

Оптимизация неравномерности магнетронного напыления пленок алюминия и оксида алюминия при взаимном перемещении подложки и магнетрона

В. И. Черкунов^{1,2}

¹АО «НПП «ЭСТО», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия

✉ chvi.esto@yandex.ru

Аннотация. Нанесение оптических покрытий на изделия относительно больших габаритов является актуальной задачей в производстве оптических приборов. В работе рассматривается способ получения покрытия из алюминия и оксидов алюминия на оптические детали диаметром до 300 мм. Для решения данной задачи была применена система с взаимным перемещением пластины и магнетрона с мишенью диаметром 100 мм. Такие системы требуют определенных алгоритмов движения. Алгоритмы должны позволять получать хорошую равномерность покрытия на изделиях. Моделирование и выбор алгоритма перемещения магнетрона относительно подложки служат основной целью данной статьи. Экспериментальная часть исследований выполнялась на установке M-Ray, применяемой для напыления на плоские подложки размерами до 300 × 300 мм. Для моделирования были применены такие инструменты, как CAD, система Компас 3D и Microsoft Excel. В результате моделирования был подобран алгоритм перемещения магнетрона. Данный алгоритм позволил получить пленки алюминия с хорошей неравномерностью по толщине и оптическим параметрам. В целом метод позволил определить, как необходимо перемещать магнетрон для достижения хорошей равномерности покрытия. Но следует отметить, что метод не учитывает ряд дополнительных факторов, влияющих на неравномерность напыляемой пленки.

Ключевые слова: магнетронное напыление, моделирование неравномерности напыления, управление, автоматизация, магнетрон, физическое осаждение из паровой фазы, оптические покрытия

Для цитирования: Черкунов В. И. Оптимизация неравномерности магнетронного напыления пленок алюминия и оксида алюминия при взаимном перемещении подложки и магнетрона // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 1. С. 14–21. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-14-21.

Original article

Optimization of Unevenness of Aluminum and Aluminum Oxide Coatings Obtained by Magnetron Sputtering under Mutual Movement of Substrate and Magnetron

V. I. Cherkunov^{1,2}

¹JSC SPE «ESTE», Moscow, Russia

²National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

✉ chvi.esto@yandex.ru

Abstract. The application of optical coatings to products of relatively large dimensions is an urgent task in the production of optical devices. This paper considers a method for obtaining a coating of aluminum and aluminum oxides on optical parts with a diameter of up to 300 mm. To that end, a system with a mutual displacement of the plate and the magnetron with a target diameter of 100 mm was used. Such systems require certain motion algorithms. The algorithms should enable a high evenness of the coating on the products. The work was focused on simulation and selection of a magnetron displacement algorithm relative to the substrate. The experimental part was performed using an M-Ray installation. This installation is used for spraying onto flat substrates up to 300 × 300 mm in size. Simulation was conducted using the Compass 3D CAD and Microsoft Excel

software applications. As a result, an algorithm for moving the magnetron was developed. This algorithm made it possible to obtain aluminum films with good optical parameters and unevenness in terms of thickness. In general, the method allows determination of optimal trajectories of magnetron motion for achieving good unevenness of the coating. However, the method does not take into account a number of additional factors affecting the unevenness of the sprayed film.

Keywords: magnetron sputtering, simulation of sputtering unevenness, control, automation, magnetron, physical vapor deposition (PVD), optical coatings

For citation: Cherkunov V. I. Optimization of Unevenness of Aluminum and Aluminum Oxide Coatings Obtained by Magnetron Sputtering under Mutual Movement of Substrate and Magnetron // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 1. P. 14–21. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-14-21.

Введение. Требования к тонким пленкам в оптических приборах требуют хорошей равномерности по толщине, а также по оптическим параметрам – коэффициентам преломления, отражения и поглощения. Одна из перспективных технологий получения тонких пленок с заданными оптическими параметрами – это магнетронное напыление в вакууме. Такие технологии широко распространены в производстве продукции микроэлектроники [1].

Среди проблем магнетронного напыления, как и других методов, – получение хорошей равномерности покрытия. Для решения данной проблемы применяются различные методы. Конфигурации расположения магнетронов относительно изделий, на которые производится напыление, в существующих установках для магнетронного напыления [2] различны. Производители установок оптимизируют конструкцию с целью получить требуемую равномерность и скорость осаждения пленок на изделия определенных форм и размеров. В типовых схемах используются неподвижные магнетроны и перемещение изделий относительно них [3]. Например, плоские изделия располагаются на барабане. Примеры расчета неравномерности осаждения пленок в таких системах приведены в статье [4]. В установках для нанесения оптических покрытий используют планетарное вращение изделий. Расчет систем с планетарным вращением подложек приводится в статье [5]. В других подложки перемещаются линейно относительно магнетрона [6]. Помимо применения различных вариантов перемещения подложек, предлагается так же изменять геометрию мишени (катода) [7].

Для решения задачи нанесения покрытий на большие плоские изделия относительно небольшими магнетронами, магнетрон располагают под углом к изделию с разнесением оси магнетрона и

оси вращения изделия [8]. Еще одним решением такой задачи является система с перемещением и изделия, и магнетрона. Например, запатентованное устройство для нанесения многослойных покрытий на изделия [9]. Такая магнетронная распылительная система включает по меньшей мере четыре магнетрона, установленных на рычагах, обеспечивающих поочередную возможность поворота в горизонтальной плоскости каждого магнетрона, при этом подложка вращается вокруг своей оси.

Такие системы позволяют наносить покрытия на большие подложки относительно небольшими магнетронами. При этом не требуется располагать изделия и магнетроны далеко друг от друга. Это позволяет экономить пространство и использовать меньшие по размерам рабочие камеры для последовательного напыления нескольких материалов. Для напыления меньшими по размеру магнетронами требуются мишени небольшого размера, что актуально при напылении драгоценных материалов, поскольку такие мишени имеют большую стоимость.

В данной статье рассмотрен метод прогнозирования равномерности нанесения оптического покрытия из алюминия и оксидов алюминия на изделия диаметром до 300 мм.

Постановка задачи. Первой задачей было получение покрытия из алюминия толщиной около 1 мкм с равномерностью менее 5 % на оптической заготовке диаметром 300 мм. Кроме требований к равномерности, предъявлялось требование к коэффициенту отражения покрытия. Пленка алюминия выступает в качестве зеркала в конечном изделии.

Второй задачей было получения слоя из оксида алюминия толщиной около 0.7 мкм с высоким коэффициентом поглощения на оптических заготовках диаметром 300 мм.

Для решения данных задач было предложено использовать систему с перемещением магнетрона при вращающейся подложке.

При проектировании систем с взаимным перемещением магнетронов и подложки требуется определить, как геометрически должны быть расположены магнетрон и подложка и в какой точке подложки какое время необходимо осуществлять напыление для достижения хорошей равномерности покрытия, т. е. необходимо определить алгоритм взаимного перемещения подложки и магнетрона. В этом и заключается основная цель проведенной работы.

Для определения оптимального алгоритма движения необходимо решить несколько задач. Требуется определить: во-первых, как распределяется толщина покрытия при неподвижном магнетроне и подложке; во-вторых, как распределяется толщина покрытия при вращении подложки в каждой позиции магнетрона; в-третьих, установить оптимальные значения времени нахождения магнетрона в нужных точках над вращающейся подложкой.

Определив при помощи моделирования оптимальный алгоритм движения, следует провести практический эксперимент с целью подтверждения проведенных расчетов.

Основная часть статьи. Экспериментальные работы проводились на установке M-Ray HM 1S MS (рис. 1), оснащенной системой со сканирующим магнетроном, т. е. магнетроном, положение которого можно изменять относительно пластины в горизонтальной плоскости в автоматическом режиме.

Вакуумная установка содержит рабочую камеру, вакуум в которой создается при помощи откачки высоковакуумным турбомолекулярным насосом. Для форвакуумной откачки применяется сухой спиральный насос. Для подъема рабочей камеры установлен гидropодъемник. Также установка оснащена пневматической системой и системой охлаждения камеры, магнетронов и источника ионов.

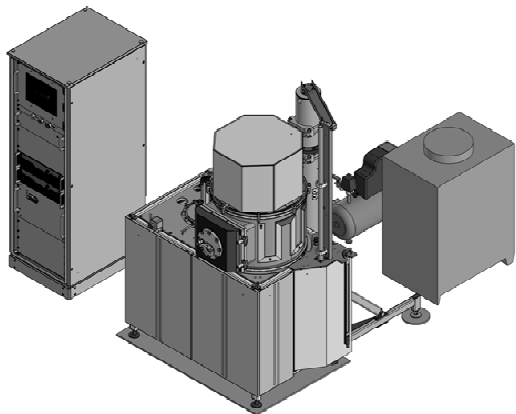


Рис. 1. Внешний вид установки
Fig. 1. Appearance of the installation

Управление установкой автоматизированное. Технологическая программа выполняется от загрузки до разгрузки изделий. Изделия загружаются вручную.

Система магнетронного распыления со сканирующим магнетроном, для которой осуществлялось моделирование, схематично представлена на рис. 2. Она включает в себя вращающийся вокруг своей оси подложкодержатель 1, магнетрон 3, рычаг 4, обеспечивающий поворот магнетрона вокруг оси 5, размещенные в рабочей камере 2. Также изображено положение магнетрона 6, в котором центр мишени совпадает с центром подложкодержателя. Система управления положением магнетрона подробно описана в [10]. Для такой системы достаточно важно, чтобы центр вращения подложки лежал на окружности, по которой перемещается центр магнетрона. На подложкодержателе могут размещаться как носители для подложек меньше диаметра, так и подложка диаметром 300 мм. Толщина подложек, которые возможно разместить, составляет до 50 мм.

Задание положения магнетрона определяется углом поворота рычага, на котором он установлен. Угол, соответствующий определенному расстоянию между центром мишени магнетрона и центром вращения, определяется по формуле для расчета хорды окружности в зависимости от угла.

Для моделирования неравномерности напыления были получены эмпирические данные по распределению скоростей осаждения пленок с магнетрона, расположенного стационарно над неподвижной подложкой. На основании данных по скоростям осаждения пленки была построена диаграмма в виде 3D-модели в CAD-системе Компас-3D (рис. 3).

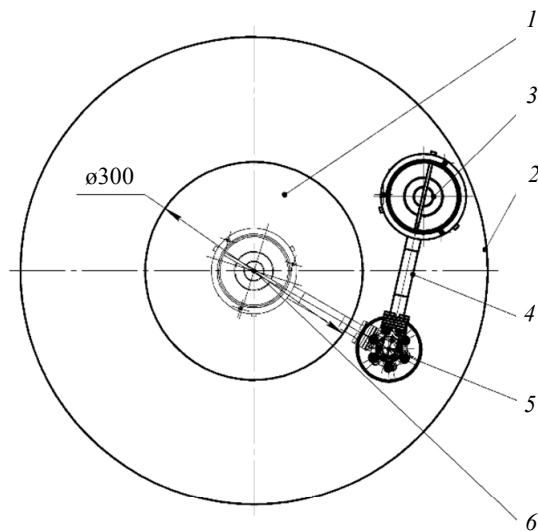


Рис. 2. Схема расположения магнетрона и подложкодержателя
Fig. 2. Layout of the magnetron and the substrate holder

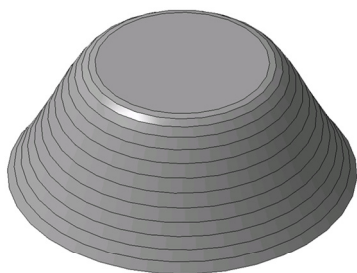


Рис. 3. 3D-диаграмма скорости осаждения пленок
 Fig. 3. 3D diagram of the film deposition rate

Затем методом параметрического моделирования с применением исполнений в Компас-3D были построены положения магнетрона кратные 5 мм перемещения от края пластины к центру. В то же время, сама пластина была разбита на дорожки в виде дисков с различными радиусами. Целью построения исполнений было получение фигур пересечений дорожек с диаграммой напыления в каждом из положений магнетронов. На рис. 4 представлены фигуры, построенные пересечением диаграммы напыления с дорожками пластины при положении магнетрона, в котором ось магнетрона находится на расстоянии 145 мм от центра оси подложкодержателя.

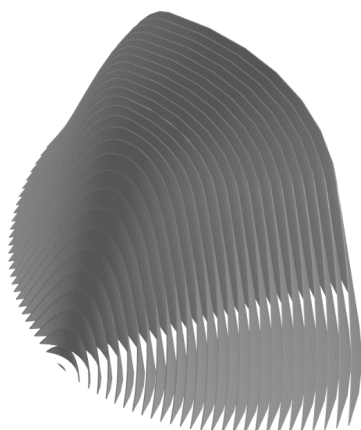


Рис. 4. Фигуры пересечения диаграммы напыления в положении магнетрона 145 мм от центра подложкодержателя
 Fig. 4. The shapes of the intersection of the sputtering diagram in the magnetron position 145 mm from the center of the substrate holder

Таким образом были построены фигуры для каждого положения магнетрона. Из массоцентровочных характеристик данных фигур были получены соответствующие коэффициенты, характеризующие скорость напыления на каждую дорожку подложкодержателя, в каждом положении магнетрона. Эти данные были сведены в таблицу в Excel для дальнейшего подбора времени нахождения магнетрона в определенных положениях – таких, чтобы неравномерность была менее 2 %. Фрагмент таблицы приведен на рис. 5.

При помощи таблицы в Excel методом подбора времени нахождения магнетрона в определенном положении была рассчитана траектория движения магнетрона, которая позволяет получить неравномерность напыленной пленки 1.98 %. Теоретическая траектория движения магнетрона приведена в таблице. Было выбрано десять шагов перемещения магнетрона от края к центру вращения подложкодержателя. Время, за которое магнетрон проходит все шаги, занимает 343 с. При такой траектории за один цикл напыления можно получить определенную толщину покрытия. Для увеличения толщины предполагается проводить напыление в несколько циклов, т. е. после одного напыления магнетрон возвращается в крайнюю позицию и повторяет движение по заданной траектории.

Теоретическая траектория движения
 Theoretical trajectory of movement

Расстояние от центра, мм	Время, с
180	85
160	67
140	54
120	42
100	34
80	26
60	18
40	11
20	6

Положение магнетрона	Время	1	5	10	15	135	140	145	150	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5,00	0,68	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	
10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
250,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
255,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
260,00	9,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	Неравномерность, %
	Итого	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,9608

Рис. 5. Фрагмент таблицы коэффициентов
 Fig. 5. Fragment of the coefficient table

Полученный алгоритм движения был заложен в технологическую программу нанесения тонкопленочного покрытия из алюминия. Напыление осуществлялось на несколько подложек, установленных на разных расстояниях от центра вращения карусели.

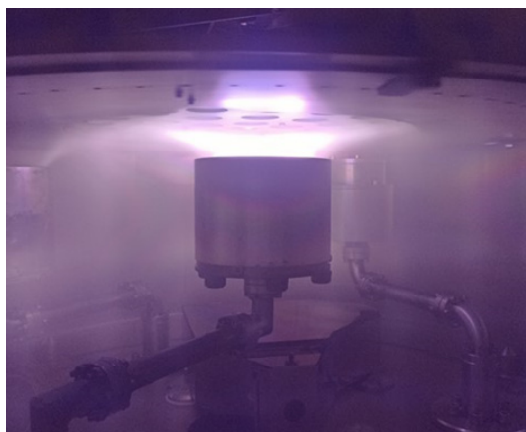
Технологический процесс включал откачку до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Затем проводилась ионная очистка в смеси газов аргона и кислорода в камере $8 \cdot 10^{-2}$ Па. Источник ионов также перемещается по заданной траектории, но влияние ионной очистки на толщину получаемой пленки незначительно, поэтому неравномерность ионной очистки не рассчитывалась, хотя в определенных процессах ионная очистка может вносить значительный вклад в качество и толщину осаждаемых пленок. После ионной очистки мишень магнетрона распылялась за пределами подложкодержателя вблизи стенки камеры на аргоне, для того чтобы удалить естественный оксид с мишени, образующийся в атмосфере. Такая очистка мишени проводилась в течение 5 мин. Во время очистки при задании постоянной мощности 500 Вт напряжение изменялось от 310 до 435 В, что характерно для процесса уменьшения толщины слоя оксида алюминия. Далее выполнялись шаги перемещения магнетрона, которые были рассчитаны по результатам моделирования. Цикл напыления (перемещение магнетрона от края к центру) повторялся 5 раз для получения большей толщины. После завершения напыления и перед напуском атмосферы камера выдерживалась в вакууме со всеми выключенными устройствами 10 мин. Это необходимо для остывания мишени и подложек с целью предотвращения образования

толстых слоев оксидов. Все шаги технологического процесса выполнялись в автоматическом режиме, включая процесс напыления с изменением положения магнетрона. Фотографии процесса напыления и внутрикамерного устройства представлены на рис. 6.

Стоит отметить, что характер разряда, а также параметры, выдаваемые блоком питания, были стабильны при изменении положения магнетрона. Это говорит о том, что изменение положения магнетрона не оказывает влияния на скорость и геометрию распыления мишени.

По результатам напыления на подложках было сформировано покрытие из алюминия. Для измерения толщин покрытия применялся профилометр Dektak 3030. При помощи него были измерены толщины по ступенькам на всех подложках. Фактическая неравномерность толщин пленок от края к центру подложкодержателя составила около 4%. График теоретического и фактического распределения толщин пленки от центра к краю подложкодержателя приведен на рис. 7. Полученные результаты измерений показали хорошую сходимость разработанной теоретической модели и фактически полученных толщин. Дополнительно для проверки результатов измерений механическим профилометром измерения также были проведены на оптическом профилометре и интерферометре Линника МИИ-4. Результаты измерений на всех трех приборах показали близкие значения, в пределах погрешностей приборов.

Для решения второй задачи – получения покрытия из оксида алюминия, было принято решение в аналогичный процесс добавить определенное количество кислорода на шагах напыления.



а



б

Рис. 6. Фотография процесса нанесения (а) и вакуумной камеры (б)
Fig. 6. Photo of the deposition process (a) and vacuum chamber (b)

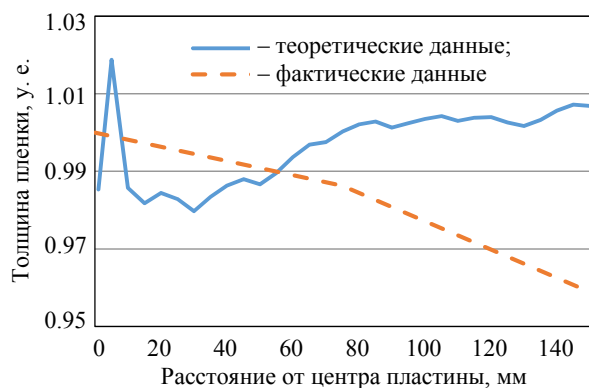


Рис. 7. График распределения толщин пленки от центра к краю подложкодержателя

Fig. 7. Graph of the theoretical distribution of film thicknesses from the center to the edge of the substrate holder

Таким образом, процесс был аналогичен процессу напыления алюминия. Единственное отличие заключалось в дополнительной подаче 0.5 л/ч кислорода на шагах напыления. В таком процессе было замечено, что перемещение магнетрона от края к центру подложкодержателя оказывало влияние на разряд. Напряжение уменьшалось от 425 до 350 В при перемещении магнетрона от края к центру при стабилизации питания магнетрона по мощности. Скорее всего, это связано с тем, что газ в камеру подавался в одной точке. При изменении положения магнетрона он оказывался дальше от точки подачи реактивного газа – кислорода, или ближе к ней, что сказывалось на составе газа и, соответственно, на параметрах разряда. В результате данного процесса было получено покрытие с равномерностью несколько худшей, чем в процессе напыления чистого алюминия. Толщина в центре подложкодержателя была несколько меньше, чем у края. Также наблюдалось различие по коэффициентам поглощения и отражения пленки на пластинах, расположенных с краю и в центре подложкодержателя. Этот вопрос требует дополнительного исследования и определенных механизмов компенсации увеличивающегося количества кислорода в центре. Еще одним из решений может стать подача газов непосредственно в магнетрон над мишенью, чтобы независимо от положения магнетрона количество подаваемого газа не изменялось.

Обсуждение результатов. Стоит отметить, что на краях подложек были получены меньшие толщины, не учтенные моделью. Это обусловлено теньвыми эффектами, созданными оснасткой для крепления подложек. Также не учтен фактор скорости вращения карусели. Для достаточной равномерности по всей пластине один оборот карусели должен занимать гораздо меньшее время, чем нахождение магнетрона на позиции.

Присутствуют также ограничения модели, не учитывающие скорость перехода магнетрона из одной позиции в другую. Но данное время незначительно при достаточно большом времени напыления в определенном положении.

Еще один из важных факторов – калибровка положения магнетрона в центре. Специализированное программное обеспечение позволяло настроить точность положения магнетрона в центре около 1 мм. При больших отклонениях необходимо вносить корректировки в модель перемещения магнетрона.

В целом, приведенная модель позволяет оценить неравномерность получаемой пленки по толщине. С ее использованием была решена задача получения отражающего покрытия из алюминия. Но при этом необходимо доработать модель, учитывая изменения влияния количества реактивного газа для получения пленок реактивным напылением.

Выводы и заключение. В результате исследования удалось получить оптическое зеркальное покрытие из алюминия с хорошей неравномерностью. При этом модель довольно проста и наглядна. Использование эмпирических данных для ее построения облегчает расчеты и позволяет учитывать особенности различных магнетронов.

Для реактивных процессов следует учитывать равномерность подачи реактивного газа и компенсировать ее либо выбором определенных режимов подачи питания на прибор, либо дополнительными газораспределителями, установленными непосредственно на магнетрон.

Список литературы

1. Voxman R. L., Sanders D. M., Martin P. J. Handbook of vacuum arc science and technology: fundamentals and applications. Park Ridge, New Jersey, USA: Noyes Publication, 1995. 743 с.

2. Сагателян Г. Р., Шишлов А. В. Анализ распределения толщины тонкопленочного покрытия при магнетронном напылении на установках с планетарным перемещением подложки // Наука и образова-

ние. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 11. С. 458–481. doi: 10.7463/1114.0733662.

3. Рогов А. В., Капустин Ю. В. Оптимизация положения вращающейся подложки при магнетронном напылении равномерных по толщине покрытий // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 103–109. doi: 10.1134/S0032816219010221.

4. Голосов Д. А., Завадский С. М., Мельников С. Н. Моделирование процесса нанесения тонких пленок в установках магнетронного распыления с барабанным подложкодержателем // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 4. С. 28–37.

5. Беликов А. И., Алиханов О. Э., Зайнулин Р. И. Использование компьютерного моделирования для выбора компоновки системы магнетронного нанесения покрытий на детали сложной формы // Вестн. РВО. 2023. Вып. 3. С. 1–9. URL: <https://www.vestnik-rvo.ru/issues/2023-02/5851/>. (дата обращения 06.06.2024).

6. Голосов Д. А., Достанко А. П., Мельников С. Н. Распределение толщины тонкопленочных слоев при магнетронном нанесении на линейно перемещае-

мые подложки // Вакуумная техника и технология. 2012. Т. 22, № 1. С. 27–34.

7. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Оптимизация геометрических параметров мишени магнетрона по критерию минимизации неравномерности напыления // Вестн. УГАТУ. 2011. Т. 15, № 1(41). С. 119–122.

8. Исследование распределения толщины покрытий, наносимых методом магнетронного распыления / В. В. Черниговский, С. А. Марцынюков, А. А. Лисенков, Д. К. Кострин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 4. С. 5–12.

9. Пат. 2490368С1 (RU). Устройство для нанесения многослойных покрытий на изделия / В. Е. Белецкий ООО «ЭСТО-Вакуум». Заявл. 21.03.2012; опубл. 20.08.2013. 8 с.

10. Черкунов В. И., Кузьмина Л. А. Система управления положением магнетрона // Сб. статей V Всерос. науч.-практ. конф. «Техника и технология современных производств». Пенза: Пензенский гос. аграрный ун-т, 2024. С. 356–361.

Информация об авторе

Черкунов Виктор Игоревич – аспирант Института микроприборов и систем управления (МПСУ) Национального исследовательского университета «МИЭТ», Георгиевский пр., д. 5 стр. 1, г. Москва, г. Зеленоград, 124498; начальник отдела вакуумного напылительного оборудования АО «НПП «ЭСТО», ул. Логвиненко, корп. 1403, г. Москва, г. Зеленоград, 124617, Россия.
E-mail: chvi.esto@yandex.ru

References

1. Boxman R. L., Sanders D. M., Martin P. J. Handbook of vacuum arc science and technology: fundamentals and applications. Park Ridge, New Jersey, USA: Noyes Publication, 1995. 743 s.

2. Sagateljan G. R., Shishlov A. V. Analiz raspredelenija tolshhiny tonkoplenochnogo pokrytija pri magnetronnom napylenii na ustanovkah s planetarnym peremeshheniem podlozhki // Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. Je. Baumana. 2014. № 11. S. 458–481. doi: 10.7463/1114.0733662. (In Russ.).

3. Rogov A. V., Kapustin Ju. V. Optimizacija polozenija vrashhajushhejsja podlozhki pri magnetronnom napylenii ravnomernyh po tolshhine pokrytij // Pri-bory i tehnika jeksperimenta. 2019. № 1. S. 103–109. doi: 10.1134/S0032816219010221. (In Russ.).

4. Golosov D. A., Zavadskij S. M., Mel'nikov S. N. Modelirovanie processa nanesenija tonkih plenok v ustanovkah magnetronnogo raspylenija s barabannym podlozhkoderzhatelem // Fizika i himija obrabotki materialov. 2012. № 4. S. 28–37. (In Russ.).

5. Belikov A. I., Alihanov O. Je., Zajnuln R. I. Ispol'zovanie komp'juternogo modelirovanija dlja vybora kom-ponovki sistemy magnetronnogo nanesenija pokrytij na detali slozhnoj formy // Vestn. RVO. 2023. Vyp. 3. S. 1–9.

URL: <https://www.vestnik-rvo.ru/issues/2023-02/5851/> (data obrashhenija: 06.06.2024). (In Russ.).

6. Golosov D. A., Dostanko A. P., Mel'nikov S. N. Raspredelenie tolshhiny tonkoplenochnyh sloev pri magnetronnom nanesenii na linejno peremeshhaemye podlozhki // Vakuumnaja tehnika i tehnologija. 2012. T. 22, № 1. S. 27–34. (In Russ.).

7. Ismagilov F. R., Maksudov D. V. Optimizacija geometricheskikh parametrov misheni magnetrona po kriteriju minimizacii neravnomernosti napylenija // Vestn. UGATU. 2011. T. 15, № 1(41). S. 119–122. (In Russ.).

8. Issledovanie raspredelenija tolshhiny pokrytij, nanosimyh metodom magnetronnogo raspylenija / V. V. Chernigovskij, S. A. Marcynjukov, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2018. № 4. S. 5–12.

9. Pat. 2490368С1 (RU). Ustrojstvo dlja nanesenija mnogoslajnyh pokrytij na izdelija / V. E. Beleckij ООО «JeS-TO-Vakuum». Zajavl. 21.03.2012; opubl. 20.08.2013. 8 s. (In Russ.).

10. Cherkunov V. I., Kuz'mina L. A. Sistema upravlenija polozeniem magnetrona // Sb. statej V Vseros. nauch.-prakt. konf. «Tehnika i tehnologija sovremennyh proiz-vodstv». Penza: Penzenskij gos. agrarnyj un-t, 2024. S. 356–361. (In Russ.).

Information about the author

Viktor I. Cherkunov – postgraduate student, Institute of Micro-Devices and Control Systems at the National Research University of Electronic Technology (MIET), Georgievsky Pr., 5 build. 1, Moscow, Zelenograd, 124498; Head of the Department of Vacuum Sputtering Equipment of JSC NPP ESTO, Logvinenko St., build. 1403, Moscow, Zelenograd, 124617, Russia.

E-mail: chvi.esto@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; принята к публикации после рецензирования 16.06.2024; опубликована онлайн 27.01.2025.

Submitted 28.05.2024; accepted 16.06.2024; published online 27.01.2025.
