – при $R_S = 100$ мм и $z_0 = 110$ мм.

диаметром 380 мм и высотой 240 мм и с турбомолекулярной откачной системой. Рабочий газ – Ar. Образцы взвешивались на аналитических весах CAS CAUW 220D с точностью измерения 10⁻⁵ г.

Для нанесения покрытий использовался планарный магнетрон с дисковым катодом радиусом $R_0 = 12.5$ мм и встроенным изолированным кольцевым анодом. Напуск газа осуществлялся непосредственно в зону распыления. Магнитная система была выполнена из постоянных NdFeBмагнитов (N42). Центральный цилиндрический магнит имел размеры Ø10 × 10 мм, периферийный кольцевой магнит — $\emptyset 25 \times \emptyset 18 \times 5$ мм. Магниты устанавливались на дисковый магнитопровод из стали Ст3 с размерами Ø25 × 10 мм и цилиндрическим вырезом Ø18 × 5 мм. Максимальная толщина распыляемого Си-катода составляла 3 мм. Распыление проводилось в режиме стабилизации мощности разряда, чем обеспечивалось постоянство скорости напыления [5]. Режим магнетронного напыления: давление аргона $P_{\rm Ar} = 3 \cdot 10^{-3}$ Topp, напряжение $U_d = 440$ В, ток $I_d = 0.072$ А.

Коэффициент энергетической эффективности [5] рассчитывался по формуле

$$K_W = \frac{\Delta m_s}{W_d T},\tag{2}$$

где W_d , Вт — мощность разряда; T, мин — время напыления. Для использованного магнетрона для

Си экспериментально определенное значение K_W составило 0.159 мг/(Вт · мин).

Толщина покрытия измерялась на установке рентген-флуоресцентного анализа "Clever B23" [6]. Пересчетные зависимости для перевода интенсивности характеристической линии меди в толщину покрытия были определены путем сравнения с данными, полученными весовым методом измерения толщины (по результатам взвешивания марок до и после напыления).

Толщина покрытия *H*, мм, на расстоянии *r*, мм, от центра подложки рассчитывалась как

$$H(r) = K \int_{0}^{\pi} \int_{-R_0}^{R_0} \int_{-\sqrt{R_0^2 - x^2}}^{\sqrt{R_0^2 - x^2}} \frac{F_1(\xi(r, x, y, \gamma) F_2(\rho(x, y)) \cos(\theta(r, x, y, \gamma)))}{(d(r, x, y, \gamma))^2} dy dx d\gamma.$$
(3)

Здесь

$$K = \frac{K_W W_d T(B+1)(D+1)}{4\pi^2 \rho_0 [A(D+1) - C(B+1) + K_1(D+1)(B+1)] \int F_2(\rho) \rho d\rho},$$
(4)

$$F_{1}(\xi) = A\cos^{B}(\xi) - C\cos^{D}(\xi) + K_{1},$$
(5)

$$\cos(\xi) = \frac{z_0 - r\cos(\gamma)\sin(\alpha_0)}{d},\tag{6}$$

$$\cos(\theta) = \frac{[x - x_0 + r\cos(\gamma)\cos(\alpha_0)]\sin(\alpha_0) + [z_0 - r\cos(\gamma)\sin(\alpha_0)]\cos(\alpha_0)}{d},$$
(7)

$$d = \sqrt{(x - x_0 + r\cos(\gamma)\cos(\alpha_0))^2 + (y - r\sin(\gamma))^2 + (z_0 - r\sin(\alpha_0)\cos(\gamma))^2},$$
(8)

$$F_2(\rho) = \begin{cases} (1 - K_2) \exp\left[-\left(\frac{\rho_{\max} - \rho}{\sigma_1}\right)^{n_1}\right] + K_2 & \text{при} \quad \rho \le \rho_{\max}, \end{cases}$$
(9)

$$\left[\exp\left[-\left(\frac{\rho-\rho_{\max}}{\sigma_2}\right)^{n_2}\right] \quad \Pi p \mu \quad \rho > \rho_{\max},$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2},$$
(10)

где x_0 , мм, z_0 , мм, α_0 , градус — параметры позиционирования подложки (см. рис. 1a); r, мм – расстояние от оси вращения подложки до точки осаждения; *F*₁(ξ) – аппроксимирующая функция для экспериментально измеренной, нормированной на единицу в максимуме зависимости потока распыленных атомов от угла вылета ξ (угловое распределение); A, B, C, D, K_1 – параметры аппрок-симации для Cu; $F_2(\rho)$ – аппроксимирующая функция для экспериментально измеренной, нормированной на единицу в максимуме зависимости глубины эрозии от расстояния до центра распыляемого катода магнетрона ρ, мм (профиль зоны эрозии); σ_1 , σ_2 , n_1 , n_2 , K_2 – параметры аппроксимации; ρ_0 , мг/мм³ – плотность материала катода; р_{тах}, мм – экспериментально измеренное расстояние от центра катода до максимума зоны эрозии; θ, градус – угол осаждения частиц на подложке; d, мм – расстояние от точки распыления (на катоде магнетрона) до точки осаждения (на подложке); ү, градус – параметр позиционирования

точки осаждения на подложке. Подробный вывод формулы (3) представлен в приложении "Аналитическая модель напыления покрытий на вращающуюся подложку" к настоящей публикации.

Параметры аппроксимации экспериментально измеренных профиля зоны эрозии и углового распределения рассчитывались методом обобщенного регрессионного анализа с использованием функции "Genfit" в среде Mathcad. Были получены следующие значения: 1) для углового распределения при распылении Cu: A = 1.131, B = 1.079, C = 0.428, D = 7.818, $K_1 = 0.151$; 2) для профиля зоны эрозии: $\sigma_1 = 2.49$, $n_1 = 1.62$, $\sigma_2 = 1.73$, $n_2 = 1.62$, $\rho_{max} = 6.63$ мм, $K_2 = 0.09$ мм.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДЛОЖКИ

Оптимальное позиционирование подложки определяется выбором таких значений x_0 , z_0 и α_0 ,

при которых неравномерность толщины покрытия соответствует заданной величине и обеспечивается максимальный массоперенос материала с катода на подложку. Под коэффициентом неравномерности покрытия по толщине K_u , %, здесь понимается величина

$$K_u = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}}} \cdot 100\%, \tag{11}$$

где H_{max} , H_{min} , мм — соответственно максимальная и минимальная толщина покрытия.

Коэффициент массопереноса K_d , %, распыленного материала на подложку с учетом выражения (1) можно записать в виде:

$$K_{d} = \frac{2\pi\rho_{0}\int_{0}^{K_{s}}H(r)rdr}{K_{W}W_{d}T} \cdot 100\%,$$
 (12)

где *R*_S, мм – радиус напыляемой подложки.

Для определения взаимосвязи параметров позиционирования подложки с неравномерностью напыляемого покрытия по толщине использовался следующий алгоритм расчета. Задавались радиус подложки R_S и массив исходных значений параметров позиционирования: x₀ (диапазон изменения 0-150 мм с шагом 2.5 мм), z₀ (40-200 мм с шагом 5 мм), α₀ (0°-30° с шагом 0.1°). Для каждой тройки параметров $\{x_0, z_0, \alpha_0\}$ рассчитывались неравномерность покрытия по толщине и коэффициент массопереноса. Для каждого заданного z_0 строились линии уровня для коэффициента неравномерности толщины покрытия и коэффициента массопереноса при варьировании значений α_0 и x_0 . Характерный вид линий при $z_0 = 110$ мм и $R_{\rm S} = 100$ мм представлен на рис. 2.

Согласно рис. 2, для фиксированного значения z_0 при заданной неравномерности покрытия по толщине существует единственная пара значений { x_0 , α_0 } (соответствуют точке перегиба линии уровня K_u на рис. 2), при которых обеспечивается максимальный массоперенос распыленного материала на подложку. Результаты расчета профиля покрытия при таком позиционировании представлены на рис. 3.

Расчет показал, что при таком размещении подложки профиль покрытия имеет максимум, смещенный относительно центра подложки, а толщины покрытия на оси вращения подложки и на ее краю — одинаковы. Было сделано предположение, что это является необходимым (но не до-





Рис. 3. Нормированный профиль толщины покрытия при оптимальном позиционировании подложки ($R_S = 100$ мм). Цифры у кривых — значение неравно-мерности покрытия по толщине K_{μ} .

статочным) условием для оптимального позиционирования подложки.

Исходя из этого предположения, был разработан усовершенствованный алгоритм расчета, обеспечивший значительное сокращение времени счета (с нескольких суток до нескольких часов на использованном оборудовании). Для расчета формировалось множество пар исходных значений $\{x_0, z_0\}$, где $x_0 \in [0, R_S]$ и $z_0 \in [0.5R_S, 1.5R_S]$. Шаг по x_0 и z_0 соответственно составлял: $\Delta x_0 = 2.5$ мм, $\Delta z_0 = 1$ мм. Для каждого элемента этого множества методом последовательных приближений проводился поиск значения угла наклона подложки α_0 , при котором толщины покрытия в центре и на краю подложки были равны.

Таким образом, было сформировано новое множество параметров позиционирования { x_0 , z_0 , α_0 }. Для каждого элемента этого массива проводился расчет коэффициентов K_u и K_d . Далее, для каждого z_0 определялись координаты { x_0 , α_0 }, для которых K_u соответствовало заданному значению. Для этих координат рассчитывался коэффициент массопереноса K_d . Характерный вид зависимостей $K_d(z_0)$, $x_0(z_0)$ и $\alpha_0(z_0)$ при выполнении условия равенства толщины покрытия в центре и на краю подложки с радиусом $R_S = 100$ мм при заданных значениях $K_u = \{5, 7.5, 10, 12.5, 15\%\}$ представлен на рис. 4.

Для каждого K_u из полученных результатов выбиралась точка, соответствующая максимальному значению K_d (соответствует максимуму на рис. 4а). Полученные значения { x_0 , z_0 , α_0 } и являются пара-



Рис. 4. Зависимости: **а** – максимального коэффициента массопереноса K_d , **б** – оптимального значения смещения x_0 (темные точки) и угла наклона α_0 (светлые точки) – от смещения z_0 при радиусе подложки $R_S = 100$ мм. Цифры у кривых – значение неравномерности толщины покрытия K_{μ} .

метрами оптимального позиционирования. На рис. 5 представлены результаты расчета оптимальных параметров для подложек с радиусом $R_s = \{20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 \text{ мм}\}$ и неравномерностей толщины покрытия $K_u = \{5, 7.5, 10, 12.5, 15\%\}$.

Из рис. 5 следует, что зависимости оптимальных параметров позиционирования x_0 и z_0 от R_S при заданном значении неоднородности покрытия по толщине носят линейный характер и проходят через начало координат (центр катода магнетрона), а α_0 не зависит от R_S и является постоянной величиной при заданной неоднородности. Эти закономерности могут быть использованы для дальнейшего усовершенствования расчетного кода.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента массопереноса K_d от неравномерности покрытия по толщине K_u при оптимальном положении подложки.



Рис. 5. Зависимости: **а** – смещения z_0 (темные точки) и x_0 (светлые точки), **б** – угла наклона α_0 – от радиуса подложки R_S при оптимальном позиционировании подложки. Цифры у кривых – значение неравномерности толщины покрытия K_u .

Отметим, что $K_d(K_u)$ не зависит от радиуса подложки R_s .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ И СООТВЕТСТВУЮЩЕГО ЕМУ ПРОФИЛЯ ПОКРЫТИЯ НА СМЕЩЕННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОДЛОЖКЕ

Проверка точности расчета напыления на вращающуюся подложку была проведена для подложки радиусом $R_s = 100$ мм при ее оптимальном позиционировании ($x_0 = 66$ мм, $z_0 = 112$ мм, $\alpha_0 = 19.1^\circ$) путем сравнения с экспериментально измеренным профилем толщины осажденной пленки. При этом заданное значение неравномерности покрытия по толщине составляло $K_u = 5\%$. Результаты расчета и измерения профиля покрытия, полученного при напылении, представлены на рис. 7.



Рис. 6. Зависимость максимального коэффициента массопереноса K_d от неравномерности толщины покрытия K_u при оптимальном позиционировании для подложек с радиусом от 40 до 160 мм.

Отклонение результатов расчета от экспериментально измеренных значений не превышает 6%. С учетом неизбежных неточностей в позиционировании и при экспериментальном измерении параметров магнетронного распыления (K_W , $F_1(\xi)$, $F_2(\rho)$), а также учитывая, что точность измерения толщины методом рентген-флуоресцентного анализа [7] для Си на использованном оборудовании составляет ≈ 10 нм, полученная точность расчета является очень хорошим результатом.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПЫЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ И ОТСУТСТВИИ НАКЛОНА ПОДЛОЖКИ

На основе разработанного алгоритма расчета был проведен сравнительный анализ зависимости коэффициента массопереноса K_d от радиуса подложки R_S для $K_u = 5\%$ при оптимальном позиционировании с наклоном и без наклона ($\alpha_0 = 0^\circ$) подложки. Результаты представлены на рис. 8.

При больших диаметрах подложки (больше 50 мм для использованного магнетрона) коэффициент массопереноса при оптимальном размещении подложки практически не зависит от ее радиуса и является постоянной величиной. Наклон подложки позволяет значительно увеличить массоперенос (на $\approx 64\%$ для использованного магнетрона) и, помимо этого, уменьшить размеры вакуумной камеры за счет меньшего оптимального смещения x_0 подложки.



Рис. 7. Профиль толщины покрытия на вращающейся подложке при оптимальном позиционировании ($R_S = 100 \text{ мм}$; $K_u = 5\%$; $x_0 = 66 \text{ мм}$; $z_0 = 112 \text{ мм}$; $\alpha_0 = = 19.1^{\circ}$): точки — эксперимент; линия — расчет с использованием экспериментально измеренного K_{W} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные формулы для расчета профиля покрытия включают в себя параметры универсальных аппроксимаций профиля зоны эрозии и углового распределения потока распыленных атомов при магнетронном распылении, т.е. могут быть использованы для широкого круга планарных магнетронных распылительных устройств с дисковым катодом и любого распыляемого материала без каких-либо доработок. Отличительной особенностью предложенной методики расчета профиля покрытия является возможность учета особенностей используемого для напыления устройства и вакуумных условий путем измерения требуемых для расчетов параметров (K_{W} , $F_1(\xi)$, $F_2(\theta)$) непосредственно на используемом оборудовании в режиме напыления покрытия. Ввод в



Рис. 8. Зависимость максимального коэффициента массопереноса K_d от радиуса подложки R_S при $K_u = 5\%$: 1- без наклона подложки, 2- при наклоне подложки.

аппроксимацию углового распределения экспериментально измеряемого коэффициента K_1 позволяет учесть рассеяние и термализацию распыленных частиц на рабочем газе при транспортировке до подложки. При этом достигается достаточная для проведения инженерных расчетов точность.

На основе анализа результатов расчетов выявлено, что лля наклонной врашающейся полложки при заданном значении неравномерности покрытия по толщине существует единственный набор оптимальных параметров позиционирования, при которых потери распыленного материала минимальны. Значение этих оптимальных параметров зависит от конструкции магнетрона, распыляемого материала, размера подложки и требуемой неравномерности толщины покрытия. Выявлено, что равенство толщины покрытия в центре и на краю подложки является необходимым (но не достаточным) условием оптимального позиционирования вращающейся подложки. На основе этого разработан алгоритм расчета параметров оптимального позиционирования.

Сравнительный анализ показал, что наклон подложки обеспечивает существенное увеличение эффективности переноса материала с катода на подложку (более 60% для использованного магнетрона) при прочих равных условиях. Наилучшие результаты по увеличению эффективности напыления могут быть получены, если размер подложки значительно превышает размеры используемого магнетрона. Выявлены закономерности между оптимальными параметрами позиционирования и размером подложки.

Представленная методика расчета оптимального положения подложки может быть использована для уменьшения потерь распыленного материала при напылении однородных по толщине покрытий на крупногабаритные подложки, а также при комплексной разработке оптимизированного оборудования для напыления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Мартыненко Ю.В., Рогов А.В., Шульга В.И. //* ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 4. С. 13.
- Golosov D., Melnikov S., Zavadski S., Kolos V., Okojie J. // Plasma Physics and Technology. 2016. V. 3. Is. 3. P. 100.
- 3. *Павлов А.В., Щекотова И.В.* // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2006. Т. 6. № 4. С. 109.
- Starkov I.A., Nyapshaev I.A., Starkov A.S., Abolmasov S.N., Abramov A.S., Levitskiy V.S., Terukov E.I. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2017. V. 35. Is. 6. P. 061301. doi 10.1116/ 1.4991527
- 5. Рогов А.В., Капустин Ю.В., Мартыненко Ю.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 2. С. 126.
- 6. https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/sputteryield
- 7. Игнатова А.Ю., Еритенко А.Н., Ревенко А.Г., Цветянский А.Л. // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 2. С. 126.