

**Исследование магнитной ловушки для магнетронной
распылительной системы**

Ф. С. Федотов, А. М. Телегин

Приведены результаты компьютерного и лабораторного моделирования магнитной распылительной системы (МРС), используемой для физического осаждения пленок в вакууме. Приведены рекомендации по выбору геометрических параметров МРС и значениям магнитного поля.

Ключевые слова: магниты, пленка, МРС, эрозия, магнитная ловушка.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-301-307

Введение

При изготовлении пленочных датчиков высокоскоростных микрочастиц используется технология физического нанесения металлических покрытий на слой диэлектрика [1, 2]. Магнетронная распылительная система (МРС) – это один из методов физического осаждения в вакууме (в англоязычной литературе – physical vapor deposition или PVD), где под вакуумом подразумевается разряженное состояние газовой среды в технологической камере при давлении не более 10 Па (0,1 Торр). Данный метод выгодно использовать для получения тонких плёнок из легкоплавких металлов [3]. На рисунке 1 представлен пример строения МРС планарного типа с постоянными магнитами и радиальным магнитным полем.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле, силовые

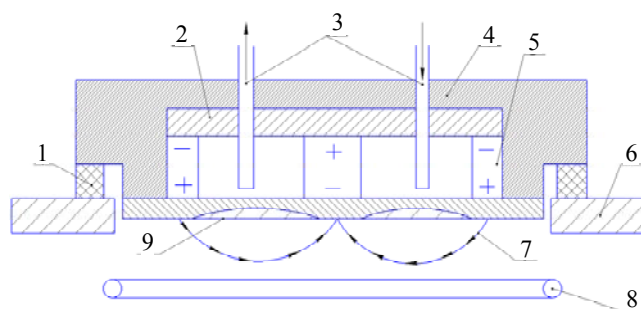


Рис. 1. МРС с плоским катодом: 1 – изолятор; 2 – магнитопровод; 3 – система водоохлаждения; 4 – корпус катодного узла; 5 – постоянные магниты (образуют магнитную ловушку); 6 – стенка вакуумной камеры; 7 – силовые магнитного поля; 8 – кольцевой водоохлаждаемый анод; 9 – зона эрозии распыляемого катода (мишени)

вые линии которого скрещиваются с силовыми линиями магнитного поля. В условиях тлеющего разряда эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки вторичные электроны совершают в магнитном поле сложное движение у поверхности катода по траекториям, близким к циклоидальным. При этом электроны оказываются в своеобразной ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой – поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны перемещаются в ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа. В дальнейшем они диффундируют через плазму к аноду. Таким образом, большая

Федотов Федор Сергеевич¹, инженер-конструктор.
Телегин Алексей Михайлович^{1,2}, с.н.с., доцент,
к.ф.-м.н.

E-mail: talex85@mail.ru

¹ Институт космического приборостроения (ИКП–214).
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34а.² Самарский университет.

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Статья поступила в редакцию 19 мая 2022 г.

© Федотов Ф. С., Телегин А. М., 2022

часть энергии электрона расходуется на ионизацию в непосредственной близости от катода, где создается высокая концентрация положительных ионов. В результате повышается интенсивность бомбардировки катода ионами, скорость распыления и, соответственно, скорость осаждения материала на поверхность подложки [4].

Магнитной ловушкой для МРС является подсистема, магнитные поля которой способны удерживать плазму около мишени. Обычно она состоит из электромагнитов или постоянных магнитов. В данной работе будет описан подбор магнитной ловушки для МРС, так как неправильно подобранная магнитная ловушка может привести к ее перегреву с последующим разрушением (рис. 2), а также отсутствию процесса напыления.

В работе примем, что \bar{B}_n – нормальная составляющая магнитной индукции, перпендикулярна плоскости катода; \bar{B}_t – тангенциальная составляющая магнитной индукции, параллельна плоскости катода.



Рис. 2. Лопнувшая магнитная ловушка

Анализ конструкций магнитных ловушек

Для проведения экспериментов были собраны три магнитные ловушки, конструкции которых представлены на рисунках 3–5, а параметры приведены в таблицах 1, 2. Помимо магнитов в подсистемах использовалась подставка из магнитомягкой стали толщиной 9 мм.

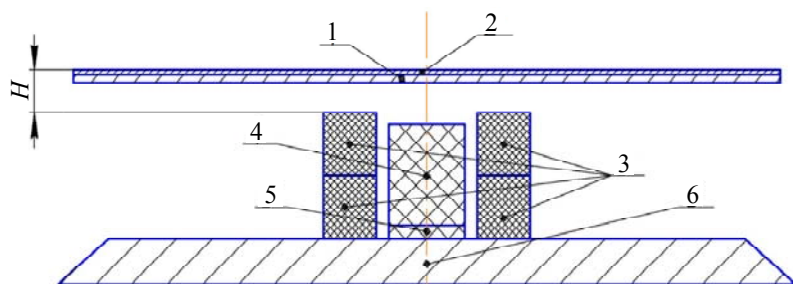


Рис. 3. Система С.1: 1 – латунный диск диаметром 140 мм; 2 – медная мишень того же диаметра; 3 – кольцевые магниты 41×20×12,5 мм; 4 – цилиндрический магнит 15×20 мм; 5 – магнит-диск 15×2,6 мм; 6 – магнитомягкая сталь

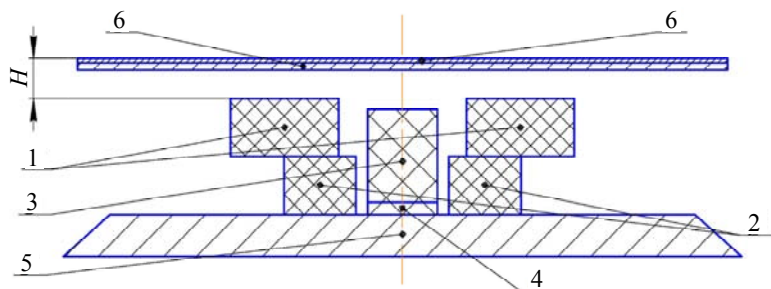


Рис. 4. Система С.2: 1 – магнит-кольцо 74×27,5×12,5 мм; 2 – магнит-кольцо 41×20×12,5 мм; 3 – магнит-цилиндр 15×20 мм; 4 – магнит-диск 15×2,6 мм; 5 – магнитомягкая сталь; 6 – латунный диск; 7 – медная мишень

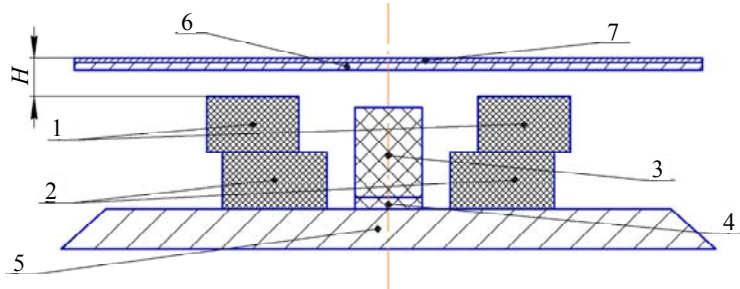


Рис. 5. Система С.3: 1 – магнит-кольцо 81×40×12,5 мм; 2 – магнит-кольцо 74×27,5×12,5 мм; 3 – магнит-цилиндр 15×20 мм; 4 – магнит-диск 15×2,6 мм; 5 – магнитомягкая сталь; 6 – латунный диск; 7 – медная мишень

Таблица 1

Характеристики систем, полученные с помощью программы FEMM

	С.1	С.2	С.3
Максимальная $ \bar{B}_i $ внутри системы, Тл	0,030184052	0,047198535	0,050958819
Ширина зоны, в которой $ \bar{B}_i > \bar{B}_n $ внутри системы, мм	–	8,22	10,79
Максимальная $ \bar{B}_n $ в центре системы, Тл	0,049399023	0,067862509	0,078421834
Максимальная $ \bar{B}_n $ на краю системы, Тл	0,037917363	0,064306376	0,076603271
Максимальная $ \bar{B}_i $ на краю системы, Тл	0,020349466	0,047395877	0,055975881
Высота Н, мм	8,5	8,5	8,5
Расстояние от центра до места $ \bar{B}_i > \bar{B}_n $, мм	–	6,44	7,56

Таблица 2

Состав систем (цифры 1 и 2 – количество штук)

Материал	Состав				
	У30 (код материала из феррита)			N33 (код материала из Неодим-Железо-Бор)	
Системы	41×20×12,5	74×27,5×12,5	81×40×12,5	15×20	15×2,6
С.1	2	–	–	1	1
С.2	1	1	–	1	1
С.3	–	1	1	1	1

Поверхность мишени находилась от торца системы на расстоянии 8,5 мм. Латунный диск, на котором расположена система, установлен на латунных заземленных подставках, в результате мишень имела нулевой потенциал.

С системой С.1 не была сформирована магнитная ловушка, а, следовательно, мишень процесса напыления не происходило. С системами С.2 и С.3 МРС была сформирована магнитная ловушка.

Система С.1 состоит из двух колец внешним диаметром 41 мм, внутренним диаметром 20 мм, высотой 12,5 мм из материала с кодом У30; цилиндра диаметром 15 мм и высотой 20 мм и диском диаметром 15 мм и высотой 2,6 мм из материала с кодом N33.

Система С.2 состоит из колец внешним диаметром 41 и 74 мм, внутренним диаметром 20 и 27,5 мм соответственно, высотой оба 12,5 мм из материала с кодом У30; цилиндра диаметром 15 мм и высотой 20 мм и диском диаметром 15 мм и высотой 2,6 мм из материала с кодом N33.

Система С.3 (разрушенная система) состоит из: колец внешним диаметром 81 и 74 мм, внутренним диаметром 40 и 27,5 мм соответственно, высотой оба 12,5 мм из материала с кодом У30; цилиндра диаметром 15 мм и высотой 20 мм и диском диаметром 15 мм и высотой 2,6 мм из материала с кодом N33.

Предварительно было проведено моделирование магнитных полей с использованием пакета программ FEMM (Finite Element Method Magnetics), в основе которого лежит метод конечных элементов. FEMM представляет собой набор программ для решения низкочастотных электромагнитных, токовых и тепловых задач в двухмерной плоской и осесимметричной областях [5–7]. На рисунке 6 отображает распределение тангенциальной и нормальной составляющих магнитной индукции от центра системы в радиусе 70 мм по поверхности к краю мишени. На основе полученных данных была заполнена таблица 1.

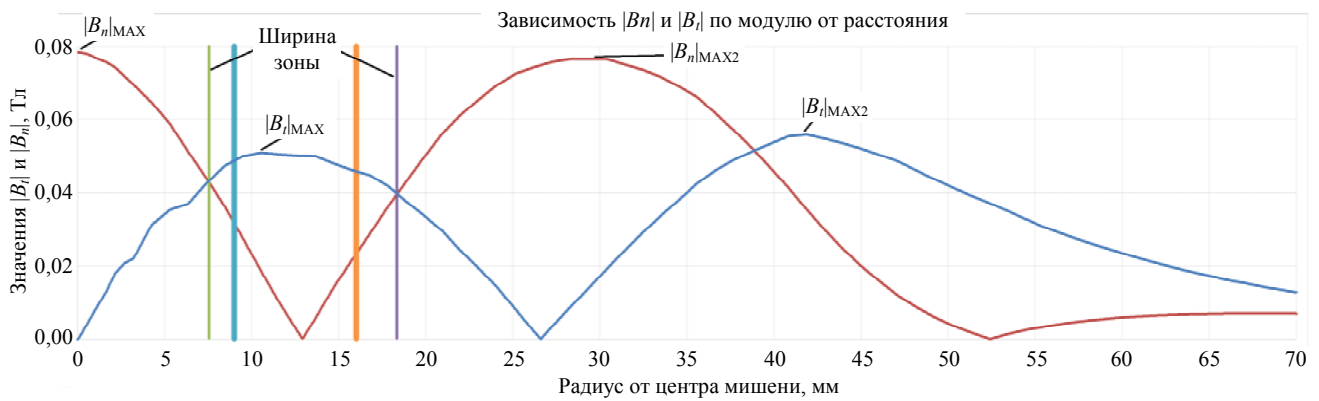


Рис. 6. Распределение тангенциальной и нормальной составляющих магнитной индукции от центра система к краю: $|B_n|_{MAX}$ – максимальная по модулю нормальная составляющая в центре системы; $|B_n|_{MAX2}$ – максимальная по модулю нормальная составляющая на краю системы; $|B_t|_{MAX}$ – максимальная по модулю тангенциальная составляющая магнитной индукции внутри системы; $|B_t|_{MAX2}$ – максимальная по модулю тангенциальная составляющая на краю системы; Ширина зоны – расчетная ширина зоны, в которой преобладает тангенциальная составляющая магнитной индукции внутри системы над нормальной

Экспериментальное исследование

После предварительного численного моделирования было проведено экспериментальное исследование.

Эксперименты проводились следующим образом:

1. В стеклянную колбу на заданном расстоянии от подложкодержателя, на который подавалось анодное напряжение, была установлена магнитная система;

2. Происходило откачивание воздуха из колбы с помощью пластинчато-роторного вакуумного двухступенчатого насоса НВПР-16-066 1989 года выпуска;

3. Измерения давления в камере производились манометрическим термопарным преобразователем ПМТ-4М, показания с которого считывались с помощью вакуумметра ионизационно-термопарного ВИТ-2;

4. При достижении давления 2–3 Па на анод подавалось напряжение положительной полярности, полученное с помощью трансформатора от микроволновой печи (напряжение на первичной обмотке регулировалось с помощью лабораторного автотрансформатора мощностью 2,5 кВт), выпрямленное через диодный мост, сглаживаемое после моста конденсатором на 1 мкФ × 5 кВ;

5. Установка работала при средней продолжительности 30 минут, а потом отключалась. Ток составлял примерно от 0,2 до 0,3 А, так как при более высоких токах происходил сильный нагрев трансформатора, анода и магнитной системы.

Результаты исследования магнитной системы для С.2 и С.3 приведены на рисунках 7–9.

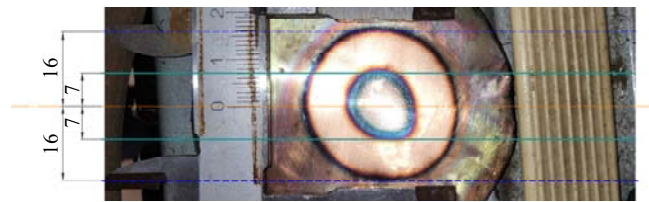


Рис. 7. Результаты распыления магнитной системы С.2 при однократном эксперименте

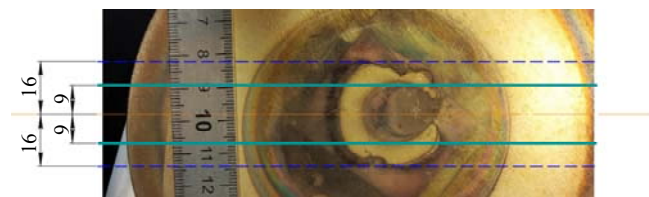


Рис. 8. След от эрозии латунного диска под мишенью с подсистемой С.3 при неоднократном повторении эксперимента



Рис. 9. Сама мишень после распыления МРС с подсистемой С.3 при неоднократном повторении эксперимента

Сравнивая значения, полученные с помощью компьютерного и экспериментального моделирования, можно отметить, что:

1) для С.2 область распыляемого материала пересекается с зоной, где $|\bar{B}_t| > |\bar{B}_n|$, с небольшим смещением по границам не больше 2 мм;

2) для С.3 область следа от эрозии латунного диска под мишенью полностью входит в зону, где $|\bar{B}_t| > |\bar{B}_n|$.

Заключение

Вывод 1: Анализируя расчетную ширину зоны распыления, полученную с помощью программы моделирования FEMM, и зону эрозии на мишени, можно утверждать, что в расчетной зоне, где значение тангенциальной составляющей по модулю преобладает над нормальной составляющей по модулю, будет распыление и ширина зоны будет почти равна расчетной с погрешностью ± 2 мм для левой и правой границы. Данный вывод соответствует теории, приведенной в работах [8, 9], о том, что наибольшее значение тангенциальной составляющей магнитного поля достигается под аркой силовых линий там же, где происходит максимальная выработка катода.

Таким образом, можно утверждать, что глубина эрозии в мишени и форма примет такой вид как на рисунке 10 [8].

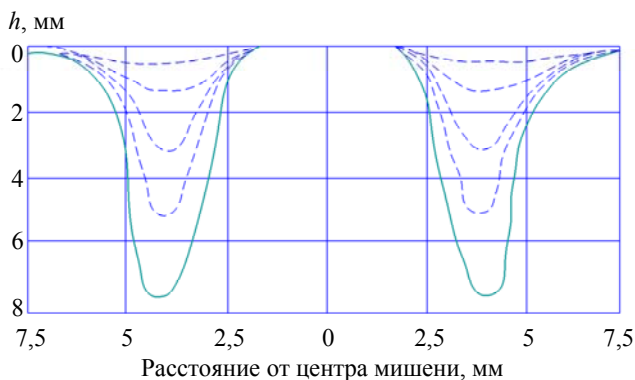


Рис. 10. Изменение глубины эрозии планарного магнетрона с круглой мишенью в процессе напыления (данный рисунок показан для представления формы эрозии, а не для фиксации конкретных значений ширины зоны распыления) [8]

Вывод 2: Система С.2 имеет максимальную по модулю тангенциальную составляющую магнитной индукции внутри системы равную $\approx 0,03$ Тл, что согласно работе [9] является нижней границей магнитной индукции для зажигания разряда, поэтому можно сделать вывод, что в реальности магниты имеют свойства немного слабее, чем при расчете в FEMM, следовательно, в реальной ситуации возможно, что реальное значение лежит в диапазоне $0,0255 \div 0,0285$ Тл (соответствует погрешности 15 % и 5 %). Предполагая такое допущение, выбирается диапазон для тангенциальной составляющей из диапазона от 0,03 до 0,15 Тл [9].

Вывод 3: Сравнивая графики и наблюдения при экспериментах, можно сделать вывод, что при увеличении $|B_t|_{\text{MAX2}}$ выше нижнего порога (выше 0,03 Тл) возможна следующая ситуация: появление второго кольца распыления, что отображено на рисунке 11. В зависимости от необходимых требований появление кольца может иметь как положительные, так и отрицательные последствия. Если мишень и МРС по диаметру больше, чем 140 мм (для исследуемых случаев), то $|B_t|_{\text{MAX2}} > 0,03$ Тл имеет положительный эффект. Если мишень по диаметру меньше, чем 140 мм, то $|B_t|_{\text{MAX2}} > 0,03$ Тл несёт негативный характер: начинается распыление деталей МРС, например, прижимного кольца, которое фиксирует мишень, что приводит к смещению распыляемого состава и изменению свойств тонких плёнок на подложке. В реальности, так как мишень была меньше латунного диска, было распыление диска с характерными следами небольшой эрозии поверхности, вследствие появления второй магнитной ловушки.



Рис. 11. Появление эрозии на латунном кольце (выделено синими линиями, слева) при проведении одного из экспериментов (слева) и сам эксперимент (справа)

Таким образом, в мишенях меньше размеров магнитной системы необходимо соблюдение $|B_t|_{\text{MAX2}} < 0,035$ Тл (при учете 15 % погрешности).

Вывод 4: При условии, что максимальное остаточное давление около 1–2 Па, необходима несбалансированная система с сильным магнитным боковым полем (рисунок 12), а именно: должны быть места с $|B_n|_{\text{MAX2}} > 0$ и $|B_t| < |B_n|_{\text{MAX2}}$.

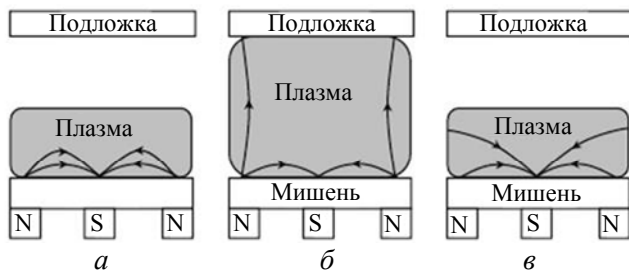


Рис. 12. MPC с плоской мишенью и различными конфигурациями магнитного поля [3]: а – сбалансированная магнитная система; б – несбалансированная с вертикальной составляющей поля, направленной к подложке; в – несбалансированная с рассеиванием магнитного поля в сторону от подложки

На основе проведенных исследований предлагается выбирать высоту магнитной системы от 1 до 20 мм; значение максимальной тангенциальной составляющей магнитной индукции на заданной высоте внутри системы (от 7,5 до 10 мм) – от 0,03 до 0,15 Тл; внешний

диаметр магнитной системы – от 2 до 90 мм; значение максимальной тангенциальной составляющей магнитной индукции на краю системы должен быть меньше 0,35 Тл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семкин Н. Д., Калаев М. П., Телегин А. М., Пьяков А. В., Родин Д. В. // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 104.
2. Воронов К. Е., Григорьев Д. П., Телегин А. М. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 3. С. 245.
3. Кузьмичёв А. И. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008.
4. Архипов А. В., Дмитриев В. Д., Волков А. В., Лофицкий И. В. Изучение оборудования и технологии нанесения слоев методом магнетронного распыления материалов: методические указания. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2001.
5. Альтман А. Б. Постоянные магниты. Справочник. – М.: Энергия, 1980.
6. Королёв Ю. Д. Элементарные и кинетические процессы в газоразрядной плазме: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008.
7. Байда Е. И. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM. – Харьков: издательство НТУ «ХПИ», 2015.
8. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. Духопельников Д. В. Магнетронные распылительные системы: учеб. пособие: в 2 ч. – Ч. 1: Устройство, принцип работы, применение. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2014.

PACS: 52.

Study of a magnetic trap for a magnetron sputtering system

F. S. Fedotov¹ and A. M. Telegin^{1,2}

¹ Institute of Space Instrumentation (IKP–214)
34a Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

² Samara University
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
E-mail: talex85@mail.ru

Received May 19, 2022

The article presents the results of computer and laboratory simulation of a magnetic sputtering system used for the physical deposition of films in vacuum. Recommendations are

given on the choice of the geometrical parameters of the MRS and the values of the magnetic field.

Keywords: magnets, film, MRS, erosion, magnetic trap.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-301-307

REFERENCES

1. N. D. Semkin, M. P. Kalaev, A. M. Telegin et al., *Applied Physics*, No. 2, 104 (2012) [in Russian].
2. K. E. Voronov, D. P. Grigorev, and A. M. Telegin, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (3), 245 (2021) [in Russian].
3. A. I. Kuzmichyov, *Magnetronnye raspylitelnye sistemy. Kniga 1. Vvedenie v fiziku i tekhniku magnetronnogo raspyleniya.* (Avers, Kiev, 2008) [in Russian].
4. A. V. Arhipov, V. D. Dmitriev, A. V. Volkov, and I. V. Lofickij, *Izuchenie oborudovaniya I tekhnologii naneseniya sloev metodom magnetronnogo raspyleniya materialov. Metodicheskie ukazaniya.* (Samarskij gosudarstvennyj aehrokosmicheskij universitet, Samara, 2001).
5. A. B. Altman, *Postoyannye magnity. Spravochnik.* (Ehnergiya, Moscow, 1980) [in Russian].
6. Yu. D. Korolyov, *Ehlementarnye I kineticheskie processy v gazorazryadnoj plazme. Uchebnoe posobie.* (Izdatelstvo tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Tomsk, 2008) [in Russian].
7. E. I. Bajda, *Raschet ehlektromagnitnyh I teplovyh polej s pomoshchyu programmy femm.* (Izdatelstvo Ntu-hpi, Harkov, 2015) [in Russian].
8. B. S. Danilin, *Primenenie niskotemperaturnoj plazmy dlya naneseniya tonkih plenok.* (Ehnergoatomizdat, Moscow, 1989) [in Russian].
9. D. V. Duhopelnikov, *Magnetronnye raspylitelnye sistemy. Ucheb. Posobie.v.2-ch. ch.1. Ustrojstvo.princip raboty, primenenie.* (Izdatelstvo MGTU im Baumana, Moscow, 2014) [in Russian].