ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЫ В СИЛЬНОТОЧНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ КАТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Т.В. Коваль, С.С. Ковальский, Е.В. Островерхов
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,
tvkoval@mail.ru, volodyadenisov@yandex.ru, kovalsky@opee.hcei.tsc.ru,
evgeniy86evgeniy@mail.ru

Получены экспериментальные и численные распределения параметров плазмы в объёме полого катода сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления, поддерживаемого инжекцией электронов из одного и двух источников электронов, располагаемых на верхнем и нижнем основаниях цилиндрического полого катода. В качестве источника электронов используется плазменный источник на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом. Исследуется возможность применения принципа суперпозиции для прогнозирования распределения концентрации плазмы в полом катоде сильноточного тлеющего разряда низкого давления с двумя источниками электронов. Измерены распределения параметров плазмы при токах дугового разряда 20 и 45 А и при токах тлеющего разряда до 200 А. При повышении токов дугового разряда примерно в 2 раза, с 20 до 45 А точность выполнение принципа суперпозиции снижается. Максимальная степень неоднородности концентрации плазмы при включении двух источников электронов с токами 20 А в продольном направлении составила 25%, в радиальном – 52%, максимальное отклонение коэффициентов неоднородности для экспериментального распределения и распределения, полученного в результате сложения данных, полученных при раздельной работе источников электронов, составила 8%. При включении двух источников электронов с токами 45 А максимальная неоднородность в продольном направлении составила 8%, в радиальном 34%, а максимальное отклонение коэффициентов неоднородности 25%.

Ключевые слова: тлеющий разряд; полый катод; источник электронов; распределение плазмы.

PLASMA GENERATION IN A HIGH-CURRENT GLOW DISCHARGE WITH A HOLLOW CYLINDRICAL CATHODE USING TWO ELECTRON SOURCES

T.V. Koval, S.S. Kovalskiy, E.V. Ostroverkhov
Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademichesky Ave., 634055 Tomsk, Russia, tvkoval@mail.ru, volodyadenisov@yandex.ru, kovalsky@opee.hcei.tsc.ru,
evgeniy86evgeniy@mail.ru

Experimental and numerical distributions of plasma parameters in the volume of a hollow cathode of a high-current non-self-sustained low-pressure glow discharge supported by electron injection from one and two electron sources located on the upper and lower bases of the cylindrical hollow cathode are obtained. A plasma source based on an arc discharge with an integrally cold hollow cathode is used as an electron source. The possibility of applying the superposition principle to predict the distribution of plasma concentration in the hollow cathode of a high-current low-pressure glow discharge with two electron sources is investigated. The distributions of the plasma parameters were measured at arc discharge currents of 20 and 45 A and glow discharge currents up to 200 A. With an increase in arc discharge currents by about 2 times, from 20 to 45 A, the accuracy of the superposition principle decreases. The maximum degree of inhomogeneity of the plasma concentration when two sources of electrons with currents of 20 A were turned on in the longitudinal direction was 25%. In the radial direction, it was 52%. The maximum discrepancy between the inhomogeneity coefficients for the experimental distribution and the distribution obtained as a result of summing the data obtained with separate operation of electron sources amounted to 8%. When two sources of electrons with currents of 45 A were switched on, the maximum inhomogeneity in the longitudinal direction was 8%, in the radial direction, it was 34%, and the maximum mismatch of the inhomogeneity coefficients was 25%.

Keywords: glow discharge; hollow cathode; electron source; plasma distribution.

Введение

Ионно-плазменные методы обработки поверхности металлов и сплавов широко применяются в современной промышленности с целью азотирования, активации поверхности и нанесения износостойких покрытий. Ионн-плазменная обработка крупногабаритных протяженных изделий из металлов и сплавов может эффективно реализовываться в пучково-плазменных образованиях, формируемых в сильноточном несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления [1].

В данной работе экспериментально и численно исследуется возможность применения принципа суперпозиции для прогнозирования распределения концентрации плазмы в полом катоде сильноточного тлеющего разряда низкого давления с двумя источниками электронов. Под принципом суперпозиции понимается соблюдение равенства экспериментально полученного распределения концентрации плазмы в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда при совместной работе двух и более источников электронов и алгебраической суммы распределений концентрации плазмы, полученных при раздельной работе источников электронов.

Экспериментальные измерения

Проверка возможности применения принципа суперпозиции проводилась на экспериментальном стенде, представленном на рис. 1. Вакуумная камера была изготовлена в виде полого цилиндра диаметром 600 мм, высотой 1200 мм и объемом 0.34 м^3. Основной несамостоятельный тлеющий разряд зажигался между полым катодом, роль которого выполняли стенки вакуумной камеры и разнесенным кольцевым анодом. Для стабильного зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда использовались источники электронов на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом Для сравнения экспериментально полученных величин длины свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} и распределений параметров плазмы (температуры электронов (T_e), потенциала плазмы (ϕ); концентрации плазмы (N)) с расчетными, используется коэффициенты неоднородности $k_{\lambda_{ei}}$, k_{T_e}, k_{ϕ}, k_N соответственно. Коэффициент неоднородности k равен максимальному отклонению величины параметра плазмы от среднего значения, деленному на его среднее значение.

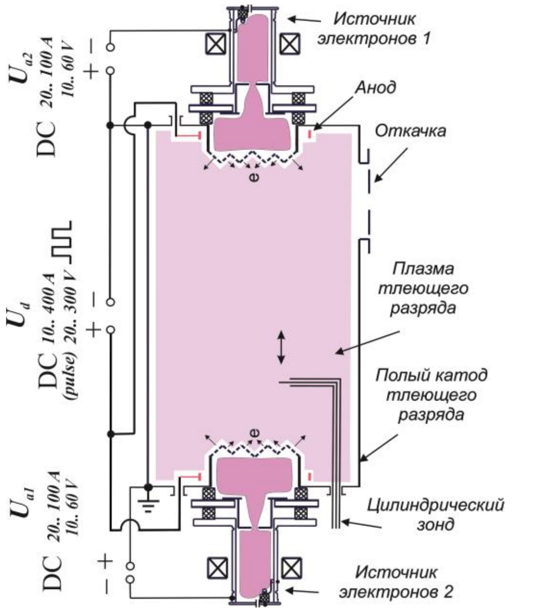


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

$$k = \frac{\left|N_n - N_{cp}\right|_{\max}}{N_{cp}} \times 100\%,$$

где N_n – значение величины концентрации плазмы в n-ой точке пространства с заданными координатами, N_{cp} – среднее арифметическое значение концентрации плазмы в заданных точках пространства. Длина свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями λ_{ei} рассчитывалась по формуле:

$$\lambda_{ei} = \frac{1}{N \cdot \delta_k} \quad ,$$

где N – концентрация плазмы, δ_k – сечение кулоновского взаимодействия [2-4]. Чем коэффициент неоднородности ниже, тем распределение более равномерное. Исследования характеристик тлеющего разряда проводились в импульсном режиме горения разряда в квазистационарном режиме горения. Во всех экспериментах давление рабочего газа азота составляло 0.6 Па, напряжение горения тлеющего разряда составляло 160 В, токи дугового разряда 20 А и 45 А.

В ходе эксперимента сначала включали источник электронов № 1 и получали продольное распределение концентрации плазмы *N*. Затем источник электронов № 1 выключали и включали источник электронов № 2 и так же получали продольное распределение концентрации плазмы от источника электронов № 2. Затем оба источника электронов включали совместно. Далее значения полученные в одинаковых координатах при раздельной работе источников электронов, складывались и получалось суммарное распределение. Для наглядности распределение концентрации плазмы построено в виде карты распределения, представленной на рис. 2. Карта распределения концентрации плазмы в полом катоде была построена по имеющимся экспериментальным данным путем интерполяции по радиусу и экстраполяции по длине протяженного полого катода.

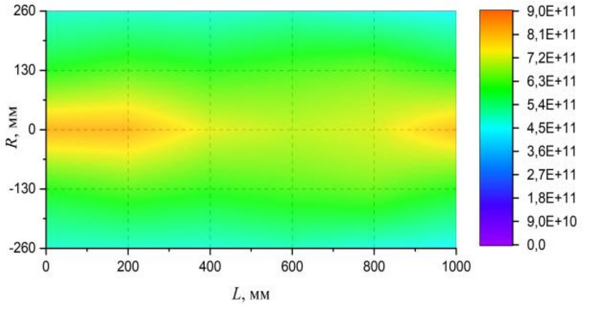


Рис. 2. Распределение концентрации плазмы при совместном включении источников электронов №1 и №2, при токах дугового разряда 45 А (режим 7)

При включении двух источников электронов по 45 А коэффициент неоднородности в продольном направлении не превышает 8% процентов. На рис. 3 представлено суммарное распределение концентрации плазмы при токах дугового разряда 45 А (режим 8).

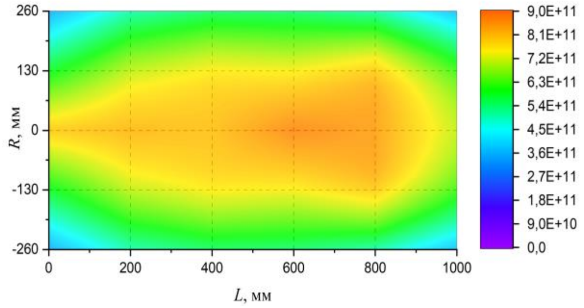
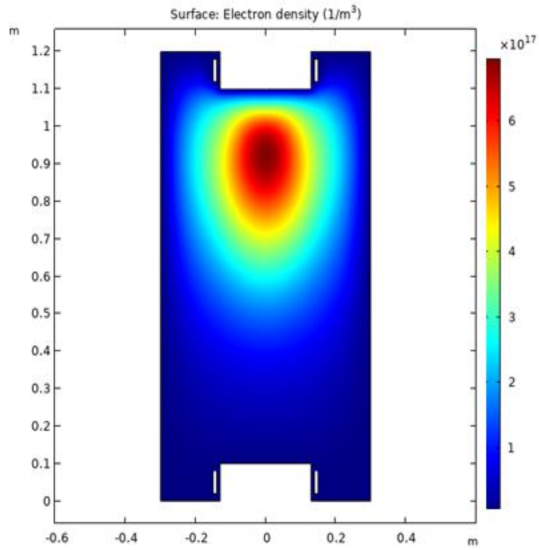


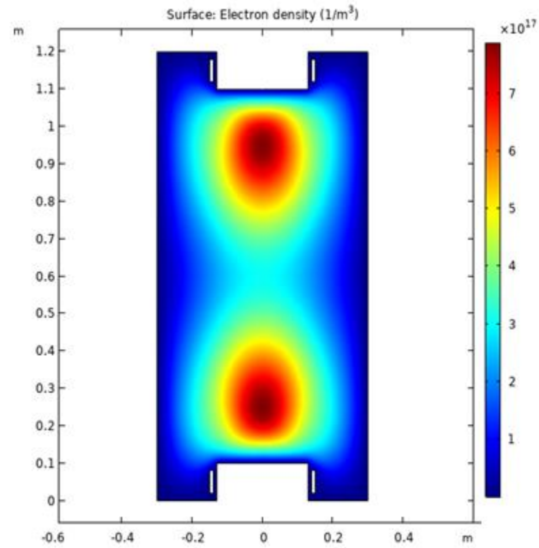
Рис. 3. Суммарное распределение концентрации плазмы при токах дугового разряда 45 А (режим 8)

Максимальное численное отклонение значений концентраций плазмы для режимов 7 и 8 составляет 26% и наблюдается в области геометрической тени инжектируемых электронов. При включении двух источников электронов с токами дугового разряда 45 А разница между суммарным распределением концентрации плазмы в продольном направлении (режим 8) и экспериментальным (режим 7) увеличивается по сравнению со случаем включения двух источников электронов с токами дугового разряда 20 А (режим 4 и режим 3 соответственно). Это можно объяснить тем, что при токах дугового разряда 45 А распределение потенциала плазмы становится более неоднородным.

С использованием интерфейса COMSOL/DC Discharge построена численная 2D-модель несамостоятельного тлеющего разряда постоянного тока в режиме низкого давления. Электронная плотность и средняя энергия электронов рассчитываются путем решения дрейфовых уравнений диффузии для электронной плотности и средней энергии с ненулевыми правыми частями, описывающими рождение и гибель частиц, решается уравнение Пуассона для электростатического потенциала. Разряд поддерживается эмиссией вторичных электронов на катоде и током инжекции электронов источника(ов). На рис. 4 показана расчетная область и распределение концентрации плазмы при инжекции электронов из одного и двух источников. Численные расчеты показали, что при использовании двух источников реализуется принцип суперпозиции распределения плотности плазмы, на который влияют симметрия расположения источников, геометрия поверхности инжекции и электронный ток.



(а)



(б)

Рис. 4. Распределение концентрации плазмы при включении одного (а) и двух источников электронов (б)

Заключение

При включении двух источников электронов с токами 45 А максимальная неоднородность в продольном направлении составила 8%, в радиальном 34% максимальное отклонение коэффициентов неоднородности 25%. Максимальное численное отклонение значений концентраций плазмы для эксперимента и распределения, полученного в результате сложения распределений, полученных при отдельной работе источников электронов, составляет 26% и наблюдается в области геометрической тени инжектируемых электронов. Дополнительные исследования показали, что при включении двух источников электронов с токами 45 А неоднородность распределения потенциала плазмы возрастает, что приводит к направленному движению низкоэнергетичных электронов в сторону увеличения потенциала. Длина свободного пробега электрона между кулоновскими взаимодействиями уменьшается, что приводит к более частому изменению траектории движения заряженных частиц и как следствие к улучшению распределения концентрации плазмы в полом катоде. В случае арифметического сложения распределений, полученных при отдельной работе источников электронов, данная особенность не учитывается. Это приводит к возрастанию рассогласования экспериментального и суммарного распределений при увеличении тока инжекции источников электронов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

Библиографические ссылки

1. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. Москва: Техносфера, 2012. 464 с.
2. Денисов В.В., Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Ковальский С.С., Лопатин И.В., Островерхов Е.В. Режимы горения несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом при повышенных значениях токов. *Изв. ВУЗов. Физика* 2017; 60(10/2): 39-43.
3. Денисов В.В., Коваль Н.Н., Денисова Ю.А., Лопатин И.В., Островерхов Е.В. *Изв. вузов. Физика* 2019; 62(7): 46-52.
4. Биберман Л.М., Воробьёв В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. Москва: Наука; 1982. 375 с.