

5. M.Yu. Yablokov, I.V. Sokolov, O.S. Malinovskaya, A.B. Gilman, A.A. Kuznetsov, Determination of the thickness of the modified layer of a polytetrafluoroethylene film treated in a glow discharge // High Energy Chemistry, 2013, V. 47, №1, P. 32–33.

6. Y. Nakayama, F. Soeda, A. Ishitani, T. Ikegami, Surface Analysis of Plasma-Treated Poly(ethylene terephthalate) Film // Polym. Eng. Sci., 1997, V. 31, № 17, P. 812–817.

7. C. Corbella, A. Pranda, S. Portal, T. De Los Arcos, et al. Validation of etching model of polypropylene layers exposed to argon plasmas // Plasma Proc. Polym., 2019, V. 16, № 6, 1900019.

8. T.S. Demina, M.G. Drozdova M.Y. Yablokov, A.I. A.N. Gaidar, A.B. Gilman, D.S. Zaytseva-Zotova, E.A. Markvicheva, T.A. Akopova, Zelenetskii, DC Discharge Plasma Modification of Chitosan Films: An Effect of Chitosan Chemical Structure // Plasma Proc. Polym., 2015, V. 12, № 8, P. 710–718.

9. M.S. Piskarev, A.B. Gilman, A.K. Gatin, A.I. Gaidar, T.S. Kurkin, A.A. Kuznetsov, The Effect of Modification by Direct-Current Discharge on the Surface Properties, Chemical Structure, and Morphology of Poly(ethylene terephthalate) Films // High Energy Chemistry, 2019, V. 57, № 1, P. 76–81.

## **РАЗРАБОТКА МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

### **DEVELOPMENT OF A MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM**

**Л.Л.Колесник<sup>1,2</sup>** / l.kolesnik@m-i.ru

**Д.А.Сотников<sup>1</sup>, Д.О.Мезенцев<sup>1</sup>, В.В.Глушко<sup>1</sup>, Э.С.Якупов<sup>1</sup>,**

**L.L.Kolesnik, D.A.Sotnikov, D.O.Mezencev, V.V.Glushko, E.S.Yakupov**

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

<sup>2</sup>ООО «Электроракумные технологии», г. Москва,

*В ходе проведенного литературного анализа была спроектирована водоохлаждаемая магнетронная распылительная система с дюймовой мишенью, разработаны рабочие чертежи деталей, выполнены расчеты коэффициента распыления и скорости распыления мишени из золота.*

*In the course of the literature analysis, a water-cooled magnetron sputtering system with an inch target was designed, working drawings of the parts were developed, and the sputtering coefficient and the sputtering speed of the gold target were calculated.*

**Ключевые слова:** *магнетронная распылительная система, магнетрон, вакуумная установка, коэффициент распыления, скорость распыления.*

**Keywords:** *magnetron sputtering system, magnetron, vacuum installation, spray ratio, spraying speed.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Первые магнетронные распылительные системы (МРС) появились в начале 70-х годов и сейчас нашли широкое применение в промышленности, о чём свидетельствует большое количество публикаций, посвящённых данной теме. Методы магнетронного распыления имеют большие перспективы промышленного применения благодаря высокой адгезии покрытий, возможности управления характеристиками плёнок за счёт изменения

потенциала смещения на подложке, давления, состава газовой среды и других параметров [1]. Данным методом покрытия получают без капельной фракции с высокими функциональными характеристиками, высокими скоростями.

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Основными элементами МРС являются мишень, анод и магнитная система. Благодаря конфигурации магнитов, силовые линии замыкаются между полюсами магнитной системы. В местах между входом и выходом силовых линий магнитного поля поверхность мишени интенсивно распыляется, форма поверхности определяется конфигурацией магнитной системы [2].

При подаче постоянного напряжения между мишенью и анодом возникает неоднородное электрическое поле и зажигается аномальный тлеющий разряд. Магнитное поле, действуя на электрон, проводит к возникновению силы Лоренца, которая перпендикулярна направлению скорости. Благодаря суммарному воздействию электрического и магнитного полей, электрон двигается параллельно поверхности мишени по замкнутой траектории близкой к циклоиде [3].

Скорость роста пленки на подложке при данном методе высокая, вследствие высокой интенсивности бомбардировки мишени ионами рабочего газа. Ионизация рабочего газа происходит непосредственно вблизи поверхности мишени.

Методом обладает следующими достоинствами:

- Равномерность получаемых покрытий;
  - Скорость нанесения, за счет интенсивной бомбардировки мишени положительными ионами рабочего газа;
  - Высокая адгезия пленок;
  - Возможность получать покрытия сложного состава;
  - Сохранение соотношения основных компонентов при распылении сложных веществ;
  - Возможность изменения структуры и свойств пленок за счет потенциала смещения на подложке, давления и состава газовой среды, одновременного распыления нескольких мишеней и других способов;
  - Низкая пористость пленок даже при малых толщинах;
  - Стабильность процесса
- Недостатки метода:
- Наличие рабочего газа как источника загрязнений;
  - Образование диэлектрической пленки на катоде при работе в среде реактивного газа;
  - Низкий коэффициент использования материала [4,5,6].

По степени ионного воздействия на подложку МРС разделяют на сбалансированные и несбалансированные. МРС считается сбалансированной, если интенсивности магнитного потока, протекающего через поверхности внешних полюсов и поверхности внутренних полюсов, идентичны или сравнимы. Преимущественное усиление или ослабление одного из полюсов ведет к несбалансированности магнитного поля [7,8].

В схеме МРС с несбалансированным магнитным полем происходит ослабление поля, параллельного поверхности мишени, что вызывает некоторое снижение скорости распыления, зато позволяет значительно расширить плазму в направлении подложки [9,10].

## **РЕЗУЛЬТАТЫ**

Разработанная на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» магнетронная распылительная система необходима для нанесения пленок золота на

малогабаритной вакуумной установке «Малютка». Модель лабораторной установки представлена на рис. 1.

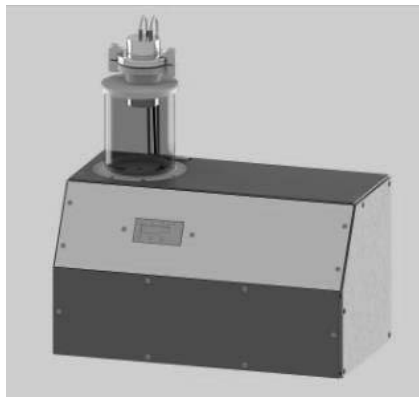


Рис. 1. Модель установки «Малютка».

Установка предназначена для формирования функциональных покрытий методом магнетронного распыления на подложках малых размеров. Малый размер подложек обусловлен параметрами держателя образца в сканирующем электронном микроскопе. Характеристики установки представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики лабораторной установки

Объем камеры, л	1
Типоразмер фланцев	ISO 100
Диапазон давления	$10^{-3} \dots 10^5$
Время откачки до давления $10^{-2}$ Па, с	86
Размер подложек, мм	10 x 10
Метод вакуумного нанесения	Магнетронное распыление
Габаритные размеры, мм	290 × 550 × 500

Верхний фланец установки является откидной крышкой для загрузки и выгрузки образцов. На фланце через редуцирующий патрубок ISO100 - ISO63 установлена магнетронная распылительная система (рис. 2).

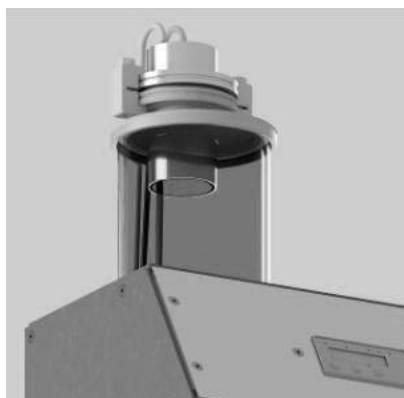


Рис. 2. Верхний фланец с МРС.

Модель МРС, выполненная в среде Inventor Professional 2020, представлена на рис.3.

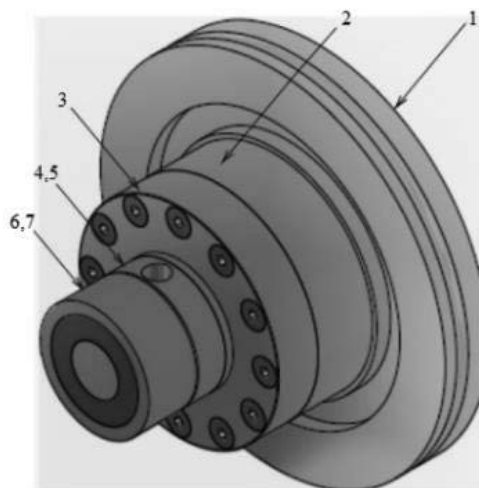


Рис. 3. Модель разработанной MPC. 1 – фланец; 2 – основание; 3 – диск; 4 – керамический диск; 5 – диск для крепления токоввода; 6 – магниты; 7 – медная втулка.

Для крепления магнетронной распылительной системы служит фланец ISO 63 (рис.4).



Рис. 4. Изображение фланца.

Во фланце выполнены проточки для установки центрирующего кольца ISO63-К с уплотнением и крепления струбцин (1). Также предусмотрены отверстия диаметром 13 мм для возможности установки фитингов водяного охлаждения (2). Для подачи питания на магнетронную распылительную систему реализовано центральное отверстие во фланце диаметром 6 мм (3). Крепление ответной части магнетрона к фланцу осуществляется с помощью винтового соединения с винтом М3 (4 шт.) (4).

На рис. 5 представлена деталь – основание, которая является ответной частью MPC. Основание крепится с помощью винтового соединения к фланцу ISO63. Материал детали сталь нержавеющая 12X18H10T. В основании сделаны проточки для уплотнительных колец KF40, 039-042-19 ВА, 008-011-19 по ГОСТ 9833-73 (1).

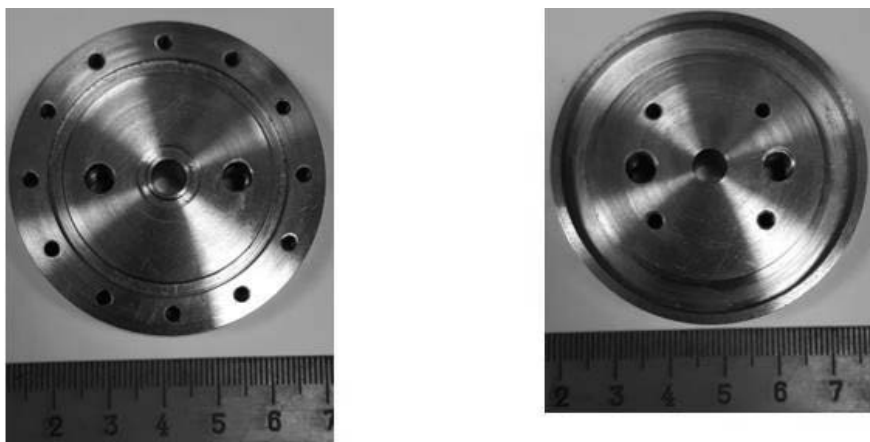


Рис. 5. Изображение основания.

Сквозные отверстия с резьбой М6 (3) необходимы для вкручивания фитингов М6 с уплотнительным резиновым кольцом, чтобы обеспечить водяное охлаждение МРС.

Отверстия в цилиндрической поверхности выполнены для исключения скопления атмосферы в полости, образующейся после соединения основания и медного диска (рис. 6).

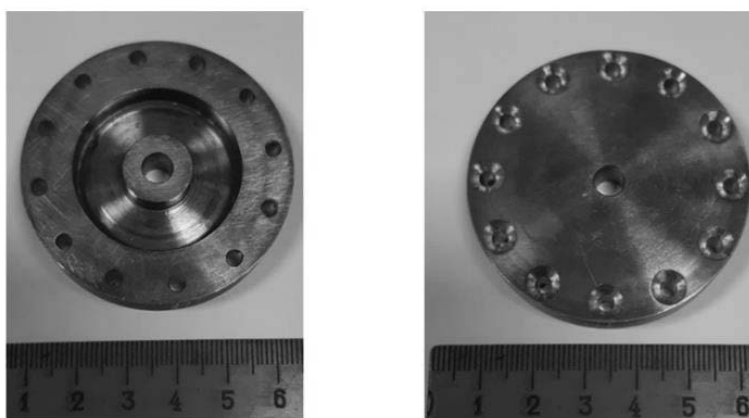


Рис. 6. Внешний вид медного диска.

Магнитная система МРС состоит из двух магнитов и медной втулки, расположенной между ними. Медная втулка предназначена для повышения эффективности охлаждения магнитов и их фиксации. Магнитная система расположена на детали из материала сталь 40Х. Данный материал является магнитомягким, что обеспечивает требуемую конфигурацию магнитного поля. В цилиндрической поверхности детали выполнено резьбовое отверстие, в которое устанавливается винт для фиксации токоввода.

Для обеспечения изоляции между магнитной системой и фланцем ISO63 магниты установлены на керамический диск (AlN) с отверстием для токоввода. Помимо изолирующей функции керамический диск используется для отвода тепла от магнитной системы.

В ходе сравнительного анализа были рассмотрены два типа магнитов: ферритовые и неодимовые. Ферритовые магниты обладают меньшей индуктивностью (0,4 Тл), однако температура эксплуатации может достигать 280<sup>0</sup>С. В отличие от ферритовых, неодимовые магниты умеют существенно большую магнитную индукцию (1,2 Тл), однако температура

эксплуатации до 80<sup>0</sup>С. Подробная характеристика цилиндрических магнитов диаметром 12 мм представлена в таблице 2.

Таблица 1.

Характеристика цилиндрических магнитов [11]

	Ферритовый	Неодимовый
Диаметр	12	12
Высота	12	12
Форма магнита	Диск	Диск
Намагничивание	Аксиальное	Аксиальное
Магнитная индукция	0,38-0,4 Тл	1,17-1,21 Тл
Коэрцитивная сила	230-275 кА/м	876 кА/м
Коэрцитивная сила по индукции	235-290 кА/м	955 кА/м
Максимальная магнитная энергия	27-32 кДж/м <sup>3</sup>	263-287 кДж/м <sup>3</sup>
Диапазон рабочих температур	280 °С	от -60 до +80 °С

Так как температура в процессе магнетронного распыления может достигать более 80 °С, то в качестве выбранных магнитов используются ферритовые аксиально намагниченные.

#### Расчет параметров МРС

Распыляемость вещества характеризуется коэффициентом распыления S, который определяет число атомов вещества Na, выбитых из мишени одним ионом.

Коэффициент распыления для плоской мишени рассчитывается по следующим формулам [12].

$$S = \frac{\alpha S_u(E)}{16\pi^3 a^2 U_0}, S_u(E) = \frac{4}{3} \lambda E a^2 \pi,$$

где  $\alpha$ - функция отношения ( $M_2/M_1$ );  $M_2$  – атомная масса иона,  $M_2 = 39.95$  (аргон);  $M_1$  – атомная масса материала мишени, для золота  $M_1 = 197$ , по табл. 1 [13] для Au  $\alpha = 0.2$ .  $U_0 = 3,79$  эВ – энергия поверхностного барьера, принятая равной теплоте сублимации табл. 11 [13].

Вид функции  $S_u(E)$  зависит от энергии иона. Для низких энергий ионов коэффициент распыления [13]

$$S = \frac{3\alpha\lambda E}{4\pi^2 U_0} = \frac{3 \cdot 0.2 \cdot 0.56 \cdot 400}{4\pi^2 \cdot 3.79} = 0.898 \sim 0.9 \text{ атм/ион}$$

$$\lambda = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{(4 \cdot 39.95 \cdot 197)}{(39.95 + 197)^2} = 0.56,$$

где  $\lambda$ -коэффициент передачи энергии, E=400 эВ-энергия иона,эВ.

Скорость распыления рассчитывается по формуле [14]:

$$V_p = \frac{j_H \cdot S \cdot M_2 \cdot 10^9}{q_e \cdot N_A \cdot \rho} = \frac{600 \cdot 0,9 \cdot 197 \cdot 10^9}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 6.02 \cdot 10^{26} \cdot 19320} = 57 \text{ (нм/с)}$$

где  $j_H$ - плотность ионного тока, А/м<sup>2</sup> ( $j_H=I/S=300/0.0005=600$  А/м<sup>2</sup>),  $q_e$ - заряд электрона ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл),  $N_A$ - число Авогадро ( $6.02 \cdot 10^{26}$  атом/кмоль),  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup> (для золота 19320 кг/м<sup>3</sup>).

Скорость осаждения пленки  $V_0$  зависит от эмиссионных характеристик источника и его площади распыления  $S_p$ , от угла распыления  $\varphi$ , угла конденсации  $\theta$ , расстояния между подложкой и мишенью  $r$ , коэффициента прилипания молекул осаждаемого материала к подложке  $\alpha_m$ .

Схема распыления представлена на рис. 7. Так как оси подложки и магнетрона совпадают примем  $\varphi = 0^\circ$  и  $\theta = 0^\circ$ . Расстояние между подложкой и мишенью магнетрона равно 100 мм. Коэффициент прилипания при установившемся процессе осаждения считается равным 1.

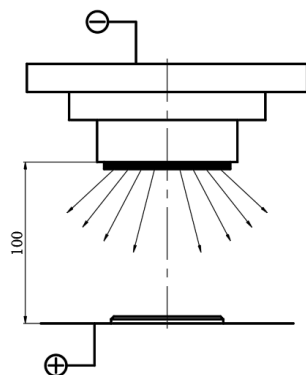


Рис. 7. Схема распыления покрытия.

$$V_0 = \frac{V_p \cdot S_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta \cdot \alpha_m}{\pi r^2} = \frac{57 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{\pi \cdot 0,1^2} = 0,9 \text{ нм/с}$$

где  $S_p = 0,0008 \text{ м}^2$  — площадь мишени.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполнения научно-исследовательской работы разработана модель магнетронной распылительной системы в среде Inventor Professional 2020. МРС расположена на фланце-крышке ISO-K 63 установки «Малютка». Разработанная МРС оснащена мишенью диаметром 25 мм. При типовом технологическом режиме коэффициент распыления мишени золота составляет 0,9 атм/ион, скорость распыления 57 нм/с, скорость нанесения 0,9 нм/с.

Разработаны рабочие чертежи элементов магнетрона, по которым были изготовлены детали.

Было установлено, что предпочтительнее использовать ферритовые магниты, так как температура их эксплуатации значительно выше неодимовых ( $250^\circ\text{C}$ ). Магнитное поле для лабораторной установки нужно использовать сбалансированное, так как данный тип поля характеризуется более высокими коэффициентами распыления мишени при меньших площадях напыления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юрьева А. В. Осаждение металлических покрытий с помощью магнетрона с жидкофазной мишенью: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07. - Томск, 2017. - 117 с.
2. Данилин Б. С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.
3. Современные методы высоковакуумного напыления и плазменной обработки тонкопленочных металлических структур. Вдовичев С. Н. Электронное учебно-

- методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 60 с.
4. Технология напыления тонких пленок [Электронный ресурс]: Время электроники – режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/49951/> (дата обращения: 10,12,2018).
  5. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: устройство, принцип работы, применение. – М.: изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 54 с.
  6. Галаганова Е.Н., Сотников Д.А. Получение нанокompозитных структур при магнетронном осаждении материала на коллоидные пленки кремнезема и исследование их свойств//Сборник XXVI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». – Крым, Судак, 2019. – С.167-172.
  7. Достанко А.П., Аваков С.М., Агеев О.А. Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники. - Минск: Беларуская наука, 2016. - 251 с.
  8. Hanley L., Sinnot S.B. The growth and modification of materials via ion-surface processing. Surf.Sci., 2002, v.500, p.500-522.
  9. Никитин М.М. Магнетронное распыление: эволюция схем напыления и ионизация потоков, взаимодействующих с подложкой // Физика и химия обработки материалов. - 2011. - №2.
  10. Clarke G.A, Osborne N.R., Parsons R.R. Magnetic field and sub-strate position effects on the ion/deposition flux ratio in magnetron sputter-ing. J.Vac.Sci.Technol.A, 1991, v.9, No.3, p.1166-1170.
  11. Магниты – [Электронный ресурс]: Научно-производственная компания МАГНИТЫ И СИСТЕМЫ – режим доступа: <https://magnet-prof.ru/index.php/Kupit-magnityi.html> (дата обращения 04.12.2019).
  12. Воронцов В. А. Определение параметров вакуумной установки и получение тонких пленок ионно-плазменными методами. Методические указания по выполнению лабораторных работ. М.2003.
  13. Плешивцев Н.В. Физические проблемы катодного распыления. М.: Издательство института атомной энергии им. И.В.Курчатова, 1979. 90 с.
  14. Панфилов Ю. В. Расчет режимов процесса нанесения тонких пленок в вакууме и параметров оборудования. Методические указания для выполнения домашнего задания по курсу «Элионные процессы». –М.: Типография МВТУ, 1998. – 19 с.