

СНИЖЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОТЯЖЕННОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ КАТОДОМ

³И. А. Сечко, ¹В. М. Комаровская, ²А. С. Пологов, ¹О. И. Терещук,

¹Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

²ООО «Изовак», Бюро ионно-лучевых технологических устройств,
г. Минск, Республика Беларусь

³Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Проведено исследование распределения напряженности магнитного поля над поверхностью магнитной системы цилиндрического магнетрона. Показано, что применение шунтирующей накладки из магнитной стали марки SUS 420 J2 позволяет повысить однородность получаемого магнитного поля, что непосредственно влияет на равномерность напыляемых покрытий. При этом толщина накладки не влияет на ее выравнивающую способность, а с увеличением ее толщины снижается величина магнитной индукции над магнитными полюсами. Результаты физико-математического моделирования подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: цилиндрический магнетрон, магнетронное напыление, шунтирующая накладка, распределение, однородность, магнитное поле

REDUCING THE NONUNIFORMITY OF THE MAGNETIC FIELD IN AN EXTENDED MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM WITH A ROTATING CYLINDRICAL CATHODE

³I. A. Secko, ¹V. M. Komarovskaya, ²A. S. Pologov, ¹O. I. Tereshchuk,

¹Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

²LLC «Izovac» Bureau of Ion Beam Technology Devices,
Minsk, Republic of Belarus

³Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

A study was made of the distribution of the magnetic field over the surface of the magnetic system in cylindrical magnetron. It is shown that the use of a magnetic steel grade SUS 420 J2 shunt makes it possible to increase the uniformity of the resulting magnetic field,

which directly affects the uniformity of the sputtering coatings. At the same time, the thickness of the shunts does not affect its leveling ability, and with an increase in its thickness, the magnitude of the magnetic induction over the magnetic poles decreases. The results of physical and mathematical modeling are confirmed experimentally.

Key words: cylindrical magnetron, magnetron sputtering, magnetic shunt, distribution, uniformity, magnetic field

e-mail: phti@tut.by

ВВЕДЕНИЕ

Протяженные магнетронные распылительные системы (ПМРС) с вращающимся цилиндрическим катодом предназначены для использования в высокопроизводительных вакуумных технологических установках для нанесения покрытий из металлов и их соединений на подложки большой площади.

Конструктивно ПМРС (рис. 1) представляет собой трубу, выполненную из распыляемого металла, имеющую диаметр 60–120 мм и длину до 2,5 м. Внутри мишени (катода) расположены магнитная система на основе постоянных магнитов и каналы для протока охлаждающей воды. Через систему уплотнений катод магнетрона вращается относительно магнитов, при этом в зону распыления попадают новые участки катода.

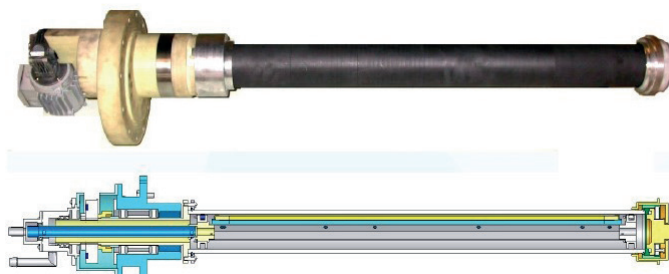


Рис. 1. Цилиндрический магнетрон

Преимуществом цилиндрических магнетронов по сравнению с традиционными планарными магнетронами является высокая степень использования материала мишени – до 80 % [1, 2].

Равномерность покрытия, получаемого магнетронным распылением, напрямую зависит от степени однородности напряженности магнитного поля, создаваемого магнитной системой. В работе [3] показано влияние магнитного поля на равномерность осаждаемых на полимерную подложку ИТО (оксид индия – олова) покрытия. При этом для выравнивания значений магнитной индукции по всей длине магнитной системы использовалась предварительная сортировка магнитов (для планарного магнетрона) и дополнительное выравнивание магнитного поля с помощью пластин из магнитомягкой стали толщиной 2 мм.

В литературе [4] упоминается об использовании и влиянии накладок-шунтов на распределение и равномерность напряженности магнитного поля.

Все это указывает на актуальность исследований, направленных на моделирование и разработку магнитных систем МРС для повышения однородности напряженности магнитного поля, что напрямую влияет на равномерность получаемых магнетронным распылением покрытий. Приведенные выше исследования касались только планарных магнетронов, цилиндрические типы МРС не рассматривались. В данной работе смодели-

лирована и разработана магнитная система для цилиндрического магнетрона в значительной степени снижающая неравномерность напряженности магнитного поля.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование проводилось в среде COMSOL Multiphysics на базе бюро ИЛТУ ООО «Изовак».

Для расчета распределения силовых линий магнитного поля в пространстве использовались следующие уравнения [5]:

Закон Гаусса для магнитного поля:

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (1)$$

где ∇ – оператор набла;

B – вектор магнитной индукции, Тл.

Магнитная индукция определяется по следующему уравнению:

$$B = \mu_0 \cdot (H + M), \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

H – напряженность магнитного поля, А/м;

M – вектор намагниченности, А/м.

Для материалов с известной относительной магнитной проницаемостью μ :

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H. \quad (3)$$

Напряженность магнитного поля вычисляется по уравнению:

$$H = -\nabla \cdot V_m, \quad (4)$$

где V_m – скалярный потенциал магнитного поля.

Используя уравнения (2) и (4) закон Гаусса для магнитного поля принимает вид:

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \cdot \nabla \cdot V_m - \mu_0 \cdot M) = 0. \quad (5)$$

В данной работе все расчеты проводятся при соблюдении условия отсутствия протекающих токов в расчетной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Первый этап исследования включал математическое моделирование магнитного поля, образованного двухполюсной линейной магнитной системой длиной 500 мм, составленной из девяти магнитов. На рис. 2 представлена модель данной магнитной системы.

При моделировании задавались начальные ограничивающие условия:

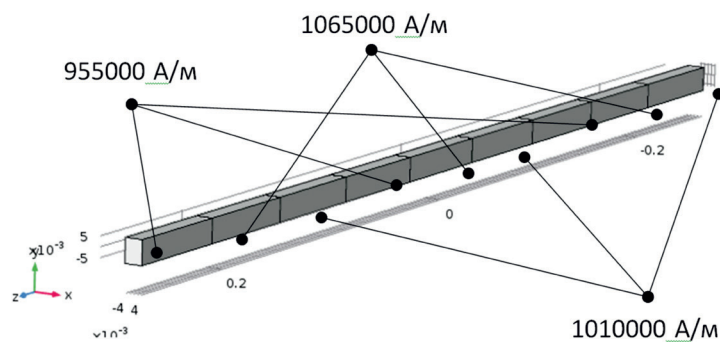
– магнитная система состоит из трех видов чередующихся магнитов со следующими показаниями намагниченности: 955 000, 1 010 000 и 1 065 000 А/м. Все значения задавались по таблицам рекомендованных отклонений напряженности магнитного поля [6]. Таким образом закрывался весь возможный спектр отклонений по значениям намагниченности, который может возникнуть в одной партии магнитов: минимальное, номинальное и максимальное (в соответствии с паспортными характеристиками).

– каждый вид магнитов представлен тремя единицами;

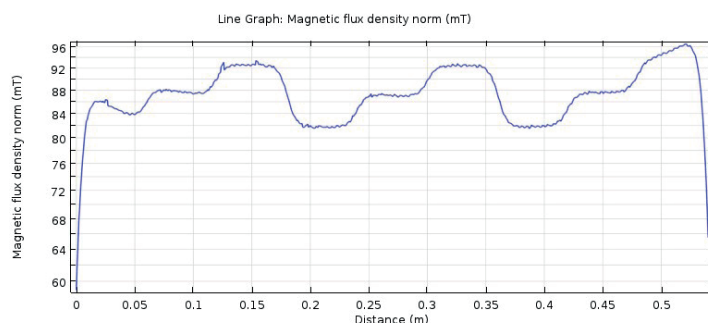
– длина магнитной системы – 550 мм;

– измерения проводились на расстоянии 15 мм от верхней плоскости магнитной системы в ее среднем сечении.

Из графика изменения величины магнитной индукции по длине системы (рис. 2б) наглядно видна неравномерность величины нормальной составляющей магнитной индукции B_n : ее величина уменьшается над плоскостью магнитов с наименьшим значением намагниченности и возрастает над магнитами с большим значением.



а



б

Рис. 2. Модель линейной двухполюсной магнитной системы:
 а – модель магнитной системы с чередующимися прямоугольными магнитами; б – изменение нормальной составляющей магнитной индукции B_n по длине магнитной системы

На втором этапе моделирования определяли возможность выравнивания равномерности напряженности магнитного поля при использовании накладок с различной толщиной.

На рис. 3а показана модель магнитной системы с применением накладки из магнитной нержавеющей стали марки SUS 420 J2. Начальные условия не менялись, измерения проводились на расстоянии 15 мм от накладки.

Графики, изображенные на рис. 3б наглядно показывают сглаживание нормальной составляющей магнитной индукции в промежутке с 50 до 450 мм, в сравнении с графиком на рис. 2б. Следует отметить, что на представленных графиках наблюдаются некоторые отклонения на торцах, что обусловлено краевыми эффектами. Из графиков на рис. 3б видно, что при увеличении толщины накладки среднее значение величины B_n снижается:

– толщина накладки $h = 4$ мм, нормальная составляющая магнитной индукции $B_n = 55$ мТл;

– $h = 3$ мм, $B_n = 58$ мТл;

– $h = 3$ мм, $B_n = 62$ мТл;

– $h = 1$ мм, $B_n = 67$ мТл.

При этом степень сглаживания нормальной составляющей магнитной индукции по длине системы не зависит от толщины накладки, что также видно из графика.

Проведенное моделирование позволило сделать следующие выводы:

– применение выпрямляющей магнитопроводящей накладки при проектировании магнитных систем позволяет уменьшить степень неравномерности напряженности магнитного поля;

- увеличение толщины накладки более 1 мм не дает пропорционального увеличения выпрямления среднего значения величины магнитной индукции магнитного поля по длине магнитной системы;
- увеличение толщины накладки приводит к уменьшению индукции магнитного поля над поверхностью магнитной системы.

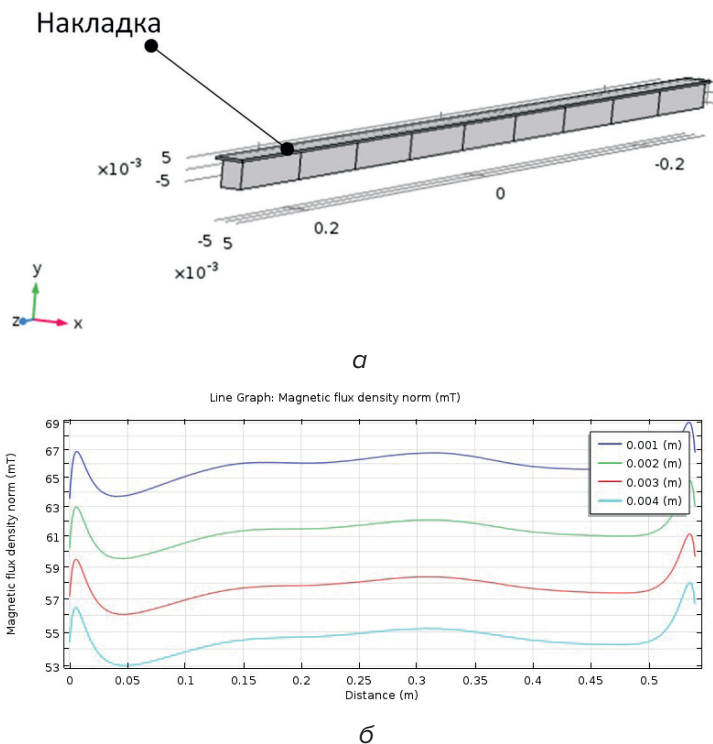


Рис. 3. Графики изменения нормальной составляющей магнитной индукции для различных толщин накладок из магнитной стали:

а – модель магнитной системы с чередующимися прямоугольными магнитами и накладкой-шунтом; *б* – график изменения нормальной составляющей магнитной индукции B_n по длине магнитной системы для различных толщин накладок

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО МАГНЕТРОНА

По результатам предварительного исследования линейной магнитной системы была выявлена целесообразность возможного применения выпрямляющих накладок и для магнитных систем цилиндрических магнетронов.

На рис. 4 представлена модель магнитной системы цилиндрического магнетрона.

Магнитная система симметрична относительно центральной плоскости, поэтому для увеличения скорости вычислений модель в среде COMSOL Multiphysics имеет вид одной половины системы. Далее использовался прием «отражение» для обеспечения наглядной визуализации полученных графиков.

Данная магнитная система представляет собой магнитопровод, на котором расположены набранный из постоянных магнитов центральный полюс, два внешних полюса, имеющих наклон относительно центрального в 15° , а также торцевые магниты. Данной магнитной системой создается протяженное дугообразное магнитное поле.

Моделирование распределения магнитных силовых линий и измерение величин напряженности магнитного поля, создаваемых магнитной системой, проводилось относительно продольного (рис. 5а) и поперечного сечения (рис. 5б), а также по дугообразной траектории над поверхностью цилиндрической мишени (рис. 5в).

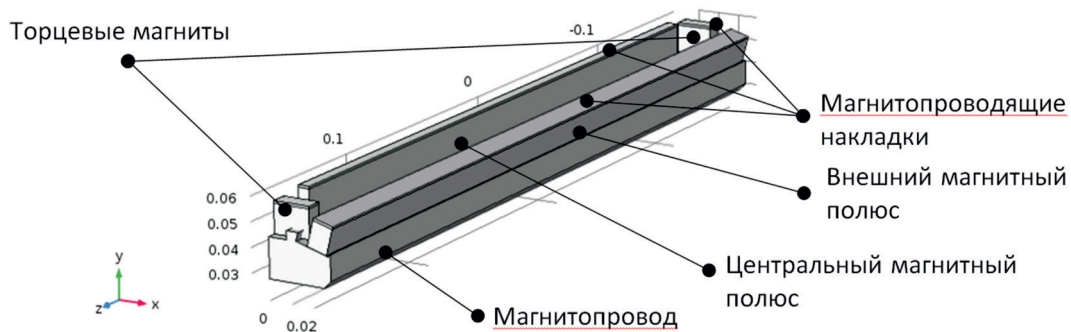


Рис. 4. Трехмерная модель магнитной системы цилиндрического магнетрона

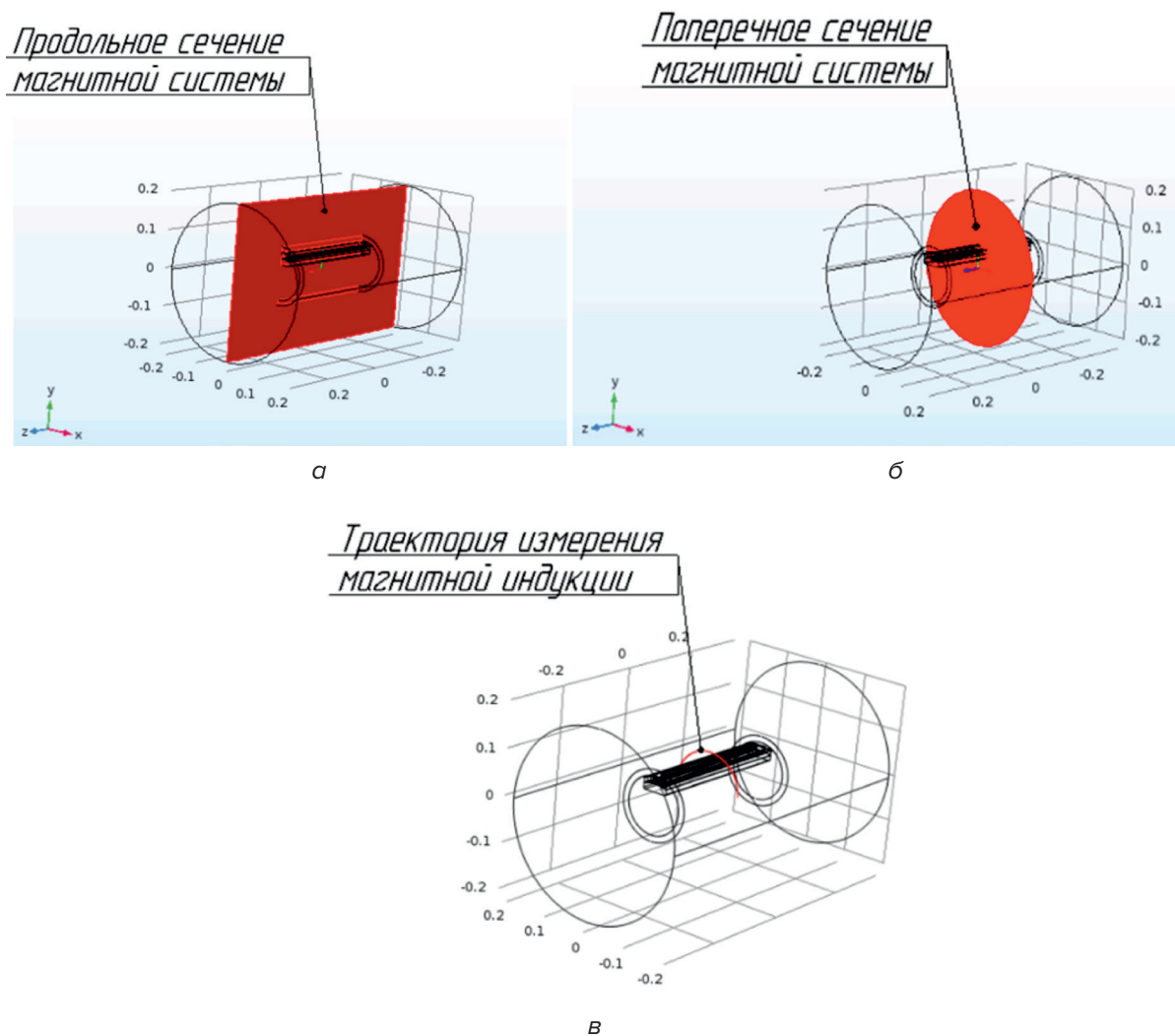


Рис. 5. Плоскости измерений рассчитанных параметров магнитного поля:
 а – продольное сечение; б – поперечное сечение; в – траектория измерения радиальной (нормальной) составляющей индукции магнитного поля для модели магнитной системы

Моделирование проводилось сразу для двух систем: с накладкой и без нее, в характерных сечениях для выяснения привносимых искажений в распределение силовых линий магнитного поля накладкой-шунтом.

На рис. 6 показаны силовые линии магнитного поля в продольном и поперечном сечении для магнитной системы без накладки (а, в) и с ней (б, г).

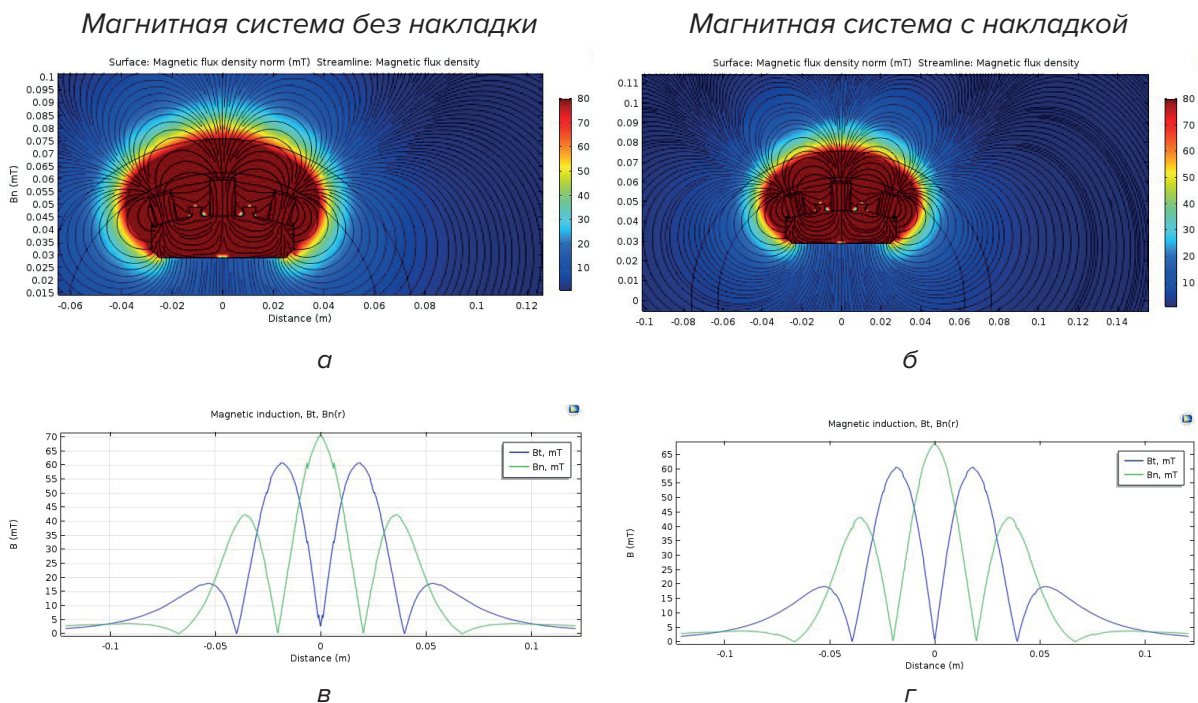


Рис. 6. Графики распределения силовых линий магнитного поля и величин магнитной индукции: а, б – характер распределения силовых линий магнитного поля в поперечном сечении; в, г – графики величин нормальной B_n и тангенциальной B_t составляющих магнитной индукции по измеряемой дуговой траектории

Моделирование показало, что применение накладки, ввиду ее малой толщины и большого значения относительной магнитной проницаемости $\mu_r = 9\ 000$, не влияет на распределение силовых линий магнитного поля и величины тангенциальной и нормальной (радиальной) составляющей магнитной индукции, измеренные по траектории, указанной на рис. 5в.

На рис. 7 представлены результаты измерения величины магнитной индукции на расстоянии 15 мм от верхней плоскости выпрямляющей накладки.

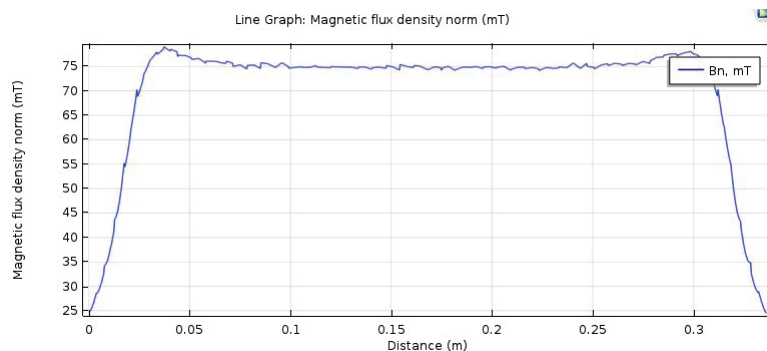


Рис. 7. Графики измерения нормальной составляющей магнитной индукции в поперечном сечении магнитной системы

Как видно из приведенного на рис. 7 графика, значение нормальной составляющей магнитной индукции в поперечном сечении физико-математической модели составляет $B_n = 75$ мТл.

Автор работы [7] указывает, что минимально необходимое поле над мишенью, обеспечивающее стабильное горение плазменного разряда, составляет 30–35 мТл. Таким образом, приведенные в данной статье результаты свидетельствуют о возможности практического применения выпрямляющих накладок для улучшения характеристик магнитного поля магнитной системы цилиндрического магнетрона.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

По результатам физико-математического моделирования магнитной системы разработаны и изготовлены образцы магнитных систем с применением выпрямляющей накладки. На рис. 8 представлена готовая магнитная система с выравнивающими накладками на всех полюсах.

Магнитная система представляет собой магнитопровод с закрепленными на нем полюсами, набранными из постоянных неодимовых NdFeB магнитов. На каждом полюсе в свою очередь закреплена накладка из нержавеющей стали марки SUS 420 J2.

Для проверки результатов теоретических расчетов и моделирования применялся измерительный стенд SATA 136D-L20-S400-M2-P200W, изображение которого представлено на рис. 9.



Рис. 8. Изготовленная магнитная система цилиндрического магнетрона:
1, 2, 3, 4, 5 – линии измерения; 1, 5 – крайние полюса; 2, 4 – линии трека; 5 – линия центрального полюса



Рис. 9. Измерительный стенд

Измерительный стенд имеет в своем составе показанный на рис. 10 высокочувствительный датчик измерения магнитной индукции по трем декартовым осям: X, Y, Z, а также по пяти линиям измерения, указанным на рис. 8.

Главным измерительным элементом стенда является плоский щуп с установленным на его конце датчиком Холла, соединенный с микроконтроллером. С помощью шаговых электродвигателей держатель щупа с большой точностью позиционируется над измеряемой точкой магнитной системы. На щуп, являющимся проводником, постоянно подается тестовый ток. Когда ток проходит через проводник, расположенный под прямым углом к магнитному полю, электроны скапливаются на одном конце щупа из-за воз-

действия магнитной силы. Несбалансированная концентрация электронов создает измеряемое напряжение, которое прямо пропорционально силе магнитного поля и току, но обратно пропорционально плотности заряда и толщине проводника. Данный эффект известен как эффект Холла. Возникающее напряжение регистрируется измерительной микросхемой, чей выходной сигнал после преобразования выдается на дисплей персонального компьютера оператора. Перемещая данный щуп вдоль линий указанных на рис. 8, с высокой точностью были проведены измерения магнитного поля на изготовленных магнитных системах.

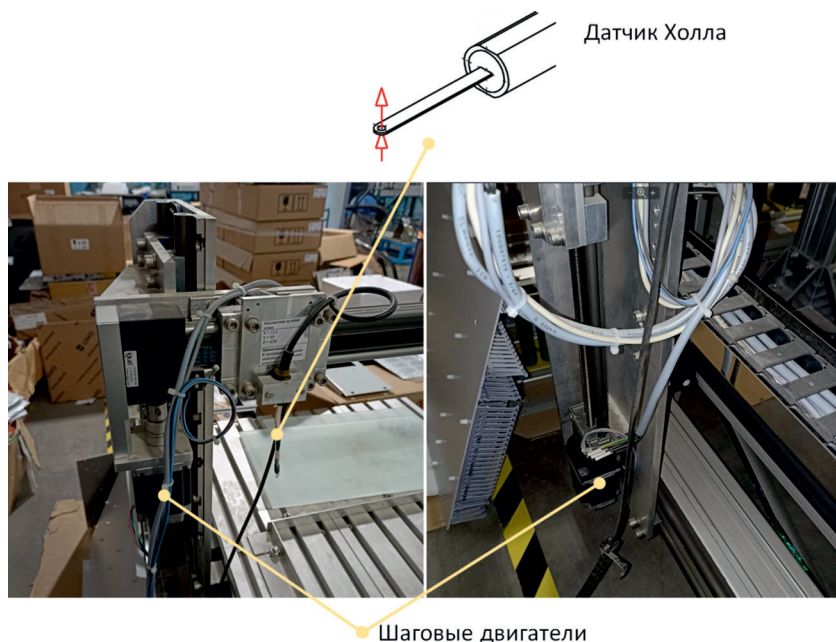


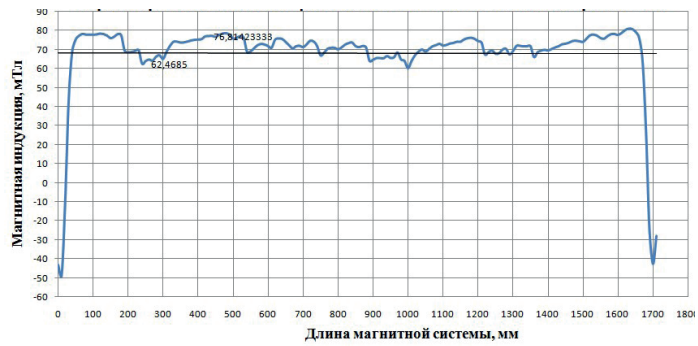
Рис. 10. Рабочие элементы измерительного стенда

На данном стенде устанавливалась магнитная система предварительно без накладки, затем с накладкой. Проводили девять замеров каждой системы, затем вычислялись средние значения, по которым были построены графики, представленные на рис. 11.

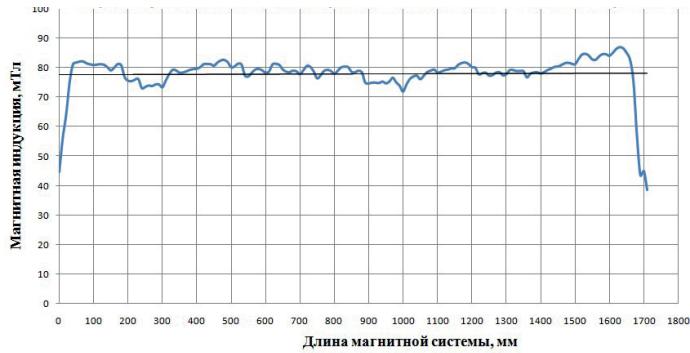
На рис. 11 представлены графики измерений только по характерной линии № 3 над центральным полюсом, на высоте 15 мм, так как данный полюс вносит наибольший вклад в составляющую возникающего магнитного поля и суммарное значение магнитной индукции всей системы.

Из графиков видно, что при применении накладки значительно снижается неравномерность магнитной индукции над центральным полюсом: при рассмотрении участка магнитной системы с 200 до 600 мм неравномерность магнитного поля в системе без накладки составляет около 15 %, при применении накладки на этом же участке неравномерность уменьшается до 3 %.

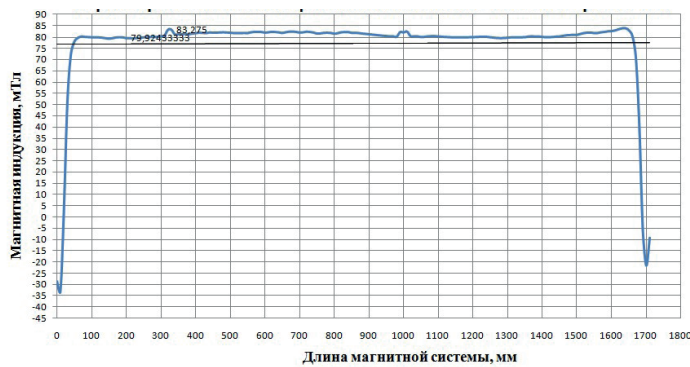
При сравнении графика из рис. 11в с графиком, показанным на рис. 7 видна согласованность полученных практических результатов измерений с теоретическими. Погрешность составляет не более 5 %.



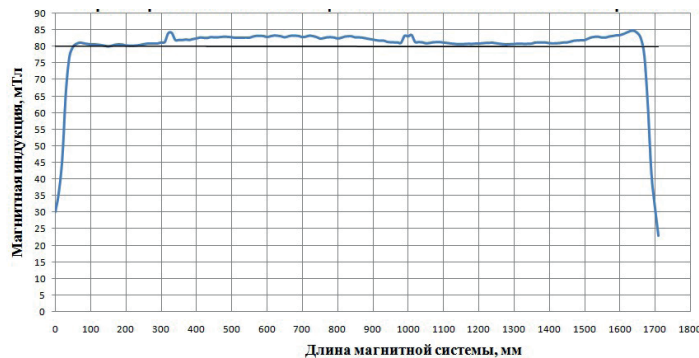
а



б



в



г

Рис. 11. Результаты измерений магнитной индукции магнитной системы над центральным полюсом: *а* – значения нормальной составляющей магнитной индукции B_n над центральным полюсом магнитной системы без накладки; *б* – значения результирующей величины магнитной индукции B над центральным полюсом магнитной системы без накладки; *в* – значения нормальной составляющей B_n над центральным полюсом магнитной системы с накладкой; *г* – значения результирующей величины B над центральным полюсом магнитной системы с накладкой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен расчет с последующей верификацией магнитной системы для цилиндрического магнетрона. Получены следующие результаты:

1. Экспериментально показано снижение неравномерности магнитного поля при применении выпрямляющих накладок в магнитной системе цилиндрического магнетрона.
2. Верифицированы результаты теоретического исследования с практическими измерениями готового образца магнитной системы цилиндрического магнетрона.
3. Показано отсутствие влияния толщины выпрямляющей накладки магнитной системы цилиндрического магнетрона на степень неравномерности магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Институт сильноточной электроники СО РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hcei.tsc.ru>.
2. Берлин, Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. В. Берлин, С. А. Данилин, Л. А. Сейдман. – Москва : Техносфера. 2007. – 176 с.
3. Хохлов, Ю. А. Влияние распределения магнитного поля на свойства ITO покрытия, получаемого на полимерной пленке методом реактивного магнетронного осаждения / Ю. А. Хохлов, В. А. Богатов, А. Г. Крынин // Труды ВИАМ. – 2014, № 12. – Статья № 11.
4. Берлин, Е. В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е. В. Берлин, С. А. Данилин. – Москва : Техносфера. 2010. – 528 с.
5. Орир, Дж. Физика. Полный курс. Примеры, задачи, решения / Дж. Орир. – Москва : ИД Интеллект. 2019. – 752 с.
6. Permanent Magnets, Magnetic Assemblies, Electromagnets and Magnetic Measuring Devices and Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cy-magnetics.com>.
7. Кузьмичев, А. И. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления / А. И. Кузьмичев. – Казань : Аверс. 2008. – 244 с.

REFERENCES

1. Institut silnotochnoj elektroniki SO RAN [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.hcei.tsc.ru> (in Russian)
2. Berlin, E. V. Vakuumnaya tehnologiya i oborudovanie dlya nanoseniya i travleniya tonkih plenok [Vacuum technology and equipment for deposition and etching of thin films] / E. V. Berlin, S. A. Danilin, L. A. Sejdman. – Moskva : Tehnosfera. 2007. – S. 176. (in Russian)
3. Hohlov, Yu. A. Vliyanie raspredeleniya magnitnogo polya na svojstva ITO pokrytiya, poluchaemogo na polimernoj plenke metodom reaktivnogo magnetronnogo osazhdeniya [Influence of the magnetic field distribution on the properties of the ITO coating obtained on a polymer film by reactive magnetron deposition] / Yu. A. Hohlov, V. A. Bogatov, A. G. Krynin // Trudy VIAM. – 2014, V. 12. – Iss. 11. (in Russian)
4. Berlin, E. V. Ionno-plazmennyye processy v tonkoplenochnoj tehnologii [Ion-plasma processes in thin-film technology] / E. V. Berlin, S. A. Danilin. – Moskva : Tehnosfera, 2010. – S. 528. (in Russian)
5. Orear, Jay. Fizika. Polnyj kurs. Primery, zadachi, resheniya [Physics. Full course. Examples, tasks, solutions] / Jay Orear. – Moskva : Intellekt Publ., 2019. – S. 752. (in Russian)
6. Permanent Magnets, Magnetic Assemblies, Electromagnets and Magnetic Measuring Devices and Instruments [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.cy-magnetics.com>. (in Russian)
7. Kuzmichev, A. I. Magnetronnye raspylitelnye sistemy. Kniga 1. Vvedenie v fiziku i tehniku magnetronnogo raspilyeniya [Magnetron sputtering systems. Part 1. Introduction to the physics and technology of magnetron sputtering] / A. I. Kuzmichev. – Kazan : Avers, 2008. – S. 244. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 04.05.2023 г.