

04;12

Исследование магнетронного разряда постоянного тока методом подвижного сеточного анода

© А.В. Рогов, И.Ю. Бурмакинский

Российский научный центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: alex-rogov@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 18 сентября 2003 г.)

Предложена методика измерения плотности ионизирующей электронной компоненты в магнетронном разряде постоянного тока в области сильных неоднородных магнитных полей на основе анализа экспериментальной зависимости тока разряда от расстояния между анодом и катодом при использовании сеточного анода. На основе методики исследованы параметры магнетронного разряда на технологическом магнетроне с малой зоной локализации разряда над поверхностью катода в рабочем режиме эксплуатации.

Введение

Магнетронный разряд постоянного тока, используемый в устройстве магнетронного распыления [1,2], характеризуется малой областью локализации разряда над поверхностью катода, большой величиной (0.04–0.12 Т) и сильной неоднородностью магнитного поля арочной конфигурации как в вертикальном (150–350 Т/м), так и в радиальном направлениях. В связи с этим непосредственное использование таких традиционных диагностических методов, как зондовые измерения, крайне затруднено. Для анализа структуры магнетронного разряда методом электрического зонда [3] проводят модельные эксперименты с использованием специальных магнитных систем с пониженной величиной магнитного поля [4] либо исследуют разряд на сравнительно большом удалении от катода, в области слабых магнитных полей [4,5].

В данной работе предлагается к рассмотрению метод измерения пространственного распределения плотности ионизирующих электронов на основе анализа экспериментально измеренной зависимости тока магнетронного разряда от расстояния между анодом и поверхностью катода в случае использования в качестве анода сеточного электрода и измерений профиля области выработки катода.

С помощью представляемой методики проведено экспериментальное исследование магнетронного разряда постоянного тока в рабочем режиме эксплуатации при плотности ионного тока на катоде $\sim 400\text{--}700\text{ А/м}^2$. В экспериментах использовался высокоэффективный малогабаритный магнетрон, разработанный авторами и предназначенный для решения широкого класса задач вакуумного напыления.

Описание эксперимента

Эксперименты проводились на магнетронной распылительной системе постоянного тока с аксиально-симметричной магнитной системой, состоящей из ци-

линдрического центрального и периферийного кольцевого постоянных магнитов (сплав КС37), обеспечивающих величину магнитного поля $B_{\text{cat}} \approx 0.07\text{--}0.08\text{ Т}$ на поверхности катода, в максимуме выработки катода (рис. 1, *a, b*). Предварительно был проведен расчет магнитных полей в пространстве над поверхностью катода для используемой системы (рис. 1, *a*). Согласно расчету, величина горизонтальной составляющей магнитного поля над максимумом области выработки катода удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью с декрементом λ_β

$$B_R(x) = B_{\text{cat}} \cdot \exp\left\{-\frac{x}{\lambda_\beta}\right\}, \quad (1)$$

в нашем случае $\lambda_\beta \approx 2.3\text{ мм}$.

Распыление происходило на рабочем газе аргона, для обеспечения плоскостности распыляемой мишени в ходе всего цикла экспериментов использовался графитовый катод (ввиду малого коэффициента распыления [6]) с толщиной 1.5 мм. В используемом магнетроне анод является конструктивным элементом и выполнен в виде круглой диафрагмы, параллельной поверхности катода с центральным отверстием. Диаметр отверстия равен максимальному диаметру области выработки катода. Для локализации объема разряда между анодом и катодом в отверстие анода была установлена металлическая сетка с шагом ячейки 1 мм, выполненная из нержавеющей проволоки диаметром 0.3 мм (рис. 1, *a*). Предварительные измерения показали, что наличие сетки не влияет на вольт-амперные характеристики разряда при расстоянии анод–катод более 7 мм.

Серия экспериментов включала в себя измерение вольт-амперных характеристик для каждого значения зазора анод–катод (X^*) при фиксированном значении давления аргона в вакуумной камере ($P_{\text{work}} = 6.5 \cdot 10^{-3}\text{ Torr}$). Величина зазора изменялась в пределах от 7.8 до 1.8 мм с шагом 0.5 мм. Верхняя граница была обусловлена конструктивными особенностями магнетрона, а при уменьшении зазора анод–катод менее 1.8 мм начинается режим микродуг и стационарного магнетронного разряда не наблюдалось.

Максимальная выработка углеродного катода за все время проведения эксперимента не превысила 0.1 mm и в течение всего эксперимента он не заменялся. Профиль области выработки не зависит от материала катода, поэтому его измерения проводились на медном катоде с той же толщиной (1.5 mm) при полной его выработке для нескольких расстояний анод-катод. Сравнения областей выработки, проведенные для двух расстояний $X^* = 7.0$ и 2.8 mm, показали, что наблюдаемое различие в профиле области выработки соответствует изменению объема разряда, ограниченного магнитной силовой линией (граничная магнитная линия), касающейся анодной сетки. Границы выработки определяются пересечением указанной магнитной линии с поверхностью катода (рис. 2, b).

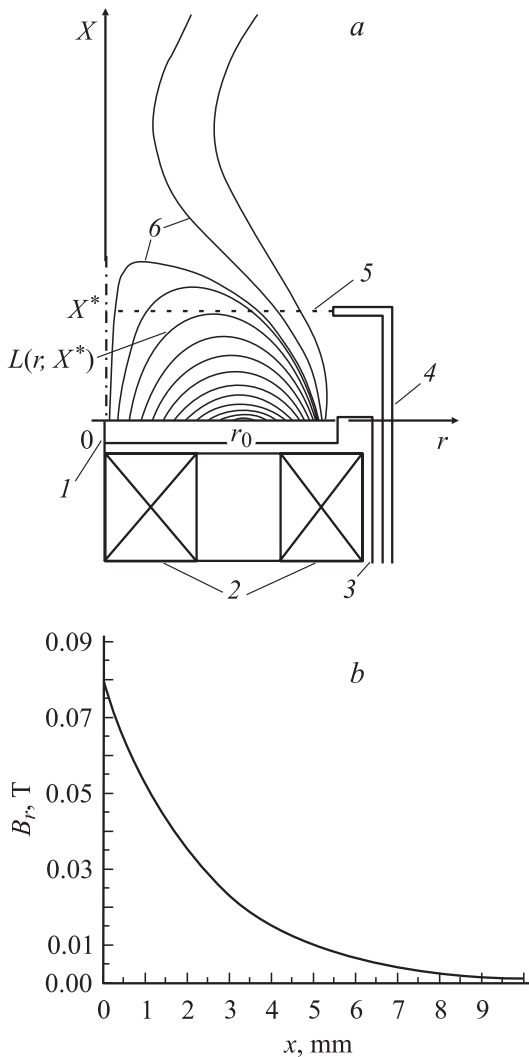


Рис. 1. Магнетронная система ионного распыления, используемая в экспериментах (показана половина) (a) и зависимость величины радиальной составляющей магнитного поля магнетрона от расстояния до катода (b). a: 1 — катодная вставка, 2 — магнитная система (центральный и периферийный магниты), 3 — корпус магнетрона, 4 — анод, 5 — анодная сетка, 6 — линии магнитного поля.

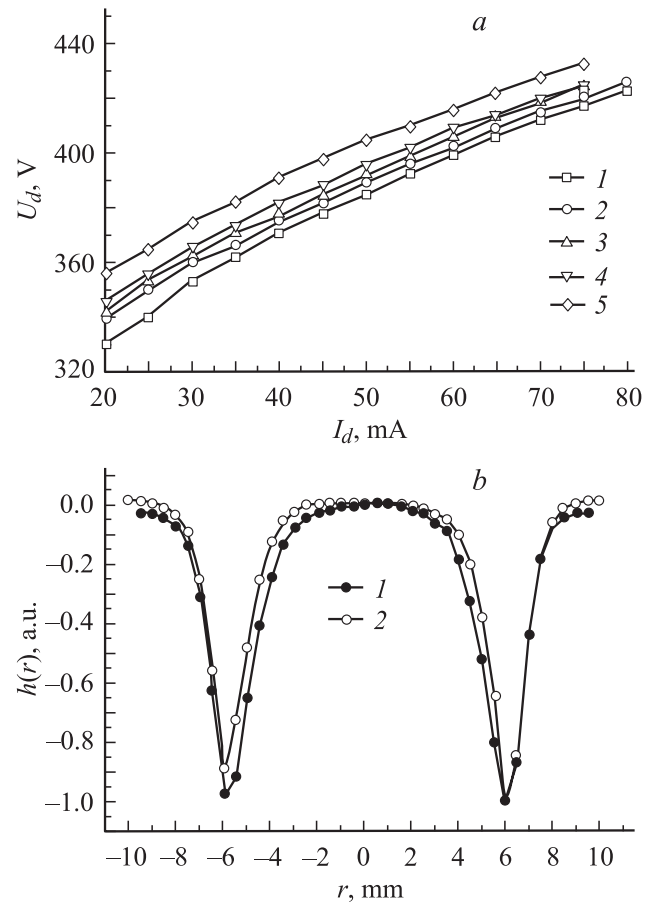


Рис. 2. a — измеренные вольт-амперные зависимости для разных расстояний катод-сетка: $X^* = 7.8$ (1), 5.8 (2), 4.8 (3), 3.8 (4), 2.8 mm (5). b — профили выработки катода, соответствующие двум разным расстояниям катод-сетка: $X^* = 7.8$ (1), 2.8 mm (2).

На основе экспериментальных данных (рис. 2, a, b) получены зависимости тока магнетронного разряда как функция расстояния X^* для нескольких значений фиксированного разрядного напряжения, которые затем были приведены к зависимостям плотности ионного тока с использованием результатов измерения профилей области выработки.

Обработка экспериментальных данных

Предлагаемая методика измерения плотности ионизирующих электронов в магнетронном разряде базируется на однозначном соответствии изменения тока магнетронного разряда при смещении анодной сетки на малую величину с соответствующим изменением объема плазмы, который обусловлен граничной магнитной силовой линией. Ток разряда, непосредственно измеряемый в эксперименте, является суммой тока ионов, генерируемых в плазме разряда и тока вторичных электронов, поступающих с катода в результате вторичной эмиссии

с коэффициентом γ_e ,¹

$$I_d = I_i(1 + \gamma_e), \quad (2)$$

что позволяет определить величину тока ионов по измеренным значениям тока разряда.

При фиксированных напряжении и расстоянии катод–сетка ионный ток на катод для стационарного разряда может быть представлен как

$$I_i(X^*) = \int_{S_{\text{cat}}} J_i(r, X^*) dS \\ = e \int_{S_{\text{cat}}} \int_0^{L(r, X^*)} n_e^{\text{hot}}(r, x, X^*) \cdot v_{\text{ion}}(r, x) dx \cdot dS, \quad (3)$$

где e — заряд иона; $J_i(r, X^*)$ — плотность ионного тока на поверхности катода в координате r ; $n_e^{\text{hot}}(r, x, X^*)$ — плотность ионизирующих электронов; $v_{\text{ion}}(r, x)$ — частота ионизации.

Интегрирование ведется по распыляемой площади катода $S_{\text{cat}}(X^*)$ ($dS = 2\pi \cdot r dr$) и по нормальной к поверхности катода координате x от поверхности катода до $L(r, X^*)$, определяющей граничную магнитную линию для фиксированного расстояния X^* (магнитную линию, касающуюся анодной сетки).

Распределение плотности ионного тока на поверхности катода аксиально-симметрично и повторяет профиль выработки $h(r, X^*)$ [10], который может быть определен непосредственно измерением (рис. 2, б) либо расчетом. Связывая плотность тока с известным профилем выработки и полным током разряда (2), получим

$$J_i(e, X^*) = \frac{h(r, X^*)}{\langle h \rangle(X^*)} \frac{I_d(X^*)}{(1 + \gamma_e) \cdot S_{\text{cat}}(X^*)}, \quad (4)$$

где

$$\langle h \rangle(X^*) = \frac{1}{S_{\text{cat}}(X^*)} \int_{S_{\text{cat}}} h(r, X^*) dS, \quad (5)$$

численно определенное для каждого из значений X^* .

Записывая соотношение (3) для величины $J_i(r, X^*)$ в фиксированной координате $r = r_0$ в предположении вертикального движения иона [10] и вводя среднюю по высоте области разряда величину частоты ионизации

$$\langle v_i \rangle(r_0) = \frac{\int_0^{L(r_0, X^*)} n_e^{\text{hot}}(r_0, x, X^*) v_i(r_0, x) dx}{\int_0^{L(r_0, X^*)} n_e^{\text{hot}}(r_0, x, X^*) dx}, \quad (6)$$

получим зависимость плотности тока ионов на катод в фиксированной координате

$$J_i(r_0, X^*) = e \langle v_i \rangle(r_0) \int_0^{L(r_0, X^*)} n_e^{\text{hot}}(r_0, x, X^*) dx. \quad (7)$$

¹ Коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии γ_e можно считать постоянным в диапазоне энергий иона, реализуемых в магнетронной системе ионного распыления [7–9].

Дифференцируя (7) по верхнему пределу интегрирования,

$$n_e^{\text{hot}}(r_0, x, X^*) = \frac{1}{e} \cdot \left[\frac{1}{\langle v_{\text{ion}} \rangle(r_0)} \cdot \frac{\partial J_i(r_0, X^*)}{\partial L^*(r_0, X^*)} \right]_{U=\text{const}}. \quad (8)$$

В предположении, что поступление электронной ионизирующей компоненты в область разряда происходит за счет ионно-электронной эмиссии и прямо пропорционально ионному току на поверхность катода, ее пространственное распределение можно представить в виде произведения, где первый множитель имеет зависимость только от величины ионного тока на катод, а второй (нормированный) отражает зависимость от координат

$$n_e^{\text{hot}}(r_0, x, X^*) = n_e^{\text{abs}}(J_i(r_0, X^*)) n_e(r_0, x), \quad (9)$$

для определения величины $n_e^{\text{abs}}(J_i(r_0, X^*))$ воспользуемся условием квазинейтральности плазмы разряда: проведя выборку из измеренных вольт-амперных характеристик при постоянном токе разряда получим величину разрядного напряжения как функцию расстояния катод–сетка. В этом случае

$$U_d = - \int_0^{X^*} E(x) dx = - [xE(x)]_0^{X^*} + \int_0^{X^*} \frac{\partial E(x)}{\partial x} x dx \\ \approx \int_0^{X^*} \frac{\partial E(x)}{\partial x} x dx = \frac{e}{\epsilon_0} \int_0^{X^*} (n_i - n_e) x dx, \quad (10)$$

откуда

$$(n_i - n_e) = \frac{\epsilon_0}{e} \frac{1}{x} \left[\frac{\partial U_d}{\partial x} \right]_{I=\text{const}}. \quad (11)$$

Согласно численной оценке, проведенной по (11), разница электронной и ионной концентраций не более 2.4%; график последней зависимости приведен на рис. 3, а. Таким образом условие квазинейтральности выполнено. Учитывая, что при малых расстояниях от катода $n_e \approx n_e^{\text{hot}}$, определим величину $n_e^{\text{abs}}(J_i(r_0, X^*))$ как

$$n_e^{\text{abs}}(J_i(r_0, X^*)) \approx n_i^{\text{cat}} \approx \frac{1}{\langle V_i \rangle \cdot e} J_i(r_0, X^*), \quad (12)$$

тогда из выражений (8), (9), (12)

$$n_e(r_0, x) = \left[\frac{1}{\langle v_{\text{ion}} \rangle(r_0)} \frac{\partial J_i(r_0, X^*)}{\partial L(r_0, X^*)} \frac{\langle V_i \rangle}{J_i(r_0, X^*)} \right]_{U=\text{const}}. \quad (13)$$

В выражениях (12) и (13) средняя скорость иона рассчитана в соответствии с массой иона M_i и средней по ионному спектру энергией $\langle E_i \rangle$ [11] на поверхности катода

$$\langle V_i \rangle \approx \sqrt{\frac{2\langle E_i \rangle}{M_i}} \quad (14)$$

Зависимость (13) также позволяет определить среднюю частоту ионизации $\langle v_{\text{ion}} \rangle(r_0)$ из условия нормировки $n_e(r_0, x)$.

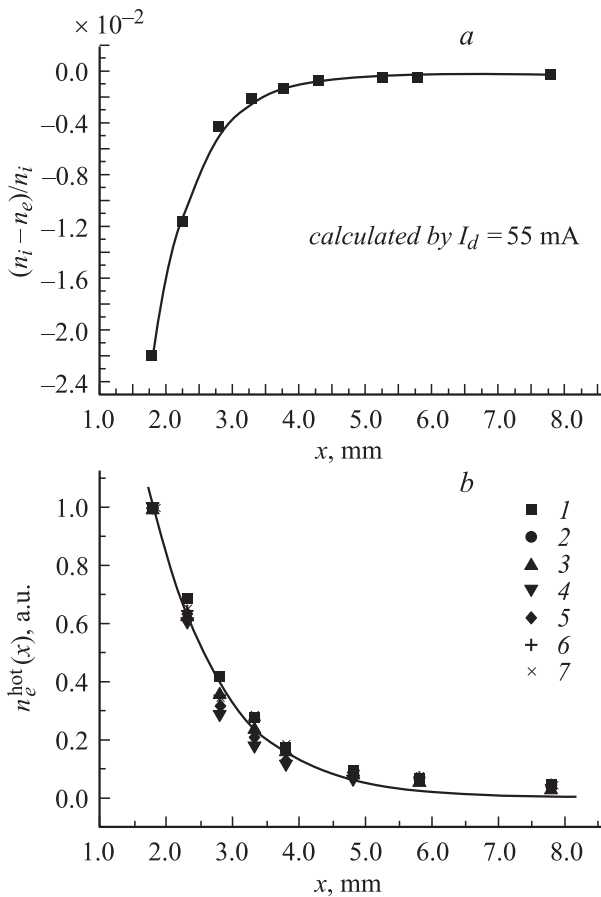


Рис. 3. *a* — относительная плотность электронов в разряде (зависимость (11)); *b* — пространственное распределение ионизирующих электронов при разных значениях разрядного напряжения: $U_d = 395$ (1), 400 (2), 405 (3), 410 (4), 415 (5), 420 (6), 425 В (7); сплошная кривая — аппроксимация зависимостью: $n_e(x) \propto \exp\{-x/\lambda_e\}$; $\lambda_e \approx 1.1$.

Наибольший интерес представляет определение плотности ионизирующих электронов в области разряда, расположенной над максимальной выработкой катода (представлены на рис. 3, *b* для разных значений разрядных напряжений).

В диапазоне расстояний $X_0^* \leq X \leq X_{\text{max}}^*$, для которых проводились измерения, зависимость электронной плотности от расстояния до катода удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией, с декрементом λ_e

$$n_e^{\text{hot}}(x) \propto \exp\left\{-\frac{x - X_0^*}{\lambda_e}\right\}, \quad (15)$$

при этом значение λ_e слабо меняется во всем диапазоне напряжений существования магнетронного разряда $1.0 < \lambda_e < 1.2$. Последнее обстоятельство позволяет предположить, что основным фактором, определяющим распределение плотности ионизирующей компоненты, является величина (ее зависимость от x) горизонтальной составляющей магнитного поля в области существова-

ния разряда

$$n_e^{\text{hot}}(x) \propto \{B_R(x)\}^\alpha, \quad (16)$$

где α определено как $\alpha = \lambda_\beta/\lambda_e$ и находится в диапазоне $1.8 < \alpha < 2.2$.

Заключение и выводы

Распределение электронной плотности является одной из основных характеристик разряда. Представленная выше методика позволяет определить пространственные параметры ионизирующей части электронной компоненты — распределение ее плотности, а также среднеинтегральную величину частоты ионизации по высоте разряда в рабочем режиме магнетрона. Показано, что для области магнетронного разряда выполнено условие квазинейтральности. Область локализации разряда при использовании сеточного анода обусловлена граничной магнитной линией. Основными факторами, определяющими распределение ионизирующих электронов в магнетронном разряде, являются величина и конфигурация магнитного поля постоянных магнитов. Связь пространственного распределения электронов с магнитной конфигурацией дает возможность прогнозировать рабочие характеристики магнетронной системы ионного распыления на этапе проектирования, поскольку позволяет определить ионные токи, и, как следствие, эффективность распыления материала мишени.

Список литературы

- [1] Kelly P.J., Arnell R.D. // J. Vacuum. 2000. Vol. 56. P. 159–172.
- [2] Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [3] Чен Ф. Электрические зонды. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
- [4] Sheridan T.E., Goecker M.J., Goree J. // J. Vac. Sci. Technol. 1991. Vol. A 9(3). May/Jun. P. 688–690.
- [5] Elakshar F.F., Hassouba M.A., Garamoon A.A. // Fizika. 2000. Vol. A9. N 4. P. 177–186.
- [6] Eckstein W., Garcia-Rosales C. et al. Sputtering Data. Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik. 1993.
- [7] Мессу Г., Бархон Е. Электронные и ионные столкновения. М.: ИЛ, 1958. 604 с. Electronic and Ionic Impact Phenomena / Ed. H.S.W. Massey and Burhop. Oxford: Clarendon Press, 1952.
- [8] Арифов У.А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью металла. Ташкент, 1961.
- [9] Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. М.: Мир, 1967.
- [10] Бурмакинский И.Ю., Рогов А.В. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 10. С. 46–50.
- [11] Touzeau M., Prioul M. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2000. Vol. 42. P. B323–B339.