

## РАВНОМЕРНОСТЬ ОСАЖДАЕМЫХ УЛЬТРАТОНКИХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В.В. Шекелевский, К.Т. Логунов, Д.А. Котов

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки 6, Минск 220013, Беларусь, kotov@bsuir.by*

В работе рассмотрено применение численных методов, на примере метода Монте-Карло, для оценки равномерности формируемых ультратонких покрытий методом магнетронного распыления. Описан подход к заданию начальных условий для потока распыляемых частиц. Показаны зависимости формируемого профиля покрытия при разном расстоянии мишень-подложка. Проведена верификация расчетных и экспериментальных данных, которая показывает хорошее соответствие расчета с экспериментом, что говорит о применимости данного подхода к определению профиля формируемых покрытий в более сложных случаях.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление; расчет процесса магнетронного распыления; зона эрозии мишени; осаждение тонких пленок; рассеяние распыленных атомов на рабочем газе; метод Монте-Карло.

## UNIFORMITY OF DEPOSITED ULTRATHIN COATINGS FORMED BY MAGNETRON SPUTTERING

V.V. Shakialeuski, K.T. Logunov, D.A. Kotov

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, Belarus, kotov@bsuir.by*

The paper considers the application of numerical methods, using the Monte Carlo method as an example, to evaluate the uniformity of ultrathin coatings formed by magnetron sputtering. An approach to specifying the initial conditions for the flow of sputtered particles is described. Dependences of the formed coating profile are shown for different target-substrate distances. The nonuniformity of the films decreases with an increase in the distance between the target and the substrate, but at the expense of a decrease in the deposition rate. Experimental deposition of vanadium on a glass substrate was carried out and verification of the calculated and experimental data was carried out, which shows a good agreement between the calculation and experiment, which indicates the applicability of this approach to determining the uniformity profile of the formed coatings in more complex cases. An analysis of the calculated data shows that it is possible to achieve a film nonuniformity of less than 5% with a fixed and axisymmetrically located substrate with respect to the magnetron and a target-substrate distance of 250 mm only in a narrow section with a radius of about 25 mm, but it is impossible for large substrate sizes, which is confirmed by experimental data. In this case, it is necessary to use the rotation of the substrate and its shift relative to the magnetron axis, as well as the tilt.

**Keywords:** magnetron sputtering; calculation of the magnetron sputtering process; target erosion zone; deposition of thin films; scattering of sputtered atoms on the working gas; Monte Carlo method.

### Введение

Современная промышленность в производстве изделий микро-, нано- и оптоэлектроники при нанесении тонкопленочных покрытий чаще всего использует магнетронное распыление [1]. В связи с чем стоит актуальным вопрос по воспроизводимому осаждению равномерных покрытий нанометровой толщины на подложки больших площадей. Основными факторами, оказывающими влияние на профиль наносимого покрытия, являются давление

в рабочей камере, геометрия области плазмообразования, профиль выработки мишени и геометрическая конфигурация мишень-подложка. Несмотря на то, что аналитические модели расчета осаждения материала мишени на подложке при распылении разработаны довольно давно, они не позволяют полноценно учесть все параметры, оказывающие влияние на формирование покрытий [2]. Решением данной проблемы является применение численных методов, в частности метода Монте-Карло

для распыленных частиц, что позволяет с высокой степенью точности определять неравномерность осажденного покрытия на подложке, учитывая большинство факторов, влияющих на транспорт частиц к подложке.

### Результаты исследований и их анализ

В магнитной распылительной системе (МРС) силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами над поверхностью мишени, где создается магнитная ловушка аркообразной формы. Наличие этого замкнутого магнитного поля над поверхностью мишени позволяет локализовать плазму непосредственно у мишени, ионы которой распыляют мишень [3]. Однако неравномерность магнитного поля локализует плазму над мишенью в виде тора, в связи с чем мишень распыляется неравномерно по всей поверхности, с имеющимися в определенных участках выраженными максимумами распыления. Внешний вид распыленной мишени на эксперименте представлен на рисунке 2 соответственно.



Рис. 1. Фотография распыленной мишени из титана диаметром 80 мм на разработанной МРС

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. Механизм переноса определяется длиной свободного пробега частиц в камере.

Из экспериментальных данных известно, что повышение давления ведет к уменьшению длины свободного пробега частиц в газе, что в случае магнетронных распылительных систем приводит к сужению профиля зоны эрозии мишени и уменьшению коэффициента использования материала мишени.

Для того, чтобы начать расчет процесса переноса распыленных частиц с мишени к подложке необходимо задать начальные условия, а именно начальные координаты распыляемых частиц. Для этого необходимо определить профиль зоны эрозии мишени, который оценивается с помощью метода Монте-Карло для заряженных частиц, движущихся в скрещенных магнитном и электрическом полях [4]. Или оцифровкой профиля эрозии экспериментально распыленной мишени. В нашем случае начальные координаты распыляемых частиц задаются согласно профилю зоны эрозии мишени, где концентрация размещаемых частиц пропорциональна глубине профиля, что показано на рисунке 2.

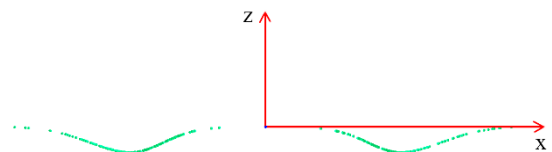


Рис. 2. Визуализация начального расположения распыляемых частиц в сечении плоскости  $zOx$

Далее решается уравнение движения с учетом рассеяния на рабочем газе и определяется пересечение частиц с поверхностью подложки. Учет рассеяния частиц на рабочем газе аналогичен используемому алгоритму для рассеяния электронов в магнитной ловушке МРС, описанной в работе [5].

Расчеты проводились для круглого магнетрона диаметром 80 мм. Рабочее давление которого порядка 0.15 Па. Потенциал катода  $-450$  В. Профиль эрозии мишени, получаемый на данной МРС был показан на рисунке 1. В расчете используется

квадратная подложка с размерами 20×20 см. Подложка размещалась осесимметрично относительно магнетрона. На рисунке 3 представлены рассчитанные профили осажденного покрытия на подложке при разном расстоянии между мишенью и подложкой.

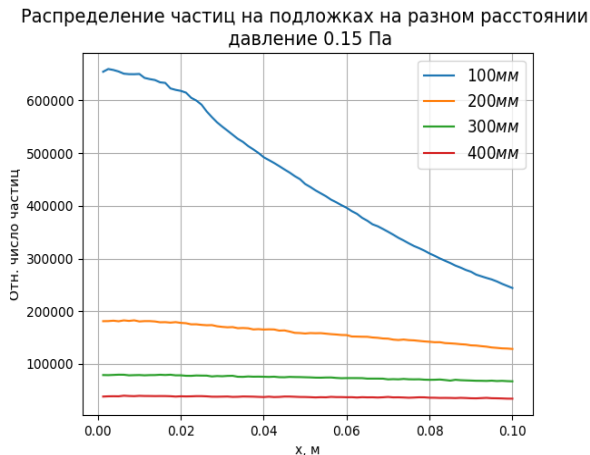


Рис. 3. Расчетные профили получаемых покрытий при разном расстоянии мишень-подложка в плоскости проходящей через центр подложки

Из рисунка 3 хорошо видно проявление закона обратных квадратов с увеличением расстояния, что и наблюдается на эксперименте.

Также проведено сравнение расчетных профилей с экспериментально осажденным покрытием из ванадия на стеклянную подложку с размерами 26×21 см, фотография которой представлена на рисунке 4.



Рис. 4. Фотография полученного покрытия на стеклянной подложке при расстоянии мишень-подложка 250 мм

Толщина полученного покрытия определялась методом микроинтерферометрии. Максимальная толщина полученной пленки в центре подложки составляет 140 нм.

На рисунке 5 представлено сравнение расчетного профиля осажденного покрытия с измеренным экспериментально. Экспериментальные кривые получены измерением во взаимно перпендикулярных плоскостях.

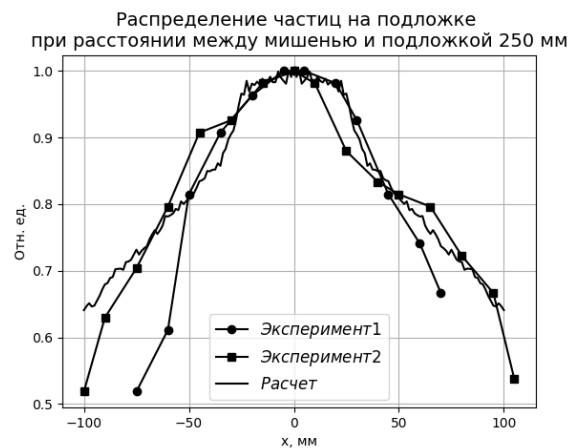


Рис. 5. Сравнение нормированных расчетных и экспериментальных профилей осаждаемого покрытия

Как видно из рисунка, имеются различия между экспериментальными кривыми, что, по-видимому, обусловлено несимметричной откачкой газа из объема камеры экспериментальной установки ВУ-1, так как МРС установлено на боковом фланце. Тем не менее, сравнение расчетных и экспериментальных данных (кривая 1) показывает хорошее соответствие, что говорит о применимости метода Монте-Карло для оценки неравномерности формируемых покрытий. Анализ расчетных данных показывает, что добиться высокой равномерности пленки при неподвижной и расположенной осесимметрично подложке по отношению к магнетрону и расстоянию мишень-подложка 250 мм можно только на узком участке радиусом порядка 25 мм, но для больших размеров подложки невозможно, что подтверждается экспериментальными данными. В данном случае, как было указано выше, необходимо использовать вращение подложки и ее сдвиг

относительно оси магнетрона, а также наклон. Также экспериментальные кривые подтверждают косинусный закон распыления ванадия.

### Заключение

В данной работе рассмотрен подход к оценке неравномерности формируемых тонкопленочных покрытий получаемых методом магнетронного распыления с помощью численных методов на примере метода Монте-Карло. Рассмотрена зависимость профиля пленки при разном расстоянии мишень-подложка, а также проведена верификация с экспериментальными данными. Верификация показывает практически полное соответствие расчетных и экспериментальных данных на радиусе от центра подложки 50 мм, что говорит о применимости данного подхода для предварительной оценки формируемых покрытий при заданных начальных условиях.

### Библиографические ссылки

1. Gudmundsson J T Physics and technology of magnetron sputtering discharges. *Plasma Sources Sci. Technol* 2020; (29): 53.
2. Wang, Ben, et. al. Simulation and Optimization of Film Thickness Uniformity in Physical Vapor Deposition. *COATINGS* 2018; 8(9): 325.
3. Данилин Б.С., Сырчин Б.С. Магнетронные распылительные системы. Москва: Радио и связь; 1982. 72 с.
4. Shekelevski V., Kotov D. Simulation of charged particles motion in the cathode-fall region of an abnormal glow discharge in crossed ExH field. *Proceedings of the X International Conference «PLASMA PHYSICS AND PLASMA TECHNOLOGY»*. (September 12-16 2022), Minsk: Kovcheg; 2022. P. 281-284.
5. Шекелевский В.В., Котов Д.А. Влияние рассеяния заряженных частиц на рабочем газе на профиль выработки мишени при магнетронном распылении. *Радиотехника и электроника: материалы 59 науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов*. (апрель 2023), Минск: Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. С. 144-146.