

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.7

Прианодная область микроплазменного источника с острым анодом

А. А. Тихомиров, В. И. Сысун, В. А. Гостев

Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия

Предложена оригинальная методика зондовых измерений. На ее основе измерены распределения параметров прианодной плазмы в микроплазменном источнике и предложена теоретическая модель. Показано резкое возрастание концентрации плазмы в прианодной области, подтверждающее предположение о механизме ступенчатой ионизации. Результаты расчета концентрации плазмы удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Введение

Микроплазменные источники с острым анодом при малой потребляемой мощности имеют высокие параметры плазмы и яркость спектральных линий в локальной сферической области с центром на конце острия. Перспективными направлениями применения таких источников являются: дисплейные панели [1, 2]; модификация и нанесение полупроводниковых материалов [3]; обработка материалов [4, 5]; использование в качестве аналитического инструмента [6, 7]; модификации поверхности [8]; создание активной среды в лазерных технологиях [9]. Одной из важных особенностей таких микроплазменных источников является возможность повышения скорости нанесения тонких покрытий по сравнению с работой при пониженном давлении.

Высокие параметры прианодной плазмы в микроплазменном источнике указывают на эффективную местную ионизацию вблизи кончика острия при существенном снижении плотности тока на остальную оголенную поверхность анода. В работе [10] этот эффект объясняется преобладанием ступенчатой ионизации над прямой при возрастании концентрации электронов до $10^{18} \div -10^{19} \text{ м}^{-3}$. Здесь же произведено диффузионное рассмотрение движения заряженных частиц, которое требует дополнительных данных о граничных условиях и ионизации в слое. Однако несмотря на экспериментальные и теоретические исследования процессы в анодной области остаются недостаточно полно изученными.

В настоящей работе проведены теоретическое моделирование и оригинальное экспериментальное зондовое измерение параметров микроплаз-

менного источника острий — плоскость с малым анодом, работающим в непрерывном режиме в гелии.

Теоретическое моделирование

При моделировании в квазинейтральной области использовано гидродинамическое приближение с учетом инерциального члена с плавным переходом в анодный слой, где добавлялось уравнение Пуассона для потенциала при начинающемся отклонении концентрации электронов и ионов.

Уравнение непрерывности движения электронов и ионов при условии $T_i \ll T_e$ запишем в виде

$$\frac{\partial(n_i V_i)}{\partial r} + \frac{2}{r} n_i V_i = n_e Z; \tag{1}$$

$$\frac{\partial(n_e V_e)}{\partial r} + \frac{2}{r} n_e V_e = n_e Z; \tag{2}$$

$$m V_e \frac{dV_e}{dr} = - \frac{\partial(n_e k T_e)}{n_e \partial r} - eE - m V_e \nu_{em}; \tag{3}$$

$$m V_i \frac{\partial V_i}{\partial r} = eE - m V_i \nu_{im}, \tag{4}$$

где Z — частота ионизации, производимая одним электроном; в предположении ступенчатой ионизации будем считать ее в квазинейтральной области пропорциональной концентрации электронов, т. е.

$$Z = \frac{Z_0 n_e}{n_{e0}}, \tag{5}$$

где n_{e0} , Z_0 — соответствующие значения в начальной точке.

Значение Z_0 обеспечивает уход ионов на катод и определяется давлением. В анодном слое Z определяется по первому коэффициенту Таунсенда α

$$Z = \alpha V_e, \quad (6)$$

где в поле $E < 15 \frac{B}{\text{м} \cdot \text{Па}}$ для He хорошо подходит аппроксимация

$$\frac{\alpha}{p} \approx \frac{E/p^2}{2670} \frac{1}{\text{м} \cdot \text{Па}}. \quad (7)$$

При выбранной аппроксимации на границе слоя значение Z по обоим критериям совпадали. Рекомбинацией в объеме пренебрегалось из-за быстрого ухода ионов из малой области и малого коэффициента рекомбинации в рассматриваемых условиях. Для области квазинейтральности $n_e = n_i = n$ из (1)–(4) можно получить

$$\frac{\partial n}{n \partial r} = \frac{\frac{2mV_e^2}{r} + \frac{2MV_i^2}{r} - mV_e v_e - MV_i v_i}{\chi kT - mV_e^2 - MV_i^2}, \quad (8)$$

где χ — показатель политропы электронного газа

$$\frac{T_e}{T_{e0}} = n_e / n_{e0} \chi^{-1}.$$

Из-за малого радиуса области и высокой теплопроводности $\chi \approx 1$. В (7) знаменатель обращается в нуль при достижении

$$mV_e^2 + MV_i^2 = \chi kT,$$

что является условием нарушения квазинейтральности и достижения границы слоя.

От выбранной точки вблизи анода в обе стороны решалась система уравнений (1)–(2); (8). Электрическое поле находили из уравнения (4), для решения были использованы следующие безразмерные параметры:

$$N = \frac{n}{n_0}; \quad x = \frac{r}{\sqrt{D_a/z}} = \frac{r}{\sqrt{\frac{kT_0}{Mv_i z_0}}}; \quad a = \sqrt{\frac{v_i}{z_0}}$$

$$U_e = \frac{V_e}{\sqrt{kT_0/m}}; \quad U_i = \frac{V_i}{\sqrt{kT_0/M}}; \quad c = \frac{v_e}{v_i} \sqrt{\frac{m}{M}}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{m}{M}}; \quad \varphi = \frac{eU}{kT_e}.$$

Решение продолжалось до точки x_k начала быстрого роста градиента концентрации в (7), которая принималась за начало слоя на катоде и аноде. Значение x_k позволяет определить Z_0 из условия

$$\frac{x_k}{r_k} = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{\frac{kT_e}{Mv_{im}}}},$$

где r_k — расстояние от анода.

Отступая от анодного слоя, расчет проводился в сторону анода без предположения квазинейтральности с использованием уравнения

$$\frac{\partial E'}{\partial x} + \frac{2E'}{x} = (N_i - N_e) \frac{\omega_0^2}{z_0 v_{im}},$$

где

$$E' = \frac{eE}{\sqrt{kT_e z_0 M v_{im}}}; \quad \omega_0 = \frac{e^2 n_0}{M \epsilon_0}.$$

Значение Z в анодной области определяли в соответствии с формулами (5), (6).

Экспериментальная установка и результаты измерений

Экспериментальная установка для исследования разряда микроплазменного источника с острым анодом (рис. 1) состоит из вакуумной камеры и разрядного прибора, который крепится на диэлектрических стойках. Поскольку объект исследования малых размеров ($r = 10^{-4} \div 10^{-3}$ м), то применение обычной зондовой методики измерения параметров плазмы практически невозможно, так как размеры зонда и изолятора должны быть микрометрового порядка. Предлагаемая методика измерения состоит в регистрации изменения зондового тока при малом перемещении тонкого длинного оголенного зонда. Зная величину пространственного перемещения зонда и токи на него до и после перемещения, можно определить ток на часть тонкого зонда, находящуюся в перемещаемой области.

Таким образом определяются зондовые характеристики по радиусу плазмы с шагом, определяемым величиной точности перемещения зонда. После этого применяется обычный метод обработки зондовых характеристик, полученных при высоком давлении [11]. Такой подход позволяет отказаться от изоляции зонда и уменьшить радиус последнего. В настоящей работе применялся цилиндрический зонд радиусом $r_z = 65$ мкм, перемещаемый с помощью микрометрического винта. Точность перемещения 5 мкм. Вакуумирующая система позволила откачивать вакуумную камеру

не хуже чем до 10^{-1} Па, после чего камера отсекается от откачивающей системы и подается рабочий газ до достижения необходимого давления. Приведенные ниже данные — экспериментальные, относятся к давлению $p = 4 \cdot 10^4$ Па.

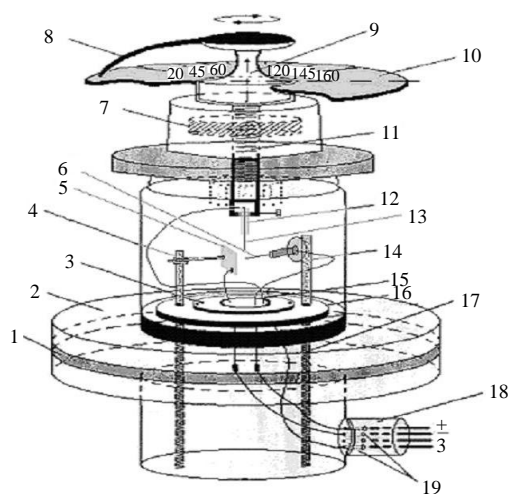


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — прокладка из фторопласта; 2 — металлическое основание кварцевого колпака; 3 — керамическая подложка; 4 — винт для перемещения катода; 5 — катод; 6 — анод; 7 — обойма микрометрического винта; 8 — указатель циферблата; 9 — вентиль; 10 — циферблат; 11 — микрометрический винт; 12 — стекло зонда; 13 — зонд; 14 — стойка для крепления острейного анода; 15 — проводники; 16 — фторопластовая пластина; 17 — стойки для крепления керамического основания; 18 — вывод для подключения питания; 19 — контакты для электродов

Разрядный прибор состоит из катода 5, перемещающегося с помощью винта 4, и анода 6, разность потенциалов на которые подается через вакуумный электрический вывод 18.

Острийный анод изготовлен электрохимическим травлением заготовок из молибдена в растворе КОН. Оценку радиуса кривизны готового анода проводили посредством измерения через микроскоп. Экспериментальное острие имело радиус закругления около 16 мкм, а расстояние анод–катод составляло 1,6 мм.

Зонд выполнен из молибденовой проволоки заводского изготовления $r_z = 65$ мкм и направлен на кончик острия анода для измерения параметров плазмы по радиусу.

По вольт-амперным характеристикам микроплазменного источника (рис. 2) можно заключить, что разряд соответствует нормальному тлеющему разряду. Увеличение разрядного промежутка ведет к заметному росту напряжения горения разряда.

Распределения температур электронов представлены на рис. 3, из которого видно, что предположение о постоянстве температуры электронов в плазме хорошо выполняется, это оправдывает предположение о малом изменении электронной температуры по радиусу плазмы.

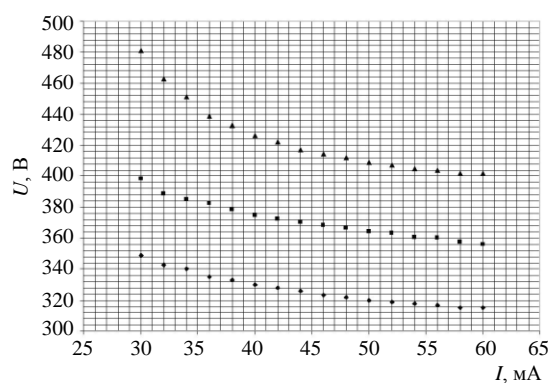


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики микроплазменного источника, d — межэлектродное расстояние, мм:

◆ — $d = 1,5$; ■ — $d = 2,5$; ▲ — $d = 3,5$

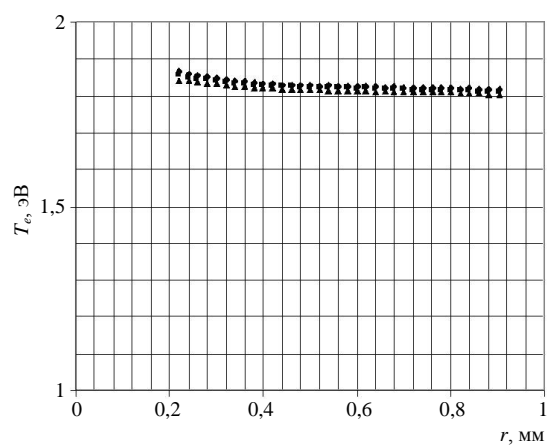


Рис. 3. Распределение температуры электронов по радиусу в зависимости от тока, мА:

◆ — $I = 55$; ■ — $I = 45$; ▲ — $I = 35$

На рис. 4 представлено распределение измеренного потенциала плазмы относительно анода. Крутой рост потенциала начинается на расстоянии $r \approx 0,3$ мм от анода, на остальных промежутках до катодного слоя напряженность поля примерна постоянна и равна $E \approx 10^4$ В/м.

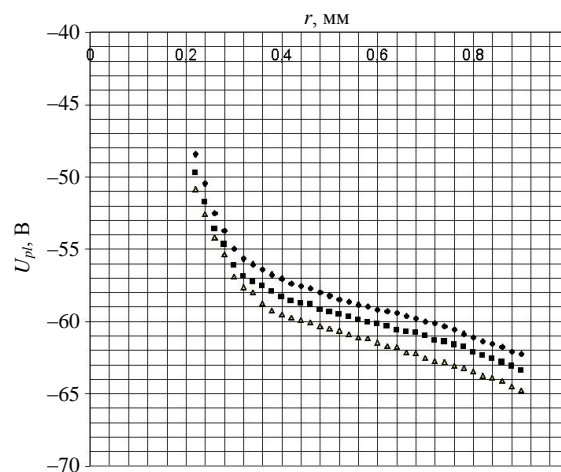


Рис. 4. Распределение потенциала по радиусу в зависимости от тока, мА:

◆ — $I = 35$; ■ — $I = 45$; ▲ — $I = 55$

Рассчитанные значения распределений концентраций ионов (рис. 5) указывают на эффективную ионизацию вблизи анода с почти квадратично возрастающей концентрацией. Вместе с тем влияние разрядного тока на величину концентрации плазмы носит близкий к линейному характер, а влияние тока на температуру — малозначительный характер. Сравнение экспериментальных данных и моделирования показывает хорошее соответствие, что подтверждает исходные предпосылки моделирования.

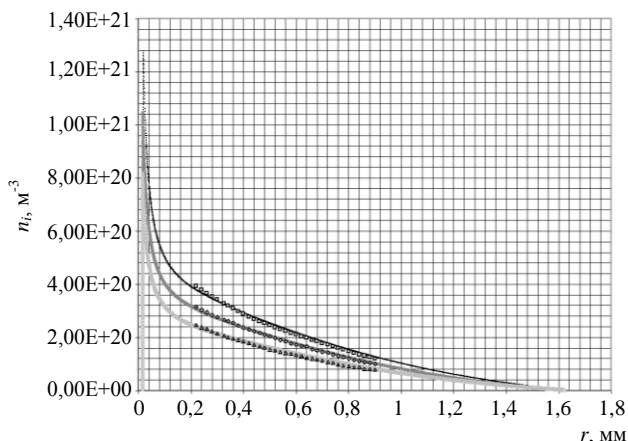


Рис. 5. Распределение концентрации плазмы по радиусу в зависимости от тока, мА:
 — $I = 55$ (модель); \blacktriangle — $I = 45$ (модель); \circ — $I = 35$ (модель); \triangle — $I = 35$; \diamond — $I = 45$; \square — $I = 55$

Заключение

Предложенная методика зондовых измерений позволяет существенно снизить возмущение плазмы зондом и как следствие получить более корректный результат. Экспериментальные результаты подтверждают предпосылку о существенной роли механизма ступенчатой ионизации в прианодной области микроплазменного источника с малым анодом.

Литература

1. Nguchi, Matsuoka A., Uchino K., Muraoka K.// J. Appl. Phys. 2002. V. 91. P. 613.
2. Chen J., Park S. J., Fan Z. F., Eden J. G., Liu C.// J. Microelectromech. Syst. 2002. V.11. P. 536.
3. Manos D. M., Flamm D. L.// Plasma Etching. An Introduction. — Boston, Academic, 1989. P. 5—45.
4. Ito T., Izaki K., Terashima K.// Surf. Coat. Technol. 2000. V. 497. P. 133, 134.
5. Ito T., Terashima K.// Thin Solid Films. 2001. V. 390. P. 234.
6. Miclea M., Kunze K., Franzke J., Niemax K.// Spectrochim. Acta. 2002. V. 57. P. 1585.
7. Yin Y., Messier J., Hopwood J.// IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 1516.
8. Kanazawa S., Kogoma M. et al.// J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. V. 21. P. 838.
9. Napartovich A. P.// Plasmas and Polymers, 2001. V. 6. № 1/2. P. 1.
10. Гостев В. А., Мамкович В. В., Сысун В. И. Исследование электрокинетических и спектральных характеристик микроплазменного разряда в геометрии острей–плоскость: Вторая междунар. конф. по физике плазмы и плазменным технологиям. — Минск: ФППТ-2, 1997. Т. 1. С. 98, 99.
11. Ульянов К. Н.// ЖТФ. 1970. Т. 40. № 4. С. 790.

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2007 г.

Anod region of microplasma source

A. A. Tikhomirov, V. I. Sysun, V. A. Gostev
 Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

The original metodic of probe measurements are developed. The characteristic distributions of plasma in the microsource are measured and theoretical model is developed. Drastic change concentration of plasma at the anod region that prove assumption of step ionization mechanism are shown. Results of modelling and experiment of concentration distributions was found in good agreement.