

## ВЫРАВНИВАНИЕ ПОТОКОВ МАТЕРИАЛОВ В МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В.В. Грешилов

slovaricheg@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Для получения равномерных по толщине пленок методом магнетронного распыления применяют различные подходы. Один из наиболее популярных — использование спрофилированных маскирующих профилей. В данной работе представлена методика проектирования таких профилей. Предложенный способ изложен в теоретическом виде и проверен экспериментально. Для разработанного метода был создан модуль на языке Python. В ходе работы получен маскирующий контур, обеспечивающий отклонение равномерности толщины пленки  $\pm 2\%$ .

### Ключевые слова

Магнетронная распылительная система, тонкие пленки, маскирующие профили

Поступила в редакцию 21.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

Одной из актуальных задач современной промышленности является получение тонкопленочных покрытий с равномерным распределением толщины по поверхности. Особенно важно соблюдение равномерности в оптике и микроэлектронике. В настоящее время большинство функциональных тонкопленочных покрытий наносят методом магнетронного распыления [1], вакуумного дугового испарения [2], электронно-лучевого и термического испарения [3]. Магнетронные распылительные системы (МРС) и вакуумно-дуговые испарители (ВДИ) [4, 5], имеющие область распыления сложной формы, не позволяют обеспечить высокую равномерность покрытий без применения специальных средств. Методы термического и электронно-лучевого осаждения благодаря большому расстоянию до подложки решают эту проблему, однако при этом значительно снижается скорость роста покрытия. Кроме того, данные методы предъявляют повышенные требования к остаточному давлению в вакуумной камере, а полученные пленки имеют низкую адгезию к подложке.

На равномерность толщины покрытия может влиять большое количество факторов таких, как конфигурация магнитной системы устройства, геометрическое расположение подложки, характер ее движения и т. д.

Для исправления данного недостатка распылительных систем применяют различные методики:

- маски сложного профиля, расположенные между источником частиц и подложкой [6];
- специальное геометрическое расположение систем распыления относительно образцов [7];
- сложные форма и движение подложкодержателя [8].

Наиболее гибким методом является применение масок. Этот метод позволяет получать не только равномерные покрытия, но и покрытия с заранее заданным профилем распределения толщины.

Данное исследование посвящено разработке полуэмпирической методики расчета профиля маски для получения равномерных покрытий методом магнетронного распыления.

Модель вычислений. В качестве модели источника распыления часто используют точечный источник с косинусоидальным распределением плотности потока вещества [9]. Наиболее точно данная модель описывает системы, в которых испарение вещества происходит в малой области, например, электронно-лучевые испарители. В тоже время, у МРС и ВДИ эта область больше и часто имеет сложную форму, которая зависит от конфигурации магнитной системы. Для корректного моделирования этих систем распыления предлагается использовать наборы точечных источников, расположенных вдоль контура на поверхности, испарение с которого происходит наиболее интенсивно (для магнетрона — замкнутая линия, проходящая вдоль области наибольшей эрозии на поверхности катода).

Для системы, состоящей из одного точечного источника (рис. 1), в точке  $P$  на подложке скорость роста покрытия будет определяться соотношением [3]:

$$\frac{dm}{dt} \frac{1}{\rho dS} \sim \delta \sim \frac{\cos \varphi \cos \theta \cos \gamma}{|\vec{r}|^2}, \quad (1)$$

где  $dm/dt$  — скорость роста массы вещества, плотностью  $\rho$  на единичной площадке  $dS$ ;  $\varphi$ ,  $\theta$  — углы видимости из источника;  $\vec{r}$  — вектор между источником и точкой на подложке;  $\gamma$  — угол между векторами  $\vec{r}$  и  $\vec{n}$  (нормаль к подложке

в точке  $O$ );  $\cos \gamma = \frac{\vec{r}\vec{n}}{|\vec{r}||\vec{n}|}$ .

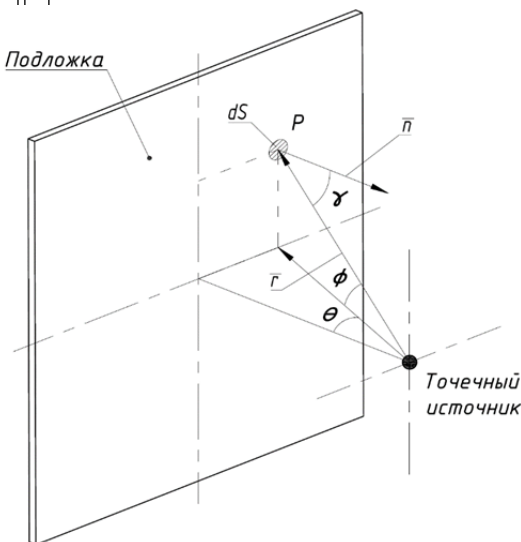


Рис. 1. Схема точечного источника

В настоящей работе рассматривается МРС с мишенью диаметром 100 мм. Область максимальной выработки мишени лежит в пределах окружности диаметром  $D_{\max} = 44$  мм. Поэтому в расчетной модели реальная МРС заменена на точечные источники, расположенные по окружности диаметром  $D_{\max}$ . При проведении расчетов не учитывали столкновения атомов распыленного материала с частицами рабочего газа. Такое упрощение справедливо только при относительно низких давлениях в вакуумной камере. Например, длина свободного пробега молекул аргона при  $5 \cdot 10^{-2}$  Па составляет  $\lambda \sim 0,21$  м, что превышает типичные расстояния между источником и подложкой.

Выражение для скорости роста пленки в произвольной точке подложки для системы из точечных источников будет иметь вид:

$$\dot{\delta}_{\Sigma} = \int_0^{2\pi} \dot{\delta}_{D_{\max}}(\psi) d\psi, \quad (2)$$

где  $\psi$  — угловая координата источника в области наибольшей выработки (рис. 2, а).

Результаты вычислений  $\dot{\delta}$  по формуле (2) для подложки размерами 100×100 мм, расположенной на расстоянии 100 мм от источника представлен на рис. 2, б. Значение скорости роста нормировано. Без использования вспомогательных методик результирующее покрытие имеет значительную неравномерность по толщине.

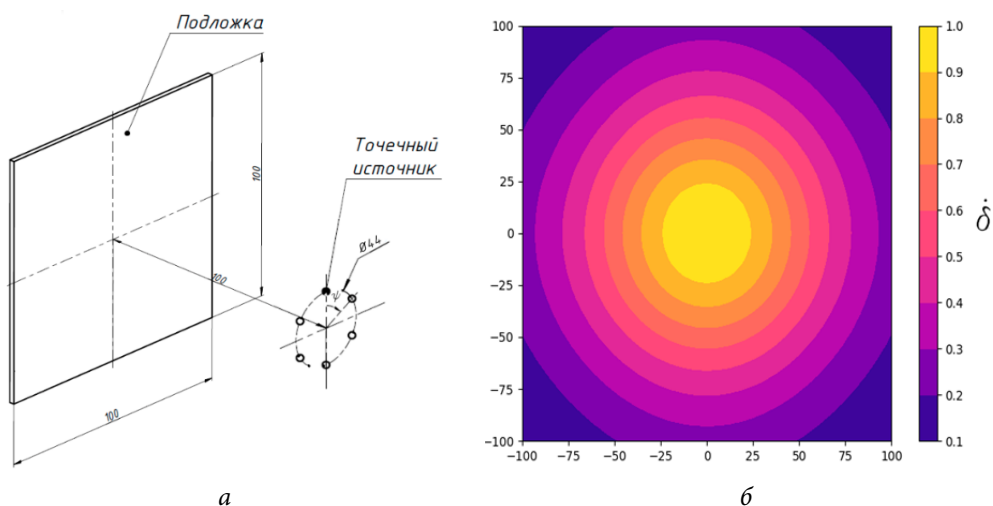


Рис. 2. Схема (а) и результаты расчета (б)

В промышленных условиях для нанесения покрытий детали располагают на вращающемся подложкодержателе и вынуждают непрерывно двигаться относительно статичной системы распыления (рис. 3). Однако, в таком случае получение равномерного покрытия на образцах большой площади проблематично. Наиболее простым способом решения этой проблемы является использование масок, ограничивающих суммарный поток вещества из источника на области подложки, расположенные на различных радиусах (рис. 4).

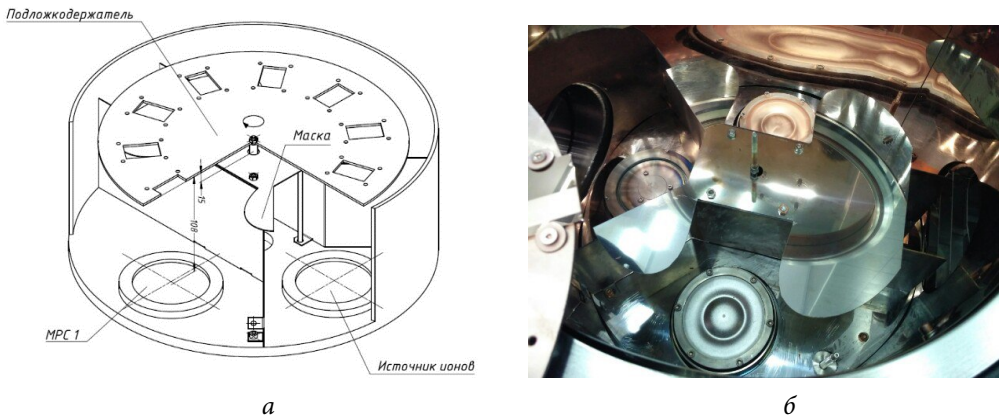


Рис. 3. Схема (а) и фотография (б) камеры установки «Бета»

Расчет профиля маски производится из условия постоянства скорости роста покрытия на различных диаметрах подложкодержателя:

$$L_i = \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \delta_{\Sigma D_i} d\varphi, \quad (3)$$

$$L_1 = \dots = L_i = L_{i+1} = \dots = \text{const.}$$

Получив для каждого диаметра угловые координаты границ, можно построить профиль маски.

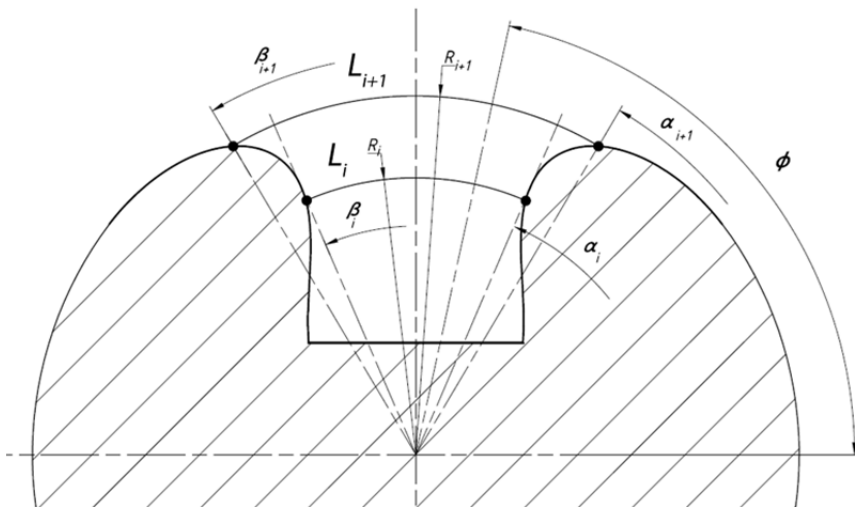


Рис. 4. Нахождение ограничивающего контура

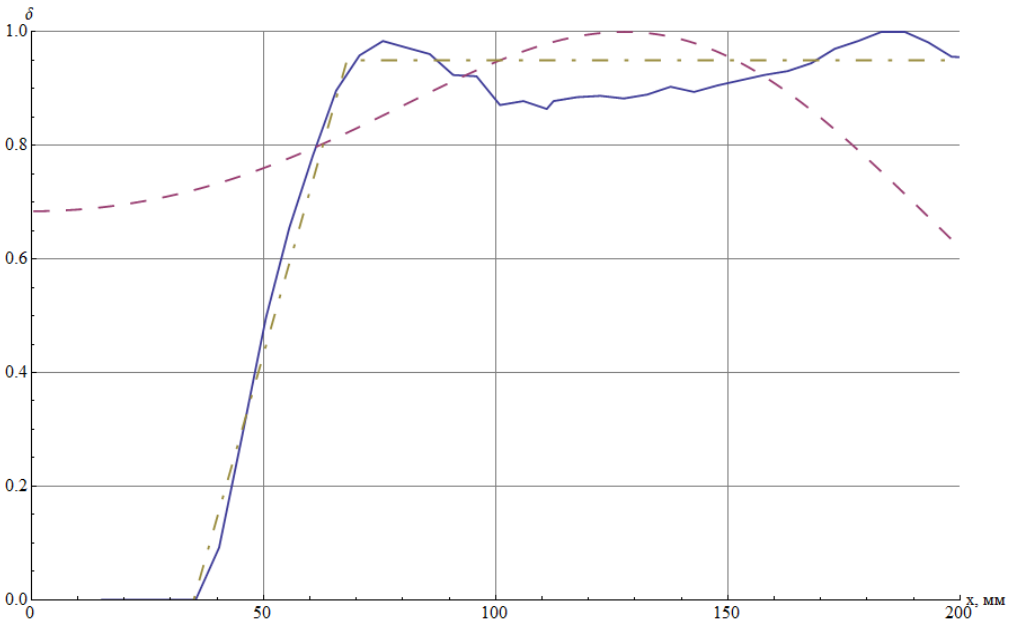
Данная расчетная методика предполагает, что маска расположена непосредственно на поверхности подложки. Однако в реальной конструкции между маской и подложкой всегда присутствует зазор, который приводит к искажению области затенения. Поэтому полученный профиль необходимо корректировать с использованием правил перспективной проекции [4]:

$$\begin{aligned}
 x_m &= \frac{x_1 - x}{z_1 - z} (z_m - z) + x; \\
 y_m &= \frac{y_1 - y}{z_1 - z} (z_m - z) + y,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где  $(x_1, y_1, z_1)$  — координаты точки на контуре маски;  $(x, y, z)$  — координаты источника;  $(x_m, y_m, z_m)$  — координаты спроецированной точки.

Проведение эксперимента. Согласно предложенной методике была рассчитана маска для установки «Бета» производства компании «НПП «УВН» [10] (см. рис. 3). В состав установки входят две магнетронные распылительные системы с мишенями диаметром 100 мм, разделенные перегородками, и ионный источник с анодным слоем для очистки поверхности подложки перед нанесением покрытия [11, 12]. Для прохождения ионного пучка в маске имеется вырез.

В качестве материала мишеней использовалась медь, плазмообразующим газом служил аргон. Нанесение покрытий производилось при давлении в вакуумной камере  $10^{-1}$  Па. Источник питания работал в режиме постоянной мощности 2,3 кВт. Ток разряда составлял 5 А, напряжение — 436 В, время нанесения — 12 мин. Подложками служили стеклянные пластины размерами 200×50 мм. Измерение профиля толщины покрытия производилось методом ступеньки при помощи стилусного профилометра Alpha-StepProfilerD-600.



**Рис. 5.** Нормированные результаты эксперимента:

сплошная линия — профиль с маской, прерывистая — расчетный профиль без использования масок, штрих-пунктирная — расчетный профиль с использованием маски

Нормированные результаты измерения представлены на рис. 5. Видно, что маска значительно увеличивает равномерность покрытия: неравномерность на участке радиуса длиной 100 мм составила  $\pm 5\%$ . В тоже время, профиль, полученный в эксперименте с использованием маски значительно отличается от теоретического. Это отличие может объясняться погрешностями при изготовлении конструкции, отклонением реального профиля распыления МРС от принятого в расчетной методике, зависимостью распределения значения скорости роста от топологии магнитного поля конкретной конструкции, а также столкновениями атомов материала с частицами рабочего газа в промежутке мишень-подложка.

Для получения более равномерного покрытия форма маски была эмпирически скорректирована с использованием измеренного профиля покрытия. Профиль толщины, полученный с помощью скорректированной маски, показан на рис. 6 (сплошная линия). Неравномерность покрытия составила  $\pm 2\%$ , что полностью соответствует современным требованиям промышленности. В то же время, применение маски на 40 % снизило скорость роста покрытий.

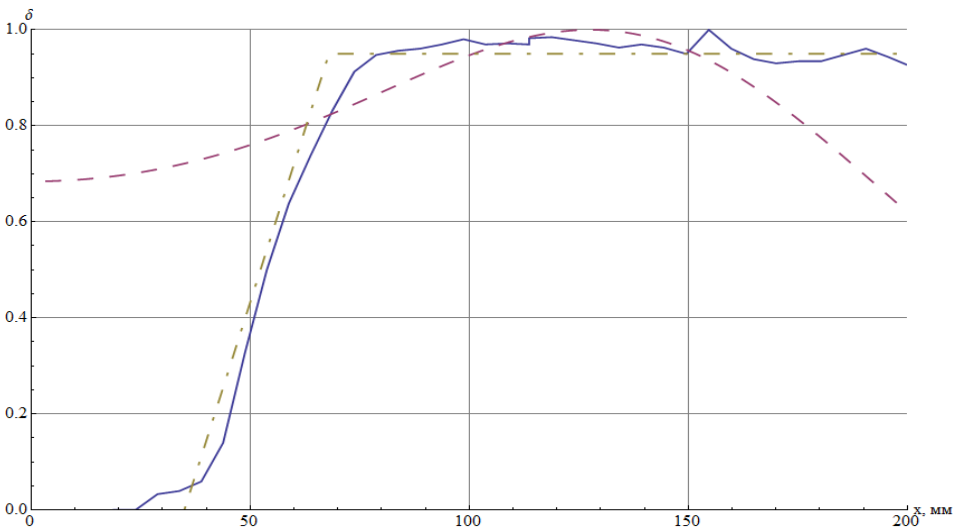


Рис. 6. Результаты эксперимента:

профиль, полученный с маской (сплошная линия); расчетный профиль без использования масок (прерывистая) и расчетный профиль с использованием маски (штрих-пунктирная)

**Выводы.** В ходе проведенного исследования был разработан и экспериментально подтвержден полуэмпирический алгоритм проектирования затеняющих масок, для получения равномерного слоя на образцах. Результирующая равномерность составила  $\pm 2\%$  на отрезке 100 мм, что вполне соответствует требованиям предъявляемых промышленностью. Результаты работы могут быть полезны при разработке оборудования для нанесения тонкопленочных покрытий для оптической и электронной промышленности. Также была разработана программа, реализующая данный метод расчета.

## Литература

- [1] Духопельников Д.В. *Магнетронные распылительные системы. Ч. 1. Устройство, принципы работы, применение*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 55 с.
- [2] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К., Воробьев Е.В., Булычев В.С. Вакуумная дуга на поликристаллическом кремниевом катоде. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 11. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/748209.html>.
- [3] Sze S.M., Lee M.K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. John Wiley & Sons, 2012, 582 p.
- [4] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А., Вин Н.Ч. Оптимизация траектории движения катодного пятна для повышения равномерности выработки катода вакуумного дугового испарителя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 10(22). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1042.html>.
- [5] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Влияние выработки катода дугового испарителя на равномерность толщины покрытия и угловое распределение продуктов эрозии. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 4. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/707391.html>.
- [6] Francisco V., Martinez A., Regalado L.E. Correction masks for thickness uniformity in large-area thin films. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 10, pp. 1602–1610.
- [7] Кузьмичев А.И. *Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления*. Киев, Аверс, 2008, 244 с.
- [8] Perrin A., Gailliard J.P. Planetary system for high-uniformity deposited layers on large substrates. *Thin Films for Optical Systems*, 1993, vol. 1972, pp. 238–244.
- [9] Ключева В.А. Исследование распределения толщины покрытия и углового распределения испаренного материала вакуумно-дугового испарителя с алюминиевым катодом. *Молодежный научно-технический вестник*, 2014, № 6. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/723174.html>.
- [10] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г., Булычев В.С., Рязанов В.А., Афонин О.И. Решения МГТУ им. Н.Э. Баумана и компании «НПП «УВН» для тонкопленочной технологии оптической и электронной промышленности. *Материалы XII Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология»*. Москва, Новелла, 2017.
- [11] Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Исследование и оптимизация характеристик ионного источника ИИ-200. *Наука и образование: научное издание*, 2011, № 10. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/230165.html>.
- [12] Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г., Кириллов Д.В. Управление формой пучка технологического ионного источника для высокоточной обработки поверхности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2017, № 3, с. 24–36.

**Грешиллов Вячеслав Валерьевич** — студент кафедры «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Е.В. Воробьев, ассистент кафедры «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**MATERIALS FLUX FLATTENING IN MAGNETRON SPRAYING SYSTEMS**

V.V. Greshilov

slovaricheg@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

*In order to obtain the films which are uniform in thickness by means of magnetron sputtering technique different approaches are applied. One of the most popular ones is the use of the shaped masking profiles. This work introduces the technique for designing such profiles. The suggested technique is shown in the theoretical form and checked experimentally. For the developed method we have created a module in the python language. In the course of the work we obtained a masking contour providing the deviation from the film thickness uniformity at a level of  $\pm 2\%$ .*

**Keywords**

*Magnetron spraying system, thin films, masking profiles*

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

---

**References**

- [1] Dukhopel'nikov D.V. Magnetronnye raspylitel'nye sistemy. Ch. 1. Ustroystvo, printsipy raboty, primeneniye [Magnetron sputtering systems. P. 1. Arrangement, working principles, application]. Moscow, Bauman Press, 2014, 55 p.
- [2] Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Marakhtanov M.K., Vorob'yev E.V., Bulychev V.S. Vacuum arc on the polycrystalline silica cathode, *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 11. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/748209.html>.
- [3] Sze S.M., Lee M.K. Semiconductor devices: physics and technology. John Wiley & Sons, 2012, 582 p.
- [4] Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Ryazanov V.A., Vin N.Ch. Cathode spot path optimization to increase cathode uniform excavation of vacuum arc vaporizer. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 10(22). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1042.html>.
- [5] Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Vorob'yev E.V., Ivakhnenko S.G. The influence of cathode excavation of cathodic arc evaporator on thickness uniformity and erosion products angle distribution. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/707391.html>.
- [6] Francisco V., Martinez A., Regalado L.E. Correction masks for thickness uniformity in large-area thin films. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 10, pp. 1602–1610.
- [7] Kuz'michev A.I. Magnetronnye raspylitel'nye sistemy. Kn. 1. Vvedenie v fiziku i tekhniku magnetronnogo raspyleniya [Magnetron sputtering systems. P. 1. Introduction to magnetron sputtering physics]. Kiev, Avers publ., 2008. 244 p.
- [8] Perrin A., Gailliard J.P. Planetary system for high-uniformity deposited layers on large substrates. *Thin Films for Optical Systems*, 1993, vol. 1972, pp. 238–244.
- [9] Klyueva V.A. Research on coating thickness distribution and angular distribution of volatilized material of vacuum-arc evaporator with aluminum cathode. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, 2014, no. 6. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/723174.html>.



- [10] Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Vorob'yev E.V., Ivakhnenko S.G., Bulychev V.S., Ryazanov V.A., Afonin O.I. Resheniya MGTU im. N.E. Baumana i kompanii «NPP «UVN» dlya tonkoplennoy tekhnologii opticheskoy i elektronnoy promyshlennosti [Bauman MSTU and “NPP “UVN” company decisions for thin film technology of optical and electronic industries]. *Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya»* [Proc. XII Int. Sci.-Tech. Conf. “Vacuum technics, materials and technology”]. Moscow, Novella publ., 2017, p.
- [11] Dukhopel'nikov D.V., Vorob'yev E.V., Ivakhnenko S.G. Research and optimisation of II-200 ion source parameters. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2011, no. 10. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/230165.html>.
- [12] Dukhopel'nikov D.V., Vorob'yev E.V., Ivakhnenko S.G., Kirillov D.V. Shape control of the technological ion source beam for high-precision surface treatment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 3, pp. 24–36.

**Greshilov V.V.** — student, Plasma and Power Plants Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Vorob'ev E.V., Assistant Lecturer of Plasma and Power Plants Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.