

УДК 537.613

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОНА

Д.Д. Зайцев

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. К.Е. Евдокимов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: ddz5@tpu.ru

SIMULATION OF THE MAGNETIC SUBSYSTEM OF A PLANAR MAGNETRON

D.D. Zaytsev

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., Ph.D. K.E. Evdokimov
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: ddz5@tpu.ru

Abstract. *Magnetron sputtering systems are commonly used to change the functional properties of materials by applying thin-film coatings. In this work, we have simulated the magnetic field of the magnetic subsystem of a planar magnetron magnetron sputtering system in a 17 mm above target in increments of 1 cm by z-component using the Wolfram Mathematica 13.1 and Elcut. The dependence of the magnetic field on the distance from the target is provided and discussed. The simulation results, over a range of considered distances, are in good agreement with an experimental study. The developed module can be used for designing a magnetron system based on the created model.*

Введение. Магнетронные распылительные системы (МРС) приобрели широкое распространение для изменения функциональных свойств материалов путем нанесения тонкопленочных покрытий. Использование скрещенных магнитного и электрического полей позволяет локализовать плазму у поверхности мишени и тем самым увеличивает скорость нанесения покрытия, а также снижает рабочее давление газового разряда [1]. В связи с этим, магнитное поле является одним из основных элементов МРС. Однако, расчет аналитическими методами магнитного поля с материалами, имеющими нелинейные магнитные характеристики, затруднителен. Для решения данной проблемы используется численное моделирование – оно позволяет нам не только рассчитывать магнитное поле существующих магнетронов, но и конструировать новые на основе созданной модели.

Цель настоящей работы – создание математической модели магнитного поля планарного магнетрона. В качестве объекта исследований рассматривается планарный магнетрон с системой постоянных магнитов: один в форме кольца, а другой в форме цилиндра. Был разработан модуль в среде Wolfram Mathematica 13.1 для расчета магнитного поля методом конечных элементов [2]. Для верификации используемого подхода и модели был проведен эксперимент, а также сравнение с результатами готового пакета Elcut [3].

Экспериментальная часть. В основу метода моделирования магнитного поля легла модель эквивалентного соленоида с использованием уравнения Пуассона для теоремы о циркуляции магнитного поля в цилиндрической системе координат (ЦСК) [4]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial (rA_\theta)}{\partial r} \right) = j_\theta,$$

где $j_\theta = \frac{B_{\text{ост}}}{\mu_0 \cdot \delta}$ – плотность тока проводимости $\left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right]$, \vec{A} – векторный магнитный потенциал, $B_{\text{ост}}$ – остаточная магнитная индукция постоянного магнита [Тл], δ – толщина слоя тока-проводимости [м], равная 0,1 мм.

Для расчета магнитного поля магнетрона была использована программа Wolfram Mathematica (WM). Необходимо упомянуть, что используемая программа не имеет готового интерфейса для моделирования физических систем. Однако, она обладает необходимыми методами для их реализации, в частности «NDSolve FEM». Наша модель магнитного поля в ЦСК была проверена на ряде физических задач, которые имеют известное аналитическое решение: кольцо с током, соленоид, соленоид с сердечником. Во всех случаях полученные решения имеют отличную сходимость с теоретическими результатами в пределах используемых допущений.

Модель исследуемого магнетрона, а также характер распределения магнитного поля представлены на рисунке 1.

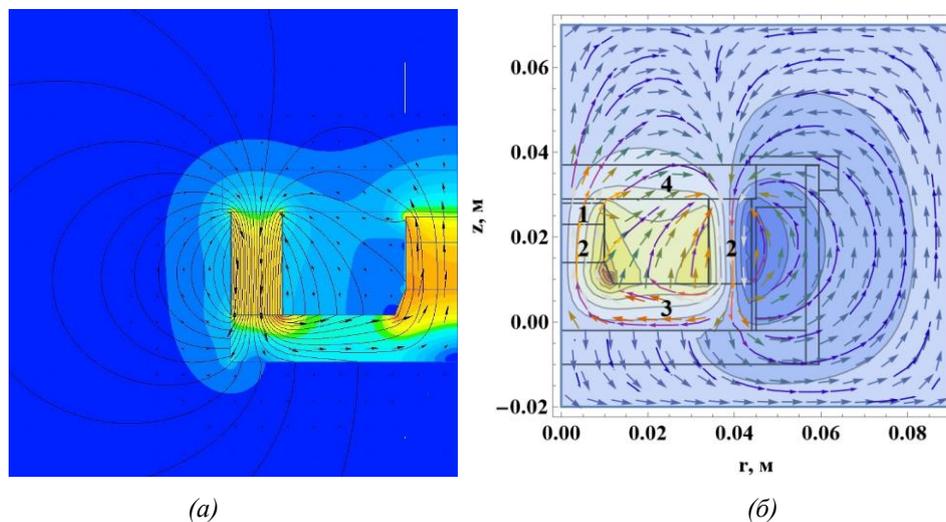


Рис. 1. Магнитное поле магнитной подсистемы планарного магнетрона. (а) – модель в готовом пакете Elcut, (б) - модель в WM: 1 – магнит NdFeB, 2 – магнит Sm₂Co₁₇, 3 – магнитопровод, 4 – мишень

В данном магнетроне присутствуют два типа магнитов: NdFeB марки N52 и Sm₂Co₁₇ XGS32, у которых остаточная намагниченность равна 1,42 и 1,12 Тл, соответственно. Магнитопровод изготовлен из электротехнической стали с нелинейными магнитными характеристиками. Остальные элементы выполнены из материалов с магнитной проницаемостью, слабо отличающейся от магнитной постоянной.

Для проверки модели на адекватность был проведен эксперимент по измерению магнитного поля магнетрона с использованием миллитесламетра ТП2-2У. Для измерений была составлена координатная сетка с шагом 1 см по r- и z- компонентам. Точка отсчета сетки находилась на оси симметрии магнетрона на расстоянии 1,7 см от поверхности мишени магнетрона. Всего было снято 390 измерений магнитной индукции для двух проекций. Кроме того, было проведено моделирование магнитного поля в готовом пакете Elcut с использованием тех же геометрии и приближений, что и в нашей модели.

Результаты. На рисунке 2 приведены осевая и радиальная составляющие магнитной индукции полученных экспериментально, в Elcut и WM.

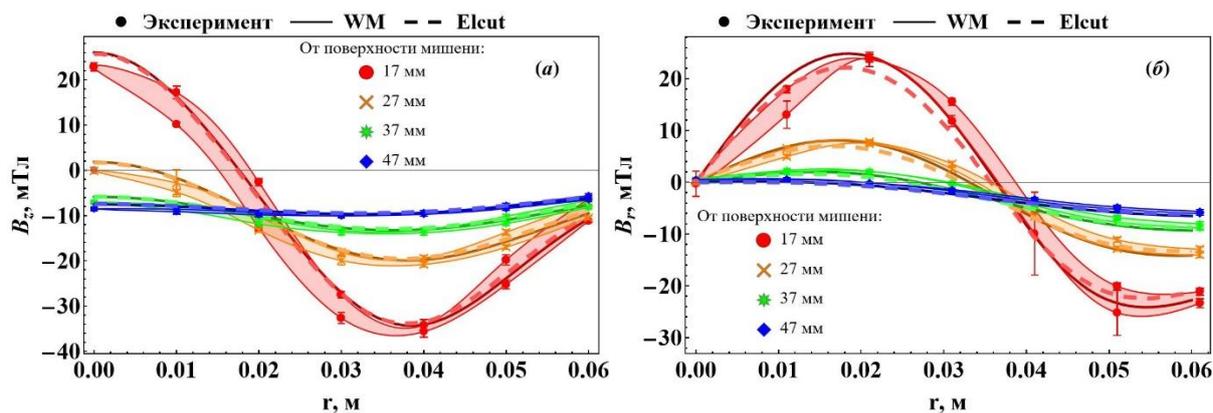


Рис. 2. Зависимости проекций магнитной индукции B_z (а) и B_r (б) от расстояния до оси симметрии на высоте 17 мм и выше от поверхности мишени

Как видно из рис. 2. а, имеется полное соответствие между результатами для $B_z(r)$ в WM и Elcut, а также хорошее согласие с эмпирическими данными. Однако, в зависимостях для $B_r(r)$ (рис. 2. б) наблюдается некоторое отклонение между результатами расчетов в разных пакетах, что можно объяснить разницей в количестве используемых элементов сетки. Кроме того, численные значения экспериментальных данных не соответствуют друг другу по разную сторону от оси симметрии. Это может быть связано с наличием технологического отверстия в магнитопроводе. Данное предположение качественно подтверждается результатами моделирования.

Заключение. В настоящей работе показаны результаты моделирования магнитного поля магнетрона в WM. Для проверки созданной модели были проведен эксперимент и сравнение с готовым пакетом Elcut. Полученные данные разных пакетов во многом идентичны, а различие может быть обусловлено количеством элементов сетки. Помимо этого, результаты моделирования имеют хорошее согласие с экспериментальными данными. Созданный модуль можно использовать для расчета магнитных систем при конструировании или модификации технических устройств, а также использовать для моделирования тлеющего разряда в скрещенных магнитном и электрическом полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: устройство, принципы работы, применение – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 54 с.
2. Документация Wolfram Language & System [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://reference.wolfram.com/language/>.
3. Руководство пользователя Elcut (версия 5.4). Производственный кооператив TOP – г. Санкт-Петербург, 2006. – 298 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. 3. Электричество. – 4-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.