

П. А. АЛЕКСАНДРОВИЧ, Д. А. ГОЛОСОВ, С. Н. МЕЛЬНИКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СЛОЁВ КОАКСИАЛЬНЫМ МАГНЕТРОНОМ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИШЕНЬЮ НА КРУПНОФОРМАТНЫЕ ПОДЛОЖКИ

Разработана математическая модель для расчета толщины наносимых слоев при реактивном магнетронном распылении коаксиальными магнетронами с цилиндрической мишенью. Данная модель базируется на интегрировании плотности распыленного потока с каждой точки зоны распыления и позволяет рассчитать скорость нанесения слоев и толщину покрытия в любой точке подложки.

Одним из сравнительно простых методов увеличения равномерности по толщине наносимых слоев является использование вращения подложек при смещении оси магнетрона относительно оси подложки [1]. Данный метод позволяет при небольших размерах зоны распыления магнетрона получать сравнительно высокую равномерность по толщине даже на подложках, превышающих в несколько раз размер мишени. Однако при нанесении пленок на крупноформатные подложки и если они многослойные, то вращение подложки может пагубно сказаться на результирующей пленке. Чаще всего при разработке таких систем не уделяется должного внимания конфигурации процесса, и взаимное расположение магнетрона и подложки выбирают эмпирически, путем проведения ряда экспериментов. При этом не учитываются особенности распыления различных материалов. Поэтому наиболее целесообразно применить коаксиальную магнетронную распылительную систему (МРС) большого диаметра, в которой подложка располагается на некотором удалении от центральной оси (рисунок 1). До настоящего времени для такого варианта магнетрона не предпринималось попыток разработать математические модели, которые позволяли бы рассчитывать скорость, толщину и равномерность наносимых слоев.



Рисунок 1 – Геометрическая схема модели системы МРС для нанесения на крупноформатные подложки методом реактивного магнетронного распыления (R_s – радиус подложки, R_t – радиус мишени, L – расстояние между кольцами распыления, h – расстояние между нижним кольцом распыления и подложкой)

Рассмотрев особенности геометрической схемы модели системы коаксиальной МРС (рисунок 1), можно увидеть, что мишень располагается под углом к плоскости мишени, поэтому модель процесса напыления разработана для случая, когда диаметр мишени значительно больше диаметра подложки, а углы распыления и конденсации не равны друг другу. Для увеличения равномерности покрытия на мишени будут две кольцевые зоны распыления. Так как рассматривается реактивное нанесение пленок, то в модели к необходимым свойствам материала добавлен стехиометрический индекс материала.

Для разработки математической модели были определены необходимые входные параметры, от которых зависят длина свободного пробега и термализация: давление газа, температура газа, атомная масса газа, радиус атома газа, энергия распыленных атомов, радиус распыленных атомов. Математическая модель для получения искомых значений базируется на последовательном вычислении: концентрации молекул газа, скорости молекул газа, энергии молекул газа, скорости распыленных атомов, коэффициента аккомодации, количества соударений до термализации, эффективного газокинетического сечения столкновения, что позволяет рассчитать длину свободного пробега распыленного атома [2].

Для определения скорости нанесения тонкопленочных слоев на подложке будет использоваться метод интегрирования распыленного потока с каждой точки зоны распыления. Скорость нанесения и толщина в каждой точке подложки, расположенной на определенном расстоянии от распыляемых мишеней, рассчитывается как сумма скоростей из кольцевых зон распыления. При этом для группы материалов, у которых максимум эмиссии при распылении не совпадает с направлением нормали к поверхности, применялась функция пространственно-

го распределения распыленных частиц. При этом скорость нанесения в точке подложки с координатами, расположенной на расстоянии l от точки на кольце источника распыления 1 МРС, может быть рассчитана по формуле:

$$V_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{v_t(r_1) \cos \varphi_1(r_1, \theta) \cos \phi_1(r_1, \theta) F(r_1, \theta)}{l_1^2(r_1, \theta)} d\theta \quad (1)$$

где l – расстояние от точки распыления до точки конденсации; φ – угол распыления и конденсации; θ – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона, при $\alpha = 1$ формула преобразуется в обычное косинусное распределение; F – функция пространственного распределения распыленных частиц, которая используется для группы материалов, у которых максимум эмиссии при распылении не совпадает с направлением нормали к поверхности [3]. Разработанная модель позволяет рассчитать скорость нанесения слоев и толщину покрытия в любой точке подложки, вычислить протяженность зоны термализации, неравномерность и относительную толщину пленки. Однако поскольку в модели не учитываются эффекты термализации распыленного потока, она может использоваться только для анализа процессов магнетронного нанесения слоев при рабочем давлении в зоне нанесения не более 0,5–1,0 Па.

Для верификации разработанной модели проведены исследования влияния параметров процесса магнетронного распыления на равномерность толщины наносимых пленок тантала магнетронной распылительной системой с цилиндрической мишенью и сравнения с результатами моделирования при аналогичных параметрах. Для исследования профилей распределения толщины и скорости нанесения пленок использовалась подложка из стекла длиной 40 см и шириной 4 см. Подложка протиралась изопропиловым спиртом и на поверхность подложки с шагом 5 мм наносилась сетка для взрывной фотолитографии. Далее подложка устанавливалась на подложкодержатель. Расстояние магнетрон – подложка (h) изменялось от 86 до 226 мм.

В ходе экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па и производилась ионная очистка поверхности подложки. Для этого в газораспределительную систему ионного источника подавался Ar. Поток аргона в ионный источник составлял $Q_{Ar} = 25$ мл/мин, напряжение и ток разряда соответственно $U_d = 90$ В, $I_d = 4,5$ А, ток соленоида $I_c = 1,5$ А, ток компенсатора $I_k = 18$ А. Время очистки 270 с. Затем производилось нанесение пленок Ta. Для этого в газораспределительную систему магнетронов подавался Ar. Поток $Q_{Ar} = 70$ мл/мин., $p = 0,08$ Па. При исследовании влияния повышенного давления на профили распределения толщины поток аргона в камеру увеличивался до 150 мл/мин. и использовался режим дросселирования при откачке камеры. При этом давление в камере составляло $p = 0,5$ Па.

Распыление Ta мишеней осуществлялось в режиме стабилизации мощности разряда ($P_r = 2,0$ кВт). Для распыления использовался униполярный импульсный ток ($F = 10$ кГц, $D = 80$ %). Время распыления во всех экспериментах было одинаковое и составляло 12 мин. После нанесения пленки образцы извлекались из камеры и производилась взрывная фотолитография. Затем образцы оттенялись. Для этого на образцы методом ионно-лучевого распыления наносилась пленка Ni толщиной 50–70 нм. Толщина нанесенных пленок определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Скорость нанесения пленки определялась исходя из толщины пленки и времени нанесения. Неравномерность толщины пленки Δv рассчитывалась по формуле

$$\Delta v = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\max}} 100\% \quad (2)$$

где v_{\max} и v_{\min} – максимальная и минимальная скорость нанесения на исследуемом участке подложки.

На рисунке 2 приведены результаты верификации модели при различном расстоянии мишень – подложка. Также проведено сравнение результатов моделирования с профилями распределения толщины, полученным при повышенном давлении ($p = 0,5$ Па) (рисунок 3). Установлено, что при уменьшении расстояния мишень–подложка увеличивается относительная скорость нанесения на края подложки и уменьшается относительная скорость нанесения на оси подложки. Максимальная равномерность скорости нанесения пленки получена при расстоянии мишень–подложка 146 мм.

В результате верификации установлено, что при $Y_{Ta} = 0,4$, $k_{Ta} = 0,6$ максимальная скорость нанесения на оси подложки составила $v = 0,327$ нм/с, в реальности она ниже $v = 0,284$ нм/с. Поэтому коэффициент распыления был уменьшен до $Y_{Ta} = 0,35$. При данном коэффициенте распыления скорость нанесения на оси подложки снизилась до 0,286 нм/с. Необходимость уменьшения коэффициента распыления связана с более низким напряжением разряда при повышенном давлении, и как следствие уменьшением эффективного коэффициента распыления.

Таким образом, было установлено, что разработанная модель позволяет с погрешностью менее 5 % прогнозировать профиль распределения скорости нанесения пленок. Однако существует проблема точного подбора углового распределения и термализации распыленных атомов. При моделировании использовались экспериментальные данные коэффициента распыления, углового распределения распыленных атомов и ионно-

электронной эмиссии, полученные для планарного магнетрона. Однако на эти параметры влияют режимы распыления.

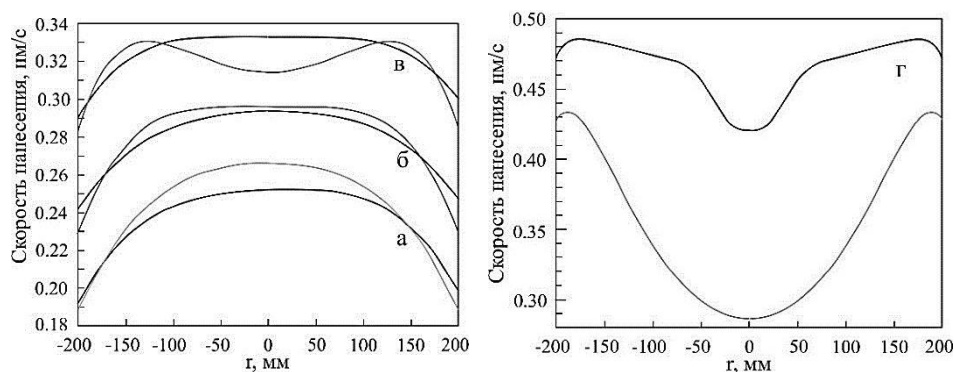


Рисунок 2 – Результаты верификации модели при различном расстоянии «мишень – подложка»:
 $a - 226$ мм, $b - 186$ мм, $v - 146$ мм, $z - 86$ мм ($Y = 0,4$, $k = 0,6$, $I_2/I_1 = 40$ %).
 Результаты моделирования показаны линиями серого цвета

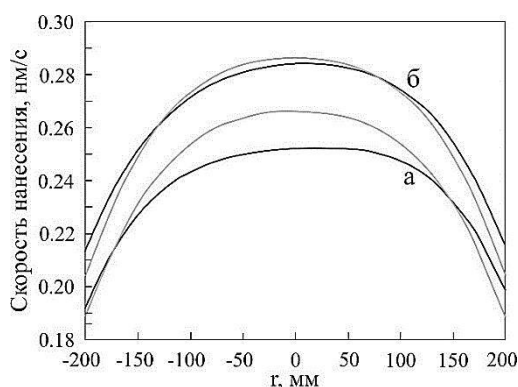


Рисунок 3 – Результаты верификации модели при расстоянии «мишень – подложка» 226 мм и различном давлении:
 $a - 0,08$ Па ($Y_{Ta} = 0,4$, $k_{Ta} = 0,6$), $b - 0,5$ Па ($Y_{Ta} = 0,35$, $k_{Ta} = 0,6$).
 Результаты моделирования показаны линиями серого цвета¹

Список литературы

1. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. акад. А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с.
2. Meyer, K. Thermalization of sputtered atoms / K. Meyer, I. K. Schuller, C. M. Falco // J. Appl. Phys. – 1981. – Vol. 52, № 9. – P. 5803–5805.
3. Екре, S. D. Theoretical and experimental determination of the energy flux during magnetron sputter deposition onto an unbiased substrate / S. D. Екре, S. K. Dew // Journal of Vacuum Science and Technology A. – 2003. – Vol. 21. – P. 476–483.

The article briefly describes the proposed mathematical model for calculating the thickness of deposited layers during reactive magnetron sputtering using coaxial magnetrons with a cylindrical target and the results of its verification.

Александрович Павел Александрович, студент 4 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, ravelaleksandrowitch@yandex.ru.

Научные руководители – *Голосов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра 2.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dmgoosov@gmail.com.

Мельников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра 2.1 НИЧ Б Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, adminset@bsuir.by.

¹Исследования выполнены в рамках научного проекта № T25КИ-055 (№ W2421112) при финансовой поддержке БРФФИ и Национального фонда естественных наук Китая.