

УДК 533.9.924+621.793.18

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ МИШЕНИ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Д.А. Голосов¹, С.Н. Мельников¹, С.П. Кундас², А.П. Достанко¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

²Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова, Минск

PREDICTION OF TARGETS EROSION IN MAGNETRON SPUTTERING SYSTEMS

D.A. Golosov¹, S.N. Melnikov¹, S.P. Kundas², A.P. Dostanko¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

²International Sakharov Environmental University, Minsk

Предложен метод прогнозирования эрозии мишени магнетронных распылительных систем, который основан на определении зоны эффективной ионизации атомов рабочего газа, примерной концентрации заряженных части и допущении, что концентрация актов ионизации в каждой точке объема плазмы пропорциональна отношению величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля к квадрату индукции. Для практической реализации предложенной модели разработано программное средство TargProf, обеспечивающее расчет конфигурации магнитных полей с использованием программного комплекса ELCUT, формирование матриц выходных данных и анализ получаемых результатов, которая позволяет прогнозировать профиль зоны эрозии мишени на этапе проектирования магнетронной системы с погрешностью не превышающей 15 - 20% (в зависимости от конструкции магнетронов).

Ключевые слова: магнетронная распылительная система, зона эрозии мишени, плазменный разряд, магнитное поле, моделирование разряда.

The method of prediction of targets erosion in magnetron sputtering systems is suggested. The method based on the evaluation of the effective ionization zone for the working gas atoms, approximate concentration of the charged particles, and an assumption that the concentration of ionizing events at each point of the plasma volume is proportional to the horizontal component of magnetic field intensity to the magnetic field intensity square. For the practical implementation of the suggested model the software tool TargProf has been developed capable of calculating the magnetic field configuration with the aid of the ELCUT package, generating output data matrices, and analyzing the results obtained. The TargProf enables to predict the profile of the erosion zone on a target at the stage of the magnetron system design with the error not exceeding 15–20% (depending on the magnetron configuration).

Keywords: magnetron sputtering system, erosion zone, plasma discharge, magnetic field, modeling of discharge.

Введение

Прогнозирование зоны выработки мишени при магнетронном распылении имеет важную практическую значимость для эффективного использования материала мишени и оптимизации равномерности нанесения пленок. Так как в настоящее время в микроэлектронике широко используются мишени из драгоценных металлов, металлов платиновой группы, редких металлов и многокомпонентных сплавов и составов, эффективное использование материала мишени во многих случаях является главным критерием при разработке промышленных магнетронных распылительных систем (МРС). Эффективность МРС характеризуется коэффициентом использования материала мишени [1], [2]

$$K_t = \frac{m_0 - m_k}{m_0},$$

где m_0 – начальная масса мишени, m_k – конечная масса мишени при ее предельной выработке. Практическая оптимизация коэффициента K_t является сложной задачей, поскольку требует

проведения ряда экспериментов с разными комбинациями взаимного расположения магнитов и мишенями различной толщины до их предельной выработки. Методы компьютерного моделирования позволяют уменьшить время и стоимость оптимизации, и во многих случаях являются единственным способом найти приемлемое решение [3], [4]. В настоящее время известно несколько методов моделирования зоны выработки мишени [5]–[9]. Самым простым и приближенным является метод, при котором на распределении магнитных полей определяется положение линий магнитного поля на поверхности мишени параллельных поверхностей, и считается, что это зона максимальной эрозии [5], [6]. Границы зоны можно примерно оценить, определив положение, в котором замкнутые над поверхностью мишени линии магнитного поля практически перпендикулярны ее поверхности. Кроме этого, применяются и другие подходы, в частности метод, основанный на определении зоны ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона [7]–[9], который базируется на

моделировании кинетики движения тестовых частиц Монте-Карло (PIC-МС). Популярность метода Монте-Карло обусловлена относительно простой его компьютерной реализацией, при возможности использования как двухмерных, так и трехмерных моделей [7], [8]. Этот метод позволяет с достаточной точностью прогнозировать профиль зоны эрозии мишени, однако не дает количественных характеристик ее выработки, поскольку базируется на математическом моделировании движения отдельных тестовых частиц в анализируемых структурах, на основе чего делается вывод об общем состоянии «системы». Причем точность получаемых результатов зависит от числа моделируемых траекторий, поэтому для получения достаточного количества информации необходим расчет значительного числа траекторий, что требует больших вычислительных ресурсов и значительных затрат времени.

С другой стороны, чаще всего на этапе разработки МРС необходимо иметь простой «аппарат», который позволял бы оценить с погрешностью не более 20% профиль зоны эрозии, время работы и коэффициент использования материала мишени, что позволяет уменьшить затраты на разработку и исключить ошибки при проектировании магнетронов. При этом в качестве исходных данных желательно использовать реальные параметры разряда МРС и результаты моделирования электрических и магнитных полей.

Таким образом, целью работы была разработка относительно простой методики прогнозирования зоны эрозии магнетрона, которая бы оперировала реальными параметрами процесса и позволяла с достаточной для практического применения точностью предсказывать значения коэффициента K_i и время работы мишени без использования мощных компьютерных ресурсов.

1 Математическое описание образования зоны эрозии мишени магнетрона

При ионной бомбардировке скорость распыления материала мишени по толщине рассчитывается по формуле

$$V_p(r) = \langle Y(r) \rangle \frac{j_i(r) A_m}{N_a e \rho}, \quad (1.1)$$

где A_m – атомная масса распыляемого материала; ρ – плотность материала; $j_i(r)$ – плотность ионного тока на поверхности мишени на расстоянии r от оси магнетрона, $\langle Y(r) \rangle$ – средняя по энергетическому спектру величина коэффициента распыления материала мишени (эффективный коэффициент распыления), N_a – число Авогадро, e – заряд электрона.

Исходя из формулы (1.1), скорость распыления материала мишени по толщине при прочих равных условиях зависит только от уровня ионной бомбардировки (плотности ионного тока)

определенного участка мишени МРС, т.е. глубина эрозии мишени $h(r)$ на радиусе r прямо пропорциональна произведению величины плотности ионного тока $j_i(r)$ на среднюю по энергетическому спектру величину коэффициента распыления материала мишени $\langle Y(r) \rangle$

$$h(r) \propto j_i(r) \langle Y(r) \rangle.$$

Для того чтобы определить полное время работы мишени необходимо также знать рабочие режимы магнетрона (напряжение U_i и ток разряда I_i) и параметры распыляемой мишени (A_m , ρ , Y). Считается, что предельная выработка мишени наступает, когда глубина максимума зоны ее эрозии достигает толщины мишени h_i

$$h(r_{sred}) = h_i.$$

Тогда полное время работы мишени

$$t = \frac{h_i}{V(r_{sred})} = \frac{h_i N_a e \rho}{\langle Y \rangle j_i^{\max} A_m},$$

где $\langle Y \rangle$ – эффективный коэффициент распыления, j_i^{\max} – максимальное значение плотности ионного тока в зоне разряда магнетрона. Определим эффективный коэффициент распыления как

$$\langle Y(r) \rangle = \int_0^{U_i} f_i(U, r) Y(U) dU,$$

где $Y(U)$ – табличное значение коэффициента распыления материала мишени, зависящее от энергии ионов, $f_i(U, r)$ – функция распределения ионов по энергиям на уровне катода. Функция распределения ионов по энергиям имеет сильную зависимость от напряжения разряда. Однако для большинства распыляемых материалов напряжение разряда изменяется в небольших пределах и составляет 350–500 В. Таким образом для упрощения модели можно говорить, что функция распределения ионов по энергиям на уровне катода, а следовательно и эффективный коэффициент распыления, слабо зависит от координаты точки распыления и напряжения разряда.

На основе представленных выше выражений можно сделать вывод, что для определения профиля выработки и коэффициента использования материала мишени достаточно знать распределение плотности тока бомбардирующих мишень ионов, а для расчета полного времени работы мишени необходимо учитывать и эффективный коэффициент распыления.

Распределение плотности ионного тока на поверхности мишени может быть получено путем интегрирования актов ионизации во всем объеме плазмы

$$j_i(r) = \int_0^{z^*} n_e(r, z) v_i(r, z) dz,$$

где n_e – плотность ионизирующих электронов, v_i – частота ионизации, z^* – граница плазмы.

Средняя частота ионизации, определяющаяся функцией распределения электронов по энергиям

$$v_i = n_a \langle \sigma_i v_e \rangle,$$

где n_a – концентрация атомов или молекул рабочего газа, σ_i – сечение ионизации при столкновении электронов с атомами, v_e – скорость электронов [10]. Представим среднюю скорость электронов как сумму движений вдоль линий электрического поля $v_{||}$ (продольная составляющая) и перпендикулярно электрическому и магнитному полю v_{\perp} (поперечная составляющая, так называемый холловский ток)

$$\langle v_e \rangle^2 = \langle v_{||} \rangle^2 + \langle v_{\perp} \rangle^2.$$

Продольная составляющая

$$v_{||} = \frac{eE_z}{m_e} t,$$

представляет собой колебательное движение электронов со скоростью от 0 (в нижней точке циклоиды) до $2v_{||}$, зависит только от напряженности электрического поля и практически ее значение постоянно во всем объеме плазмы. Скорость дрейфа электронов в направлении перпендикулярном электрическому и магнитному полям определяется выражением

$$v_{\perp} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}, \quad (1.2)$$

где \mathbf{E} и \mathbf{B} – векторы напряженности электрического и индукции магнитного полей. Если предположить, что напряженность электрического поля не зависит от положения на мишени, можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим концентрацию актов ионизации в разряде магнетрона, является величина и направление вектора магнитной индукции над поверхностью мишени, что было подтверждено экспериментально [11].

Для определения зоны ионизации атомов рабочего газа необходимо установить критерии границ зоны. Нижняя граница зоны ионизации определяется толщиной зоны катодного падения потенциала (темного катодного пространства (ТКП)). В стационарном режиме работы магнетронной распылительной системы около катода образуется слой положительного пространственного заряда, на который падает большая часть разрядного напряжения. В ТКП происходит разгон электронов. Поскольку сечение ионизации электронным ударом снижается при большой энергии ионов, в этой зоне практически отсутствуют акты ионизации. Толщину ТКП можно оценить исходя из соотношения

$$d_{sh}^2 = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left(\frac{2e}{m_i} \right)^{1/2} \frac{(U_{pl} - U_t)^{3/2}}{j_i}, \quad (1.3)$$

где $j_i(r)$ – локальная плотность ионного тока, m_i – масса иона, ε_0 – электрическая проницаемость

вакуума, U_t – напряжение разряда, U_{pl} – потенциал плазмы. Расчеты показывают, что для большинства МРС толщина ТКП в зависимости от конфигурации магнетрона и плотности ионного тока составляет 1–5 мм, что составляет 5–7% плазменной оболочки. Ионизация происходит за пределами катодного слоя в плазме отрицательного свечения. В этой области электрическое поле очень слабое, и оно практически не влияет на движение высокоэнергетичных катодных электронов и обеспечивает только сбор анодом низкоэнергетичных плазменных электронов для замыкания электрической цепи. Верхняя и боковые границы плазмы определяются способностью магнитной ловушки удерживать электроны. На некотором расстоянии от магнитной системы магнетрона напряженность магнитного поля ловушки ниже некоторой критической величины, при которой радиус циклотронного движения электрона превышает расстояние до подложки. В этом случае электроны не будут возвращаться обратно в зону ловушки и попадать на анод. Исходя из проведенных расчетов, можно предположить, что верхняя граница плазмы ограничивается величиной продольной составляющей индукции магнитного поля порядка 0.02 Тл.

2 Особенности компьютерной реализации модели

Как уже упоминалось, для оценки зоны выработки мишени в настоящей работе использован метод, основанный на определении зоны ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона. При этом предполагается, что ионизация рабочего газа в основном происходит в области скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полей, где вектор магнитной индукции практически перпендикулярен вектору напряженности электрического поля и индукция магнитного поля имеет величину не ниже определенного значения. Концентрация актов ионизации в каждой точке объема плазмы пропорциональна отношению величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля к квадрату индукции магнитного поля:

$$v_i(r, z) \propto \frac{B_r(r, z)}{B^2(r, z)}. \quad (2.1)$$

В качестве граничных условий принято: $Z_{min} = Z_{ТКП}$ – нижняя граница зоны плазмообразования, $Z_{max}(r) = Z(r)$ где ($B_r \leq 0.02$ Тл) – верхняя и боковые границы зоны плазмообразования.

Для использования предложенного метода необходим предварительный расчет конфигурации магнитных полей. Распределение индукции магнитного поля и ее горизонтальной составляющей над поверхностью мишени определялось с помощью программного комплекса ELCUT (Quick Field) [12], особенностью которого является возможность использования ресурсов и результатов внешних подключаемых модулей

(технология ActiveField). Указанная технология включает набор объектов для решения и анализа задач моделирования магнитных полей. Для формирования матриц выходных данных и анализа результатов авторами разработано на языке Borland Delphi программное средство TargProf, которое использует технологию ActiveField (рисунок 1). При этом объекты ELCUT обеспечивают постановку новой задачи, описание ее геометрической модели, построение сетки конечных элементов ее решение. Разработанная программа с использованием технологии ActiveField обеспечивает создание матриц индукции магнитного поля $B(r, z)$ и горизонтальной составляющей индукции магнитного поля $B_r(r, z)$. В полученной матрице B_r с учетом представленных выше граничных условий выделяется зона ионизации рабочего газа, для каждой точки пространства по формуле (2.1) рассчитывается относительная частота ионизации и создается матрица выходных результатов. На последнем этапе для построения профиля зоны эрозии мишени производится интегрирование столбцов матрицы относительной частоты ионизации и нормирование полученного профиля.

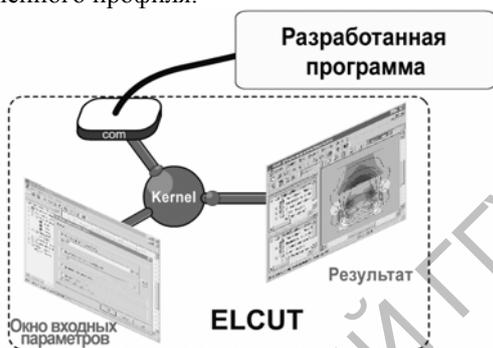


Рисунок 1 – Схема взаимодействия разработанного программного средства с комплексом ELCUT

3 Применение разработанной модели для прогнозирования профиля эрозии мишени магнетрона

Для верификации предложенного метода моделирования были проведены исследования зоны эрозии двух МРС: 1) аксиальной магнетронной распылительной системы РФМГ-036 с мишенью $\varnothing 36$ мм и магнитной системой на Nd-Fe-B постоянных магнитах (материал мишени – медь M2); 2) протяженной магнетронной распылительной системы МСПР-830 с размером мишени 830×100 мм и магнитной системой на феррит-стронциевых постоянных магнитах марки 28CA260 (мишень из нержавеющей стали 12X18H10T). Для измерения выработки мишени магнетрона РФМГ-036 создавался слепок зоны распыления мишени магнетрона (рисунок 2а). Для магнетрона МСПР-830 делался срез выработанной мишени (рисунок 2б). Профили получены методом оцифровки изображений срезов.

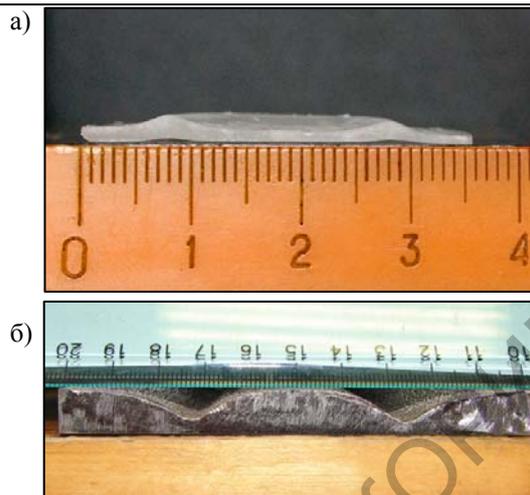


Рисунок 2 – Слепок зоны распыления мишени магнетрона РФМГ-036 (а) и срез мишени магнетрона МСПР-830 (б)

На рисунке 3 представлено распределение индукции магнитного поля (а) и горизонтальной составляющей индукции магнитного поля (б) над поверхностью мишени магнетрона РФМГ-036, рассчитанное с помощью программного комплекса ELCUT. Результаты расчета показывают, что индукция магнитного поля для небольших магнитных систем быстро убывает при удалении от мишени. Для магнетрона РФМГ-036 граница плазмы находится на расстоянии 8 мм от мишени. При этом толщина ТКП составляет менее 0.5 мм, поэтому она не учитывалась в расчетах. Отмечено, что магнитная система магнетрона РФМГ-036 имеет небольшую несбалансированность II-го типа [12], что вызывает смещение максимума B_r при удалении от мишени к оси магнетрона.

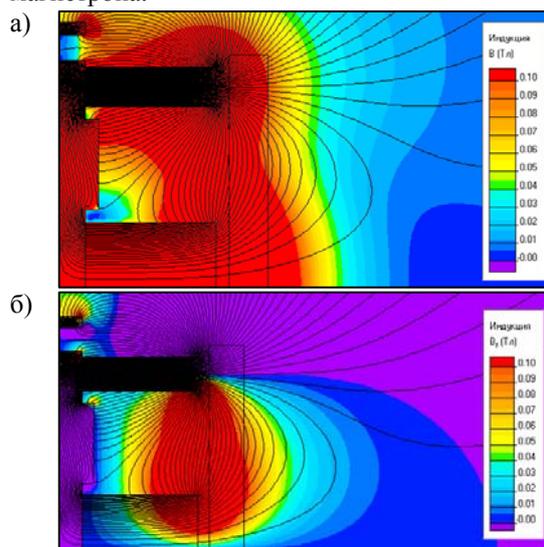


Рисунок 3 – Результаты моделирования распределения индукции магнитного поля B (а) и горизонтальной составляющей индукции магнитного поля B_r (б) над поверхностью мишени магнетрона РФМГ-036

На рисунках 4 и 5 представлены матрицы выходных результатов программы TargProf. В матрицах B_r и B_r/B^2 показаны только весомые значения с учетом граничных условий. Граница весомых значений определяет границу зоны ионизации рабочего газа в разряде МРС.

Поскольку, как было упомянуто выше, относительная частота ионизации пропорциональна отношению B_r/B^2 , то интегрирование строк дает относительную плотность ионного тока на определенном радиусе магнетрона. На рисунке 6 представлен полученный в результате моделирования профиль эрозии мишени магнетрона РФМГ-036.

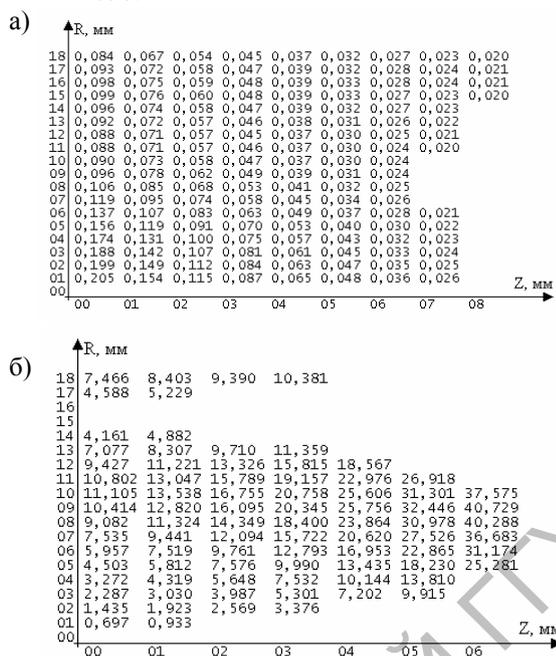


Рисунок 4 – Матрицы индукции магнитного поля B (а) и горизонтальной составляющей индукции магнитного поля B_r с учетом граничных условий (б) для магнетрона РФМГ-036

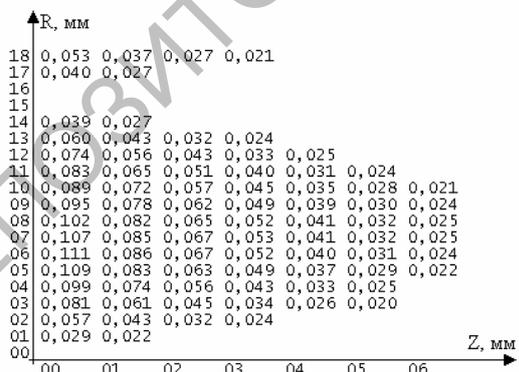


Рисунок 5 – Матрица отношения B_r/B^2 с учетом граничных условий для магнетрона РФМГ-036

Анализ полученных результатов показывает, что предложенная модель позволяет с погрешностью не более 25% определять профиль

зоны эрозии магнетрона, что позволяет использовать ее при проектировании магнетронной системы и соответствующих технологических процессов.

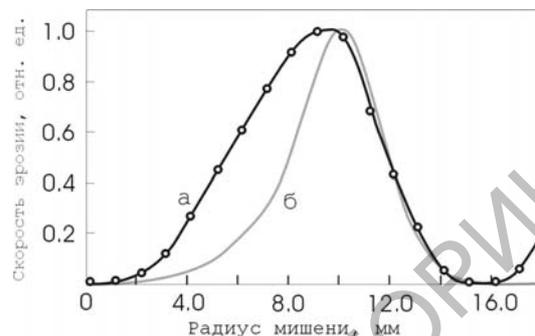


Рисунок 6 – Профили зоны эрозии мишени магнетрона РФМГ-036, полученные в результате моделирования (а) и экспериментальных измерений (б)

Предложенная модель также применена для прогнозирования зоны эрозии протяженного магнетрона МСПР-830. На рисунках 7 и 8 показаны результаты моделирования, полученные с помощью программ ELCUT и TargProf (матрицы выходных результатов программы TargProf не представлены из-за их громоздкости). Как видно из рисунка 7а, для магнетрона МСПР-830 граница плазмы находится на расстоянии 17 мм от поверхности мишени. Граница ТКП для этого магнетрона составляет 1.5 – 2.0 мм. Магнитная система практически сбалансирована. Полученный в результате моделирования профиль зоны эрозии мишени с погрешностью, не превышающей 16%, соответствует экспериментальным измерениям (для сбалансированных магнетронов).

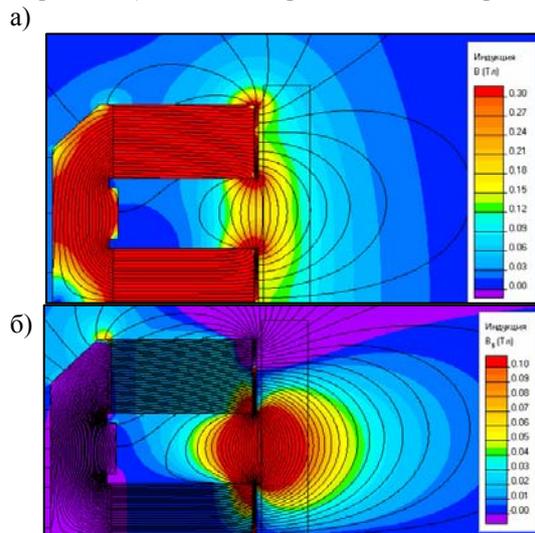


Рисунок 7 – Результаты моделирования распределения индукции магнитного поля B (а) и горизонтальной составляющей индукции магнитного поля B_r (б) над поверхностью мишени магнетрона МСПР-830

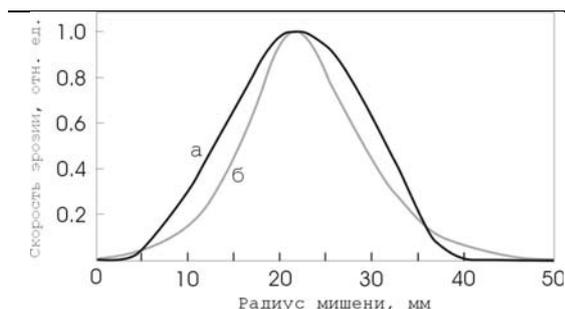


Рисунок 8 – Профили зоны эрозии мишени магнетрона МСПР-830, полученные в результате моделирования (а) и экспериментальных измерений (б)

Анализ полученных результатов показывает, что для несбалансированных магнитных систем погрешность увеличивается до 25%, что связано со смещением максимума B_r к оси магнетрона [13]. Уменьшение погрешности может быть достигнуто за счет учета распределения электрического поля (выражение (1.2)) и толщины ТКП, как функции плотности ионного тока (выражение (1.3)). Полученные в результате моделирования профили зоны эрозии могут быть использованы для расчета и оптимизации коэффициента использования материала.

Заключение

В работе предложен метод прогнозирования зоны выработки мишени магнетрона, основанный на определении зоны ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона, с допущением, что концентрация актов ионизации в каждой точке объема плазмы пропорциональна отношению величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля к квадрату индукции магнитного поля. Для проведения расчетов необходимо использование характеристик разряда магнетрона и распределения электрических и магнитных полей, что осуществляется с помощью программного комплекса ELCUT и разработанного в настоящей работе программного средства TagProf (формирование матриц выходных данных и представление полученных результатов).

В результате проведенных исследований установлено, что предложенная модель обеспечивает прогнозирование профиля зоны эрозии мишени магнетрона с погрешностью не превышающей 15% (сбалансированные магнетроны) и 25% (несбалансированные магнетроны), что дает возможность ее использования для оптимизации конструкций магнетронных систем, прежде всего с точки зрения повышения эффективности использования материала мишеней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин, Б.С. Магнетронные распылительные системы / Б.С. Данилин, В.К. Сычкин. – М. : Радио и связь, 1982. – 72 с.

2. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б.С. Данилин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 327 с.

3. *Modeling of gas discharge plasmas: What can we learn from it?* / A. Bogaerts [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 62–67.

4. Bader, H.P. Planarization by radiofrequency bias sputtering of aluminum as studied experimentally and by computer simulation / H.P. Bader, M.A. Lardon // J. Vac. Sci. Technol. – A. – 1985. – Vol. 3. – P. 2167–2171.

5. *Method to design magnetrons that match preferred erosion patterns* / R. Stelter [et al.] // Proceedings of the annual technical conference-society of vacuum coaters – 2004. – Conf. 47. – P. 418–420.

6. Powell, S. Finite element modeling of magnetostatics for magnetron sputter sources / S. Powell // CAD for Electromagnetic Devices. One-Day Seminar. – 2006. – P. 1–4.

7. Kusumoto, Y. Numerical study of the characteristics of erosion in magnetron sputtering / Y. Kusumoto, K. Iwata // Vacuum. – 2004. – Vol. 74. – P. 359–365.

8. Nanbu, K. Analysis of Three-dimensional DC magnetron discharge by the particle-in-cell / Monte Carlo method / K. Nanbu, S. Kondo // Jpn. J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 36, Part 1. – P. 4808–4814.

9. Nanbu, K. Self-consistent particle simulation of three-dimensional DC magnetron discharge / K. Nanbu, S. Segawa, S. Kondo // Vacuum. – 1996. – Vol. 47. – P. 1013–1016.

10. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда : учебное руководство / Ю.П. Райзер. – М. : Наука, 1987. – 592 с.

11. Рогов, А.В. Исследование магнетронного разряда постоянного тока методом подвижного сеточного зонда / А.В. Рогов, И.Ю. Бурмакинский // Журнал теоретической физики. – 2004. – Т. 74, № 4. – С. 27–30.

12. ELCUT программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tor.ru/elcut/>. – Дата доступа : 10.05.2010.

13. Svadkovski, I.V. Characterisation parameters for unbalanced magnetron sputtering systems / I.V. Svadkovski, D.A. Golosov, S.M. Zavatskiy // Vacuum. – 2003. – Vol. 68, № 4. – P. 283–290.

14. Мельников, С.Н. Моделирование и анализ параметров магнетронных распылительных систем / С.Н. Мельников, И.В. Свадковский, С.П. Кундас / Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сборник материалов IV Международной научно-технической конференции 25–26 мая 2006 года. В 2-х т. Т. II. – Новополюк : ПГУ, 2006. – С. 270–274.

Поступила в редакцию 28.05.10.