

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

А.В. Титушкин

atituhkin@bk.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Произведено сопоставление результатов прямых стендовых измерений топологии и величины магнитного поля в магнетронной распылительной системе на постоянных магнитах с мишенью диаметром 50 мм и результатов моделирования, полученных при помощи программы конечно-элементного анализа. Показано, что результаты измерений и расчета хорошо согласуются.

Ключевые слова

Магнетронная распылительная система, ионное распыление, магнетрон, тонкопленочные покрытия, численные методы моделирования магнитного поля, топология магнитного поля, оптимизация конфигурации магнитного поля

Поступила в редакцию 31.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

При проектировании магнетронных распылительных систем (МРС) наиболее важной задачей является разработка магнитной системы, обеспечивающей наилучшую конфигурацию магнитного поля вблизи поверхности катода. Для ускорения процесса разработки магнитных систем можно применять различные расчетные программы, однако перед этим необходимо верифицировать получаемые при помощи них результаты.

Метод магнетронного распыления широко применяется в промышленности для создания тонкопленочных функциональных и декоративных покрытий. Методом магнетронного распыления наносят низкоэмиссионные покрытия на архитектурные стекла [1], проводящие и резистивные покрытия на изделия электронной промышленности [2], прозрачные электроды для индикаторных панелей [3], интерференционные покрытия на рабочие поверхности оптических поверхностей [4], различные трибологические покрытия [5], селективные покрытия солнечных коллекторов [6] и др. В отличие от своего прямого конкурента, вакуумно-дугового осаждения, метод магнетронного распыления позволяет наносить гладкие, лишенные дефектов покрытия [7]. Кроме того, методом дугового испарения сложно, а иногда и невозможно производить осаждение полупроводников [8], тогда как магнетронное распыление для этого подходит. Помимо применения в промышленности, МРС широко используют в научных исследованиях для моделирования процессов взаимодействия ионных потоков с твердым телом [9, 10].

В основе работы МРС лежит распыление твердого тела при бомбардировке ускоренными ионами [11]. В качестве источника материала используется расходимый катод устройства (рис. 1), на который подается отрицательное напряжение

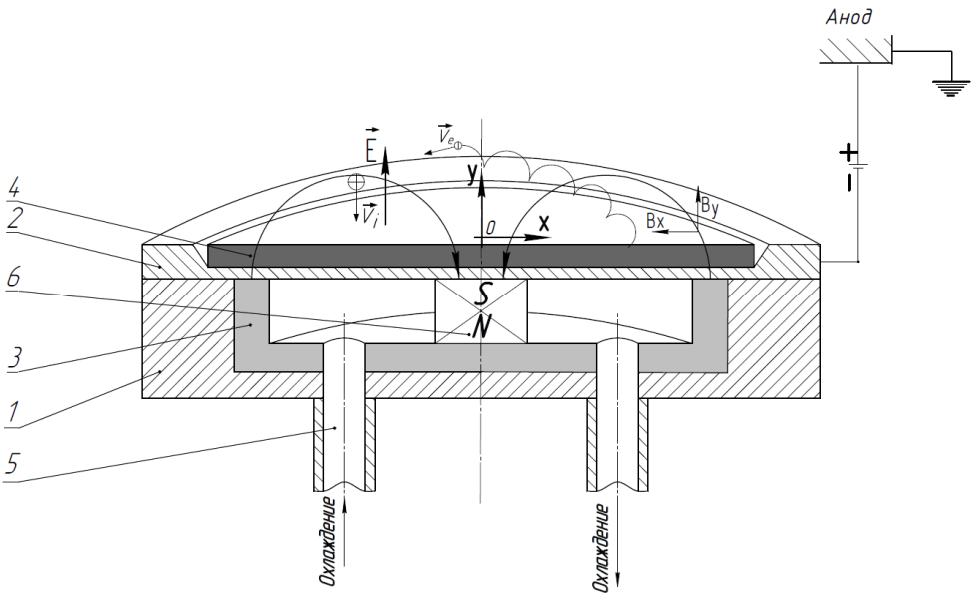


Рис. 1. Схема МРС:

1 — корпус магнетрона; 2 — фланец-основание мишени; 3 — магнитопровод; 4 — катод-мишень; 5 — патрубки охлаждения; 6 — постоянный магнит; S, N — полюса магнита; V_e — скорость электронов; V_i — скорость ионов; B_x, B_y — проекции вектора индукции магнитного поля; E — электрическое поле

величиной 250–800 В. В качестве анода разряда обычно выступают заземленные стенки вакуумной камеры. Расположенная непосредственно за катодом МРС магнитная система создает над его поверхностью арочное магнитное поле. В результате, около катода существует область, в которой вектор индукции магнитного поля и пораженности электрического поля перпендикулярны друг другу. Электроны, дрейфующие в скрещенных $E \times B$ полях, имеют значительно увеличенную длину свободного пробега, что приводит к многократному повышению эффективности ионизации. Поэтому при работе МРС вблизи катода образуется плазма высокой плотности (рис. 2). Ионы, вытягиваемые из плазмы приложенным напряжением, бомбардируют поверхность катода, вызывая его интенсивное распыление. Плотность ионного тока может достигать нескольких тысяч A/m^2 , что обеспечивает высокую скорость осаждения покрытия.

Рабочие характеристики (вольт-амперная характеристика разряда, минимальное давление зажигания разряда, диапазон рабочих давлений, тепловой поток на подложку) и эффективность работы МРС [12, 13] напрямую зависят от величины и топологии магнитного поля вблизи поверхности катода. Оптимальное магнитное поле обеспечит зажигание и поддержание разряда при наименьших давлениях (это необходимо при проведении технологических процессов, предъявляющих повышенные требования к чистоте остаточной атмосферы), а также позволит контролировать потоки заряженных частиц на подложку и увеличить эффективность использования материала катода. Поэтому важнейшей задачей при проектировании МРС является расчет и оптимизация магнитных полей.

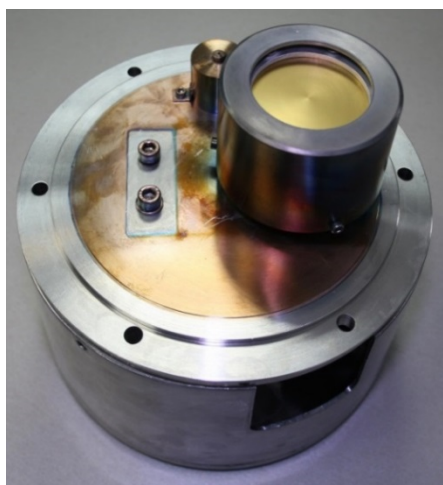


Рис. 2. МРС в действии

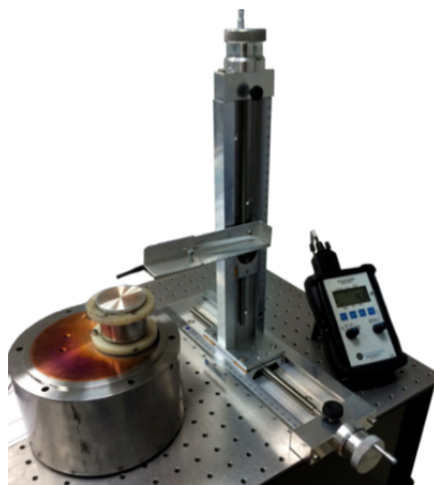
Существует ряд компьютерных программ для расчета магнитных полей методом конечных элементов, однако перед их применением для расчета вновь разрабатываемых конструкций, необходимо произвести верификацию результатов.

Целью настоящей работы является сравнение результатов расчета магнитных полей методом конечных элементов с прямыми измерениями для существующей МРС.

Измерение и расчет магнитных полей. Объектом исследования данной работы является планарная МРС с дисковым катодом диаметром 50 мм и толщиной 4 мм (рис. 3, а). Исследуемая МРС оснащена разбалансированной магнитной системой на постоянных магнитах NdFeB.



а



б

Рис. 3. Общий вид МРС (а) и стенда для измерения магнитного поля (б)

Измерение магнитных полей осуществлялось при помощи цифрового гауссметра AlphaLab GM-2. MPC размещали горизонтально на оптическом столе. Датчик гауссметра устанавливали на двухкоординатном модуле линейных перемещений с винтовыми передачами (рис. 3, б), обеспечивающем позиционирование датчика относительно мишени с точностью $\pm 0,2$ мм. Измерения магнитных полей производились в плоскости, образованной осью MPC и радиусом мишени (см. рис. 1) в диапазоне координат $0 \leq x \leq 30$ мм и $0 \leq y \leq 30$ мм с шагом в 1 мм. Последовательно измеряли нормальную (B_y) и касательную (B_x) составляющие магнитного поля.

Расчет магнитных полей производился в универсальной системе конечно-элементного анализа ANSYS 17.0. Конструкция магнетрона симметрична относительно центральной оси, поэтому при расчете использовали плоскую осесимметричную модель, а также характеристики магнитов марки N35. Расчет и измерение магнитных полей производили в одной и той же области. Для визуализации конфигурации магнитного поля, полученные данные обрабатывали в программе MatLabR2016b и сопоставляли с результатами моделирования.

Результаты эксперимента. На рис. 4 представлены конфигурации магнитного поля, полученные в результате прямого измерения (рис. 4, а) и расчета (рис. 4, б). Расчет показал, что точка пересечения сепаратрисы (линия, которая разграничивает магнитный поток, выходящий из центрального полюса и входящий во внешний, с потоком, который выходит из внешнего полюса и входит в него же) магнитного поля с осью Y расположена на расстоянии 17 мм от поверхности мишени. Значение этого расстояния составило 18 мм. На основании чего можно сделать вывод о хорошем совпадении топологий магнитного поля, полученных в результате численного моделирования и непосредственных измерений.

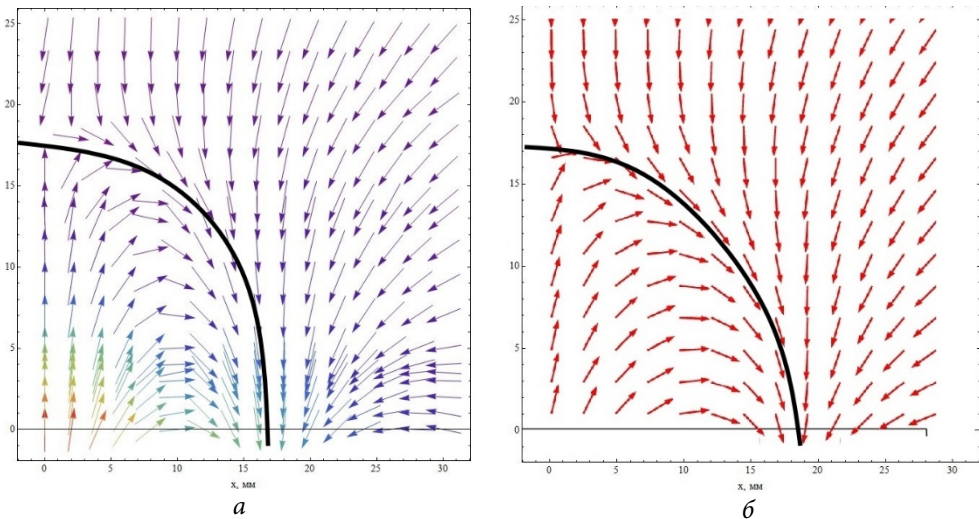
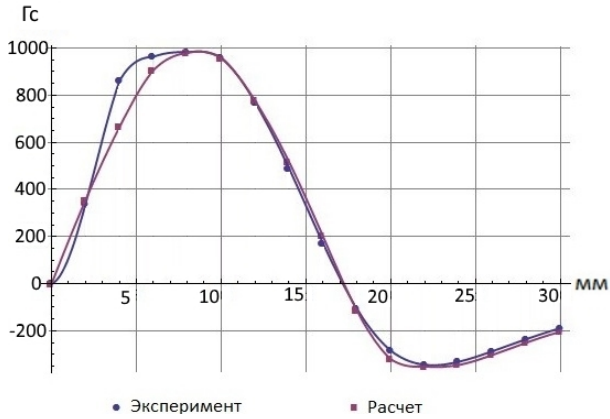
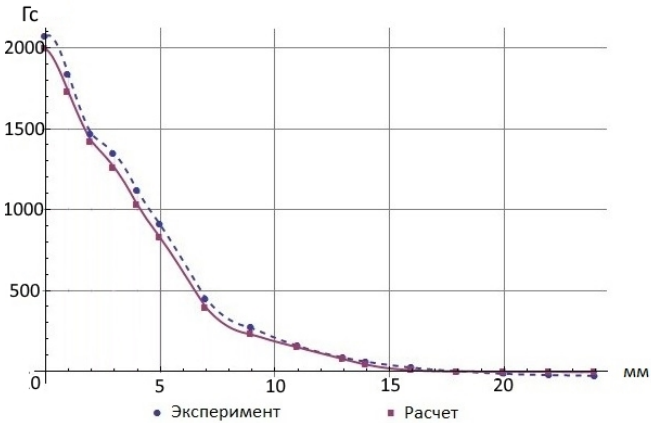


Рис. 4. Конфигурация магнитного поля над катодом MPC, полученная в результате прямого измерения (а) и расчета (б)

На рис. 5 представлены результаты измерения и компьютерного моделирования зависимости касательной составляющей магнитного поля B_x на поверхности катода от расстояния до оси (рис. 5, а) и зависимости нормальной составляющей магнитного поля B_y вдоль оси системы от расстояния до начала координат. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений составляющих магнитного поля показывает, что расхождение результатов вдоль оси магнетрона (рис. 5, б) не превышает 5 %. Расхождение результатов расчета и измерения касательной составляющей вблизи катода выше, до 20 %. Это может быть связано с погрешностями изготовления реальной конструкции, с конечными размерами измерительного щупа, а также с неточностью при задании параметров материалов в расчетной программе.



а



б

Рис. 5. Экспериментальные и расчетные зависимости касательной составляющей магнитного поля от расстояния до оси магнетрона в радиальном направлении (а) и нормальной составляющей от расстояния вдоль оси магнетрона (б)

Выводы. Сопоставлены результаты численного расчета в программе ANSYS и прямых измерений магнитных полей в планарной магнетронной распылительной системе с дисковым катодом. Как топология магнитного поля, так и численные значения проекций вектора магнитной индукции, полученные в результате расчетов, отлично согласуются с результатами измерений. Это позволяет сделать вывод о возможности применения пакета ANSYS для оптимизации магнитных полей при проектировании магнетронных распылительных систем. Такой же вывод, очевидно, можно сделать и в отношении других программ конечно-элементного анализа, так как в них используются схожие математические модели и алгоритмы.

Литература

- [1] Береговский В.В., Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Щуренкова С.А. Объемное содержание и дисперсный состав капельной фазы в покрытиях, полученных вакуумно-дуговым методом на установке Platit π -80. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2009, № 1, с. 3–5.
- [2] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К., Воробьев Е.В., Булычёв В.С. Вакуумная дуга на поликристаллическом кремниевом катоде. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 2014, № 11, с. 188–197.
- [3] Духопельников Д.В., Рязанов В.А., Воробьев Е.В., Абгарян В.К., Попов Г.А., Хартов С.А. Эффективные коэффициенты распыления титана, нитрида титана и молибдена ионами азота и смеси азот–кислород. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2016, № 12, с. 15–21.
- [4] Шарапов В.М., Зимин А.М., Кривицкий С.Е., Серушкин С.В., Залавутдинов Р.Х., Куликаускас В.С. Влияние дейтерия на формирование тонких пленок при распылении вольфрама в дейтериевой плазме магнетронного разряда. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2015, № 7, с. 23–28.
- [5] Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. *Ионно-лучевые методы получения тонких пленок*. Казань, КГУ, 2010. 87 с.
- [6] Духопельников Д.В. *Магнетронные распылительные системы. В 2 ч. Ч. 1. Устройство, принципы работы, применение*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 53 с.
- [7] Марахтанов М.К. *Магнетронные распылительные системы ионного распыления. Основы теории и расчета*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990. 75 с.

Титушкин Алексей Васильевич — студент кафедры «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Е.В. Воробьев, ассистент кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

VERIFICATION OF MAGNETIC FIELDS CALCULATION DATA IN THE MAGNETRON SPRAYING SYSTEM

A.V. Titushkin

atituhkin@bk.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of this study was to compare the results of direct bench measurements of the topology and the magnitude of the magnetic field in the magnetron spraying system on permanent magnets with a 50 mm diameter target with the results of modeling obtained by the program of finite element analysis. Findings of the research show that the results of the measurements and calculations are in good agreement.

Keywords

Magnetron spraying system, ion sputtering, magnetron, thin film coatings, numerical methods for modeling the magnetic field, magnetic field topology, magnetic field configuration optimization

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Beregovskiy V.V., Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Shchurenkova S.A. Volume fraction and disperse composition of a droplet phase in coatings, produced by vacuum arc method using Platit π -80 unit. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2009, no. 1, pp. 3–5.
- [2] Dukhopel'nikov D. V., Kirillov D. V., Marakhtanov M. K., Vorob'yev E. V., Bulychev V. S. Vacuum arc on the polycrystalline silica cathode. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU], 2014, no. 11, pp. 188–197.
- [3] Dukhopel'nikov D.V., Ryazanov V.A., Vorob'yev E.V., Abgaryan V.K., Popov G.A., Khar-tov S.A. Effective ratio of sputtering by nitrogen and nitrogen-oxygen mixture for titanium, titanium nitride and molybdenum. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i ney-tronnye issledovaniya*, 2016, no. 12, pp. 15–21.
- [4] Sharapov V.M., Zimin A.M., Krivitskiy S.E., Serushkin S.V., Zalavutdinov R.Kh., Kulikauskas V.S. Impact of deuterium on thin films formation in process of tungsten sputtering in deuterium plasma of magnetron discharge. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2015, no. 7, pp. 23–28.
- [5] Petukhov V.Yu., Gumarov G.G. Ionno-lucheveye metody polucheniya tonkikh plenok [Ion beam thin films technologies]. Kazan', KGU publ., 2010. 87 p.
- [6] Dukhopel'nikov D.V. Magnetronnye raspylitel'nye sistemy. V 2 ch. Ch. 1. Ustroystvo, printsipy raboty, primeneniye [Magnetron sputtering systems. In 2 parts. P. 1]. Moscow, Bauman Press, 2014. 53 p.
- [7] Marakhtanov M.K. Magnetronnye raspylitel'nye sistemy ionnogo raspyleniya. Osnovy teorii i rascheta [Magnetron sputtering systems of ion sputtering]. Moscow, Bauman Press, 1990. 75 p.

Titushkin A.V. — student, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — E.V. Vorob'ev, Assistant, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.