

верхности камеры на расстоянии 5 мм, исследовались микротвердость с обеих сторон пластинки.

Анализ экспериментальных результатов, представленных на рис. 4, показывает, что упрочнение поверхностного слоя технически чистого титана зависит от температуры, и от времени азотирования. При температуре 500 °С упрочнение поверхностного слоя не выявляется, что свидетельствует о низком уровне насыщения поверхностного слоя азотом. При температурах выше 600 °С наблюдается упрочнение поверхностного слоя и лицевой и тыльной сторон образца.

Сравнение экспериментальных результатов и результатов численного моделирования диффузии показывает, что распределение микротвёрдости поверхностного слоя титана и концентрации азота имеют одинаковые зависимости от времени и температуры. Это означает, что математическая модель (1) – (4) достаточно хорошо описывает диффузию атомов азота в титан и может быть использована для исследования процесса азотирования технически чистого титана и изучения возможности ее применения для других металлов и сплавов.

Заключение. В работе проведено моделирование диффузии азота в технически чистый титан при различных температурах образца. Получено, что распределение микротвёрдости поверхностного слоя титана и концентрации азота имеют одинаковые зависимости от времени и температуры. Исходя из результатов моделирования, можно сказать, что данная модель хорошо описывает эксперимент и может быть использована для получения параметров, требуемых для нужного результата азотирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu.N. Akhmadeev, I.V. Lopatin, N.N. Koval, P.M. Schanin, Yu.R. Kolobov, D.S. Verzhinin, and M.Yu. Smolyakova//Influence of Plasma-Forming Gas Composition on Nitriding in Non-Selfsustained Glow Discharge with Large Hollow Cathode//10th Intern. Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flow/ Tomsk, 19-24 September 2010. P. 526-529.
2. Ахмадеев Ю.Х. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для азотирования титана. Автореферат диссертация 2007.
3. И.В. Лопатин, Ю.Х. Ахмадеев, Н.Н. Коваль и др. Генераторы плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема // Приборы и техника эксперимента. - №1. – 2011. – С. 151 – 156.
4. И.М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков: ННЦ ХФТИ. - 2006. – 364 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРОННОМ ИСТОЧНИКЕ С СЕТОЧНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ГРАНИЦЫ

Нгуен Бао Хынг

(г. Томск, Томский политехнический университет)

baohung.ng@gmail.com

MODELLING OF PLASMA GENERATION IN THE ELECTRON SOURCE WITH A GRID-STABILIZED PLASMA EMISSION BOUNDARY

Nguyen Bao Hung

(Tomsk, Tomsk Polytechnic University)

The paper demonstrates the dependencies of discharge plasma characteristics and the voltage between cathode and emission electrodes on discharge current and gas pressure in the electron source based on a low-pressure arc discharge with a grid-stabilized plasma emission boundary.

Key words: electron beam, plasma electron source, plasma cathode, plasma potential, low-pressure discharge

1. Введение. Стабильная генерация плазмы и электронного пучка плотностью тока ($j_b = 1 \div 10 \text{ А/см}^2$) получена в плазменных источниках (рис. 1) с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы [1 – 3]. В этих источниках эмиссия электронов осуществляется с частично открытой плазменной поверхности в центральной части ячеек сетки и через потенциальный барьер по их краям. Эмиссия электронов из плазмы может не только изменять ее потенциал, но и влиять на другие параметры плазмы. Данная работа посвящена исследованию зависимостей концентрации и потенциала плазмы от тока разряда, давления газа и режима работы источника с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы. Проводится сравнение численных расчетов с экспериментом.

2. Плазменный источник электронов [3]. Разрядная система плазменного катода частично погружена в расходящееся магнитное поле соленоида 7, в районе эмиссионной сетки $B_g = 25 \div 35 \text{ мТл}$. Электронный пучок извлекается через сеточный электрод 3 ($\varnothing 60 \text{ мм}$, размер ячеек $(0.3 \times 0.3) \text{ мм}$) и транспортируется в трубе дрейфа 4 ($\varnothing 80 \text{ мм}$, длина 250 мм) до коллектора 5, анод 2 - $\varnothing 80 \text{ мм}$, длина 70 мм .

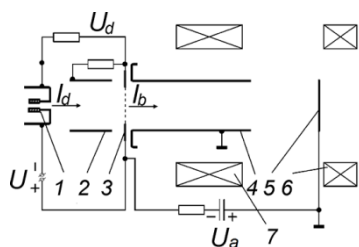


Рис. 1. Схема электродов электронного источника с плазменным катодом: 1 – катод, 2 – анод, 3 – эмиссионный сеточный электрод, 4 – труба дрейфа, 5 – коллектор, 6, 7 – соленоиды [3]

3. Характеристики разрядной плазмы. Исследование характеристик разрядной плазмы в электронной системе плазменного катода проводилось с применением численной дрейфово-диффузионной модели. На рис. 2 в режиме без эмиссии электронов показано распределение плотности аргоновой плазмы в неоднородном магнитном поле при давлении газа $0,1 \text{ Па}$ в разрядной области, магнитное поле у края сетки 25 мТл . На рис. 3 показаны зависимости концентрации n_e и потенциала φ плазмы от давления газа в центральной области эмиссионной сетки при двух значениях тока разряда 150 и 250 А . Температура плазмы T_e при токе 150 А уменьшалась от 18 до 10 эВ при увеличении давления от $0,05 \text{ Па}$ до $0,2 \text{ Па}$.

4. Потенциал плазмы. В эксперименте измерялась разность потенциалов между электродами 1 и 3 $U_d = -|U_c| + \varphi$ (рис.1), где U_c – напряжение на прикатодном слое пространственного заряда, φ – потенциал плазмы относительно эмиссионного электрода. Исходя из условия непрерывности тока в плазменном катоде получены выражения для φ в режимах без и с эмиссией электронов с открытой плазменной границы:

$$\varphi = \frac{kT_e}{e} \ln \left(\frac{j_{ch} S_a}{I_d} \right) \quad \text{и} \quad \varphi = \frac{mc^2}{e} \left[\frac{4\sqrt{2\pi} I_d}{NI_A} \right]^{2/3} \left[\left(\frac{j_{ch} S_e}{I_d} \right)^{1/2} - 1 \right]^{3/4} .$$

Здесь k – постоянная Больцмана, T_e , e , m – температура, заряд и масса электрона, j_{ch} – плотность хаотического тока, S_a – площадь анода, I_d – ток разряда, c – скорость света, $I_A = 17 \text{ кА}$, S_e – площадь открытой поверхности эмиссионного электрода, N – отношение площади сетки к площади ячейки.

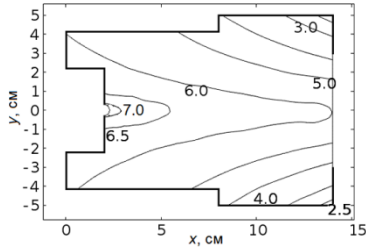


Рис. 2. Распределение плотности разрядной плазмы в электродной системе (10^{11} см^{-3}) плазменного катода.

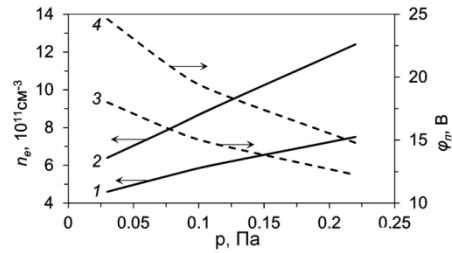


Рис. 3. Зависимости концентрации n_e (1, 2) и потенциала ϕ (3, 4) разрядной плазмы от давления газа (аргон). 1, 3 – $I_d = 150 \text{ A}$; 2, 4 – $I_d = 250 \text{ A}$

На рис. 4 показана экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости напряжения U_d от давления газа (аргон) в режиме без эмиссии электронов (3,4) и в режиме с эмиссией (1,2). Характерной особенностью источника является смена полярности напряжения U_d в режиме эмиссии электронов. Смена полярности напряжения U_d обусловлена влиянием ускоряющего поля на формирование слоя положительного заряда в области эмиссионных отверстий. Относительно сильная зависимость U_d от давления (рис. 4) определяется зависимостью потенциала $\phi(n_i)$ от концентрации плазмы n_i , концентрация плазмы увеличивается практически линейно с увеличением давления газа. Как видно из рис. 4 а и б, выражения для потенциала плазмы (1) отражают экспериментальные зависимости и описывают основные физические механизмы.

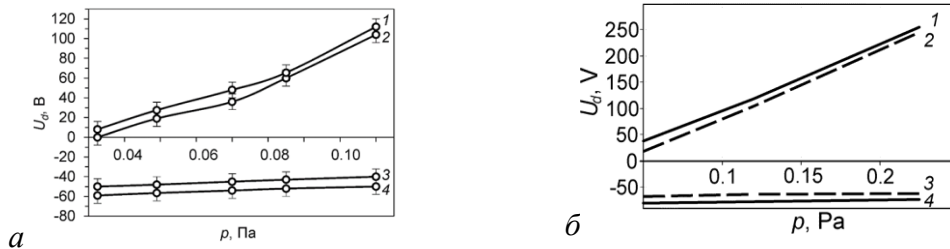


Рис. 4. Экспериментальные (а) и расчетные (б) зависимости напряжения U_d от давления p ; 1,2 – $U_b = 10 \text{ кВ}$, 3,4 – $U_b = 0$, 1,4 – $I_d = 250 \text{ A}$, 2,3 – $I_d = 150 \text{ A}$.

5. Заключение. В работе проведено исследование характеристик разрядной плазмы с применением моделирования. С помощью аналитической модели показана сильная зависимость потенциала сеточного электрода от давления газа и, соответственно, концентрации разрядной плазмы. Получено качественное совпадение численных расчетов с экспериментальными зависимостями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977 – 144 с.
2. Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией // ЖТФ. – 1986. – Т. 56. № 1 – С. 66–71.
3. Devyatkov V.N., Koval N.N. Effect of electron extraction from a grid plasma cathode on the generation of emission plasma // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 552, – №. 0102014.