УДК 621.793.182, 621.793

Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-2-85-95

Моделирование магнитной ловушки для магнетронной распылительной системы (MPC) с помощью метода конечных элементов с использованием модуля языка PYTHON

Ф. С. Федотов, А. М. Телегин⊠

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, г. Самара, Россия

[⊠]talex85@mail.ru

Аннотация. Рассматривается моделирование магнитной ловушки с помощью pyFEMM (Python interfaceto Finite Element Method Magnetics) с целью ее подбора для проектирования лабораторного стенда с магнетронным распылением в виде магнетронной распылительной системы с плоским катодом. Данный метод нанесения выбран потому, что он практичнее благодаря его скорости напыления тонких металлических пленок на подложку, чем диодная распылительная система. Магнитной ловушкой для МРС является подсистема, магнитные поля которой способны удерживать плазму около мишени. Использование разработанной программы позволяет подобрать необходимую ловушку из предложенных магнитов без использования дополнительных формул вне программы расчета, что упрощает и ускоряет поиск конечной системы. Подбор основан на изучении графиков модулей тангенциальной и нормальной составляющих магнитной индукции с последующим определением ширины зоны распыления, экстремумов каждого компонента магнитной индукции. Полученные результаты сопоставляются с заданными допусками и ограничениями. Результатом работы стало получение необходимых параметров тридцати шести подсистем трех разных конфигураций, зависимости характеристик от толщины магнитопровода при его добавлении в МРС и взаимосвязь показателей от кратности магнитов в магнитной ловушке. В заключении статьи сформулированы закономерности изменения различных критериев ловушек в зависимости от конфигурации, проведено сравнение эффективности увеличения количества магнитов в системе и толщины магнитопровода, определена оптимальная подсистема из предложенных.

Ключевые слова: МРС, магнитная ловушка, магнит-цилиндр, магнит-кольцо

Для цитирования: Федотов Ф. С., Телегин А. М. Моделирование магнитной ловушки для магнетронной распылительной системы (МРС) с помощью метода конечных элементов с использованием модуля языка РҮТНОN // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 2. С. 85–95. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-85-95.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Simulation of a Magnetic Trap for a Magnetron Sputtering System (MPS) Using the Finite Element Method Using the PYTHON Language Module

F. S. Fedotov, A. M. Telegin[⊠]

Samara University, Samara, Russia

^{III} talex85@mail.ru

Abstract. The modeling of a magnetic trap using pyFEMMis considered in order to select it for the design of a laboratory stand with magnetron sputtering in the form of a magnetron sputtering system with a flat cathode. This method of application was not chosen by chance, because it is more practical due to its speed of spraying thin metal films onto the substrate than a diode spray system. A magnetic trap for MSS is a subsystem whose

magnetic fields are capable of holding plasma near the target. Using the developed program allows you to select the necessary trap from the proposed magnets without using additional formulas outside the calculation program, which simplifies and speeds up the search for the final system. The selection is based on the study of the graphs of the modules of tangential and normal components of magnetic induction, followed by the determination of the width of the sputtering zone, the extremes of each component of magnetic induction. The results obtained are compared with the specified tolerances and limitations. The result of the work was to obtain the necessary parameters of thirty-six subsystems of three different configurations, the dependence of the characteristics on the thickness of the magnetic core when it was added to the MSS and the relationship of the indicators on the multiplicity of magnets in the magnetic trap. In the conclusion of the article, the regularities of changes in various trap criteria depending on the configuration are formulated, the efficiency of increasing the number of magnets in the system and the thickness of the magnetic core is compared, the optimal subsystem of the proposed ones is determined.

Keywords: MSS, magnet trap, magnet-cylinder, magnet-ring

For citation: Fedotov F. S., Telegin A. M. Simulation of a Magnetic Trap for a Magnetron Sputtering System (MSS) Using the Finite Element Method Using the PYTHON Language Module // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 85–95. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-2-85-95.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Процесс нанесения пленок имеет большое значение в технологии создания как микросхем, так и датчиков в целом. Магнетронная распылительная система (MPC) – это один из методов физического осаждения в вакууме (в англоязычной литературе – physical vapor deposition или PVD), где под вакуумом подразумевается разреженное состояние газовой среды в технологической камере при давлении не более 10 Па (0.1 Торр). Важный элемент в работе MPC – магнитная ловушка (рис. 1), которая выполняет функцию удержания плазмы около катода для его последующего эффективного распыления.



Рис. 1. Фотография лопнувшей магнитной ловушки: *1* – магнит-кольцо; *2* – магнит-цилиндр *Fig. 1.* Photo of a burst magnetic trap: *1* – magnet-ring; *2* – magnet-cylinder

В [1] отображаются результаты распределения магнитного поля в МРС, но данные результаты представлены для систем с электромагнитами. В [2], [3] используются коммерческие программы с закрытым исходным кодом с использованием расчетных формул и с коэффициентами, зависящими от вида MPC, которым необходимы физические эксперименты. В [4], [5] рассматривается моделирование магнетронного распыления с помощью методов Монте-Карло и столкновения частиц в ячейке, которые зависят от физикохимических процессов распыления. В [1]-[5] для проектирования МРС используют коммерческое дорогостоящее программное обеспечение, однако в этих работах отсутствуют алгоритмы работы программного обеспечения и модулей, используемых для описания процессов работы системы. В данной статье предлагается метод, включающий алгоритм, на основе которого был написан программный код, позволяющий на основе общедоступных бесплатных библиотек провести анализ и выбор параметров магнитной системы для МРС. Разработанный метод позволяет сократить время инженерных расчетов конструкций магнитных систем на основе постоянных магнитов стандартных габаритов, при этом представлены критерии, на основе которых проводился анализ данной системы.

Для создания программного кода были использованы схема из [1, с. 4] распределения составляющих магнитной индукции, коэффициент несбалансированности из [3, с. 81], метод поиска экстремумов графиков функций в двумерной плоскости.

При этом не учитывалась форма и глубина эрозии на мишени как в [1]–[3], так как подбор ловушки ведется в упрощенном виде с целью пеLETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 85-95



Puc. 2. Пример построения в руFEMM с результатами графиков: $I - |B_n|$ по модулю нормальная составляющая; $2 - |B_t|$ по модулю тангенциальная составляющая магнитной индукции; 3 - ширина зоны распыления *Fig.* 2. An example of construction in pyFEMM with the results of graphs: $I - |B_n|$ modulo the normal component; $2 - |B_t|$ modulo the tangential component of magnetic induction; 3 - the width of the spray zone



Рис. 3. Пример распределения тангенциальной и нормальной составляющих магнитной индукции от центра системы к краю
Fig. 3. An example of the distribution of the tangential and normal components of magnetic induction from the center of the system to the edge

ребора большого количества вариантов из предложенных постоянных магнитов на основе критериев, предложенных в [8]:

1) высота 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 – меньше 0.35 Тл.

Критерии 1 и 2 используются вследствие пространственных ограничений.

На рис. 2 представлены результаты моделирования, на основании которых происходит поиск экстремумов составных проекций магнитной индукции двумерной плоскости с использованием программного продукта руFEMM – модуля языка РҮТНОN, созданного для автоматизации расчетов и построений в среде FEMM [6], [7].

На рис. З представлена зависимость $|B_n|$ и $|B_t|$ от расстояния от центра системы. $|B_n|_{MAX}$ – 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.

Моделирование. Были рассмотрены различные конфигурации магнитных систем: цилиндрическая (рис. 4, a), коническая с большим основанием сверху (рис. 4, δ), коническая с меньшим основанием сверху (рис. 4, s). В рассматриваемых системах используются три ферритовых магниткольца с кодом материала Y30 (внешним диаметром 86 мм, внутренним – 32 мм, высотой – 10 мм;



Рис. 4. Конфигурации систем:

 а – системы № 1–3 ((1 – магниты-кольца 86 × 31 × 10 мм; 2 – магнит-цилиндр 10 × 10 мм; 3 – магниты-кольца 72 × 32 × 10 мм; 4 – магниты-кольца 60 × 24 × 9 мм);
б – системы № 4, 6, 8 (1 – магнит-кольцо 86 × 31 × 10 мм; 2 – магнит-кольцо 72 × 32 × 10 мм; 3 – магнит-кольцо 60 × 24 × 9 мм; 4 – магнит-цилиндр 10 × 10 мм);
в – системы № 5, 7, 9 (1 – магнит-кольцо 86 × 31 × 10 мм; 2 – магнит-кольцо 72 × 32 × 10 мм;

системы $M \ge 5$, 7, 9 (1 – магнит-кольцо 60 × 21 × 10 мм, 2 – магнит-кольцо 72 × 32 × 10 3 – магнит-кольцо 60 × 24 × 9 мм; 4 – магнит-цилиндр 10 × 10 мм)

Fig. 4. System configurations:

a – systems N_{2} 1–3 (*1* – magnet-rings 86 × 31 × 10 mm; *2* – magnet cylinder 10 × 10 mm;

 $3 - \text{magnet-rings} 72 \times 32 \times 10 \text{ mm}; 4 - \text{magnet-rings} 60 \times 24 \times 9 \text{ mm});$

 δ - systems No 4, 6, 8 (1 - magnet-ring 86 × 31 × 10 mm; 2 - magnet-ring 72 × 32 × 10 mm;

3 – magnet-ring 60 × 24 × 9 mm; 4 – magnet-cylinder 10 × 10 mm);

e - systems No. 5, 7, 9 (l - magnet-ring 86 × 31 × 10 mm; 2 - magnet-ring 72 × 32 × 10 mm;

 $3 - \text{magnet-ring } 60 \times 24 \times 9 \text{ mm}; 4 - \text{magnet-cylinder } 10 \times 10 \text{ mm})$

внешним диаметром – 72 мм, внутренним – 32 мм, высотой – 10 мм; внешним диаметром – 60 мм, внутренним – 24 мм, высотой – 9 мм) и четыре неодимовых (Nd₂Fe₁₄B) цилиндрических магнита с кодом материала N38 (диаметром 10 мм и высотой 10 мм; диаметром 12 мм и высотой 10 мм; диаметром 15 мм и высотой 10 мм; диаметром 20 мм и высотой 10 мм). В каждой системе рассматривается по два магнит-цилиндра и два магнит-кольца. В результате перебора получены 36 вариантов.

Как видно из рис. 4, по одному из торцов цилиндрического и кольцевого магнитов находятся в одной плоскости.

Алгоритм анализа конфигураций магнитных систем. После построения магнитной системы необходимо измерить коэффициент несбалансированности, который должен быть больше 1 [3]. Магнитная индукция рассматривается на расстоянии H = 9 мм от магнитной системы в воздушной среде. Диаметр излучения магнитной индукции – 140 мм.

Дальше контролируются $|B_t|_{MAX}$; $|B_t|_{MAX2}$; $|B_n|_{MAX2}$; $|B_n|_{MAX2}$; $|B_n|_{MAX2}$; ширина зоны, в которой тангенциальная составляющая по модулю больше нормальной составляющей по модулю ($|B_t| > |B_n|$) (наиболее вероятная зона распыления); расстояние от центра до места первого появления $|B_t| > |B_n|$.

.....

При этом, согласно анализу проведенному в [8], необходимо условие $|B_t|_{MAX} > 0.035$ Тл, а $|B_t|_{MAX2} < 0.035$ Тл (далее граничным условием будет рассматриваться 0.03 Тл для лучшего разграничения областей, способных на распыление и нет).

Для определения вышеописанных значений после магнитного потока необходимо найти точки пересечения графиков функций тангенциальной составляющей по модулю $|B_t|$ и нормальной составляющей по модулю $|B_n|$ в зависимости от расстояния *x* из центра системы, чтобы находить на полученных отрезках максимальные значения именно для отдельного участка.

Блок-схема алгоритма работы программы (рис. 5), написанной с помощью руFEMM, представлена на рис. 6.

Принцип работы программы следующий. Сначала записывается конфигурация магнитной системы в файл List.txt, все размеры измеряются в миллиметрах. Результаты работы программы выводятся в файл Result.txt, которые впоследствии были использованы для построения графиков.

На рис. 5 представлен пример кода программы, где B_points – координаты точек пересечения графиков $|B_n|$ и $|B_t|$ от центра системы, кроме координаты 0.0; B_n_out – экстремумы функции $|B_n|$; B_t_out – экстремумы функции $|B_t|$; width –



Puc. 5. Пример ввода и вывода *Fig. 5.* Example of input and output

предполагаемая ширина распыления; widthbegin – начальная координата ширины зоны распыления от центра системы.

Определение необходимой информации:

1. Считать $||B_n|$ и $|B_t|$ на определенном расстоянии от магнитной системы.

2. Найти точки пересечения, где $|B_n| = |B_t|$, записать их в В points.

.....

3. Между точками пересечения найти экстремумы минимума и максимума для $|B_n||$ и $|B_t||$ при условии, что первый экстремум находится в точке 0.0.



Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 2. С. 85–95

LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 85-95







4. Записать найденные экстремумы в B_t_out и B_n_out соответственно.

5. Зная, что все минимумы $|B_n|$ и $|B_t|$ равны нулю и чередуются друг относительно друга, можно начать изучать показания сразу из Result.txt.

На рис. 7 представлено сравнение 4-го экстремума из массива B_t_out ($|B_t|_{MAX2}$), где они сгруппированы по конфигурациям и по диаметрам.

Согласно критериям из [8] выбрана система, которая состоит из двух магнитов-колец $60 \times 24 \times 9$,

двух магнитов-цилиндров 20×10 (все размеры даны в миллиметрах), так как у нее самая низкая $|B_t|_{MAX2} < 0.03$ Тл на краю системы по сравнению с остальными.

Проведем сравнение результатов определения оптимальной толщины магнитопровода снизу системы с результатами увеличения количества магнитов в системе кратно начальному количеству (увеличение количества и цилиндрических, и кольцевых магнитов), чтобы определить, что выLETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 85-95

годнее: использовать магнитопровод снизу системы или увеличение количества магнитов.

Изучались системы с двумя, четырьмя (увеличение в 2 раза – это система 30), восемью (увеличение в 4 раза), двенадцатью (увеличение в 6 раз), шестнадцатью (увеличение в 8 раз) и двадцатью (увеличение в 10 раз) магнитами. Результаты исследования приведены в таблице.



Puc. 8. Система № 30 (4.3): *I* – магниты-кольца $60 \times 24 \times 9$ мм; *2* – магнит-цилиндр 10×10 мм; *3* – магнитомягкий материал толщиной *h*, мм с выступом по ширине магнита-кольца $60 \times 24 \times 9$ мм, *Hup* = 2 мм *Fig. 8.* System No. 30 (4.3): *I* – magnet-rings $60 \times 24 \times 9$ mm; *2* – magnet-cylinder 10×10 mm; *3* – magnetically soft material *h* mm thick with a protrusion along the width of the magnet-ring $60 \times 24 \times 9$ mm, *Hup* = 2 mm

Результаты расчета магнитной системы Result soft the calculation of the magnetic system $T_{\text{LM}} = \begin{bmatrix} B_{\text{LMAX}} & B_{\text{LM}} & D_{\text{LM}} \end{bmatrix}$



Рис. 9. Отображение зависимостей $|B_n|_{MAX}$, Тл (*a*), $|B_t|_{MAX}$ (Тл) (*б*), расстояния от центра до ширины зоны распыления (*в*) от толщины *h*, мм: *l* – супермаллой, *2* – сталь A30, *3* – сталь 12X17 *Fig. 9.* Presentation of results the dependencies of $|B_n|_{MAX}$, Tl (*a*), $|B_t|_{MAX}$, Tl (*b*), the distance from the center to the width of the spray zone (*b*) from the thickness *h*, mm: *l* – supermalloy, *2* – A30 steel, *3* – 12X17 steel

.....

.....



от толщины *h*, мм: *l* – супермаллой, *2* – сталь A30, *3* – сталь 12X17 *Fig. 10.* Presentation of results the dependencies of $|B_n|_{MAX2}$, Tl (*a*), $|B_t|_{MAX2}$, Tl (*b*) on the thickness *h*, mm: *l* – supermalloy, *2* – A30 steel, *3* – 12X17 steel

Для магнитопроводов в моделируемых системах использовались магнитомягкие материалы: сталь A20 (аналог в FEMM – 1117 Steel), сталь 12X17 нержавеющая магнитомягкая (аналог в FEMM – 430 StainlessSteel), супермаллой (в FEMM – Supermalloy). Все они имеют разную магнитную проницаемость и кривые намагничивания. На рис. 8 показано использование магнитомягких материалов в системе № 30 (4.3).

На рис. 9, 10 представлены результаты моделирования, при котором изменялась величина h, а высота выступа Hup = 2 мм оставалась прежней.

Заключение. Анализ полученных графиков систем показал, что при увеличении диаметра магнита-цилиндра в центре магнитной системы происходит возрастание максимальных значений тангенциальной и нормальной составляющих магнитной индукции, ширины зоны распыления, расстояния от центра системы до зоны, а на краю системы – уменьшение максимального значения тангенциальной составляющей, при этом изменение размеров магнита-кольца влияет несущественно. Результаты моделирования показали, что материал магнита-кольца оказывает сильное влияние только на максимальную по модулю нормальную составляющую магнитной индукции на краю магнитной системы. Изменение толщины магнитопровода приводит к изменениям параметров системы, например прирост максимального значения тангенциальной составляющей магнитной индукции внутри системы составил 5.5 %. Оптимальное значение толщины магнитопровода выбирается по максимальному значению тангенциальной составляющей магнитной индукции внутри системы и находится в диапазоне от 4 до 6 мм.

Увеличение количества (кратности) магнитов даже в 10 раз не дает того значения, которое бы превысило систему с двойной кратностью с толщиной магнитопровода снизу в диапазоне от 4 до 6 мм, помимо этого увеличение магнитов приводит к увеличению максимальной тангенциальная составляющая магнитной индукции на краю системы выше 0.03, следовательно, все системы с кратностью выше 2 не могут быть использованы из-за выбранных ранее критериев.

На основе проведенного моделирования предлагается использовать магнитную систему на лабораторном стенде с магнитомягким кольцом толщиной Hup = 2 мм и магнитомягкой подстав-кой толщиной h = 5 мм.

Список литературы

1. Клюева В. А., Духопельников Д. В. Сравнение распределений магнитного поля в магнетронных распылительных системах, полученных различными методами расчета // Электрон. журн. Молодежный науч.-техн. вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. URL: http:// ainsnt.ru/doc/823426.html (дата обращения 12.10.22).

2. Прогнозирование зоны эрозии планарного магнетрона / Н. В. Горбунов, А. Г. Колесников, Ю. А. Крюков, Т. А. Смолянин // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1 (29). С. 57–66. doi: 10.21685/2307-4205-2020-1-7.

3. Мельников С. Н., Кундас С. П., Свадковский И. В. Моделирование и численные исследования параметров магнетронных распылительных систем // Докл. БГУИР. 2007. № 3 (19). С. 80–86.

4. Shon C. H., Lee J. K. Modeling of magnetron sputtering plasmas // Appl. Surface Sci. 2002. № 192. P. 258– 269. doi: 10.1016/s0169-4332(02)00030-2. 6. Альтман А. Б. Постоянные магниты. Справочник. М.: Энергия, 1980. 488 с.

7. Байда Е. И. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM. Харьков: изд-во HTУ «ХПІ», 2015. 147 с. 8. Федотов Ф. С., Телегин А. М. Исследование магнитной ловушки для магнетронной распылительной системы // Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10, № 3. С. 301–307.

Информация об авторах

Федотов Федор Сергеевич – магистрант Самарского университета, инженер. Конструктор Института космического приборостроения Самарского университета, ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086, Россия.

E-mail: fedotov156784@gmail.com

Телегин Алексей Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского университета, старший научный сотрудник Института космического приборостроения Самарского университета. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086, Россия.

E-mail: talex85@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1750-1536

References

1 Kljueva V. A., Duhopel'nikov D. V. Sravnenie raspredelenij magnitnogo polja v magnetronnyh raspylitel'nyh sistemah, poluchennyh razlichnymi metodami rascheta // Jelektron. zhurn. Molodezhnyj nauch.-tehn. vestn. MGTU im. N.Je. Baumana. 2015. № 11. URL: http://ainsnt.ru/doc/823426.html (data obrashhenija 12.10.22). (In Russ.).

2. Prognozirovanie zony jerozii planarnogo magnetrona / N. V. Gorbunov, A. G. Kolesnikov, Ju. A. Krjukov, T. A. Smoljanin // Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem. 2020, № 1 (29). S. 57–66. doi: 10.21685/2307-4205-2020-1-7. (In Russ.).

3. Mel'nikov S. N., Kundas S. P., Svadkovskij I. V. Modelirovanie i chislennye issledovanija parametrov magnetronnyh raspylitel'nyh sistem // Dokl. BGUIR. 2007. № 3 (19). S. 80–86. (In Russ.).

4. Shon C. H., Lee J. K. Modeling of magnetron sputtering plasmas // Appl. Surface Sci. 2002. № 192. P. 258–269. doi: 10.1016/s0169-4332(02)00030-2.

6. Al'tman A. B. Postojannye magnity. Spravochnik. M.: Jenergija, 1980. 488 s. (In Russ.).

7. Bajda E. I. Raschet jelektromagnitnyh i teplovyh polej s pomoshh'ju programmy FEMM. Har'kov: izd-vo NTU «HPI», 2015. 147 s. (In Russ.).

8. Fedotov F. S., Telegin A. M. Issledovanie magnitnoj lovushki dlja magnetronnoj raspylitel'noj sistemy // Uspehi prikladnoj fiziki. 2022. T. 10, № 3. S. 301–307. (In Russ.).

Information about the authors

Fedor S. Fedotov – undergraduate of Samara University, design engineer of the Institute of Space Instrumentation of Samara University, st. Moscow highway, 34, Samara, 443086, Russia. E-mail: fedotov156784@gmail.com

Aleksey M. Telegin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara University; Senior Researcher, Institute of Space Instrumentation, Samara University, ul. Moscow highway, 34, Samara, 443086, Russia. E-mail: talex85@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-1750-1536

Статья поступила в редакцию 05.11.2022; принята к публикации после рецензирования 10.01.2023; опубликована онлайн 28.02.2023.

Submitted 05.11.2022; accepted 10.01.2023; published online 28.02.2023.