

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ В ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Нгуен Бао Хынг

Томский политехнический университет, Институт кибернетики
baohung.ng@gmail.com

Введение

Стабильная генерация эмиссионной плазмы и получение электронного пучка с высокой плотностью тока ($j_b = (1-10) \text{ A/cm}^2$) в плазменных источниках получена при сеточной стабилизации границы эмиссионной плазмы [1-3]. В этих источниках эмиссия электронов из плазмы 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.

В данной работе исследуется влияние положительной обратной связи между разрядной областью и плазменным анодом на генерацию плазмы и электронного пучка. Исследуется зависимость потенциала плазмы и напряжения между катодным и эмиссионным электродом от тока разряда и давления газа. Рассматривается режим извлечения электронного пучка из плазменного катода, при котором в эксперименте наблюдается существенное увеличение амплитуды эмиссионного пучка и тока разряда, по сравнению с режимом, когда из плазменного катода не осуществляется извлечение электронов.

Плазменный источник электронов

Упрощенная схема источника показана на рис. 1. 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 эмиссионное окно диаметром 60 мм, перекрытое сеткой из нержавеющей стали с размером ячеек $(0.3 \times 0.3) \text{ мм}$, и транспортируется в трубе дрейфа 4 (диаметром 80 мм) до коллектора 5, установленного на расстоянии 250 мм от сеточного электрода 3, диаметр анода 2 составлял 80 мм, а длина 70 мм. В данном источнике электронов существенную роль играет взаимосвязь между процессами, происходящими в плазменном аноде, образующемся в пространстве дрейфа пучка при ионизации им рабочего газа, и плазменном катоде, связанными с развитием вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности сеточного электрода 3 [4-6]. Измеренное при $p = 0.07 \text{ Па}$ напряжение на разрядном промежутке U_d изменялось в диапазоне (20-70) В при изменении тока разряда I_d от 80 А до 280 А. На рис. 4 показаны зависимости напряжения U_d от давления рабочего газа (в плазменном аноде) для режимов без эмиссии электронов (кривые 3 и 4) и в режиме с

эмиссией электронов (кривые 1 и 2) при двух значениях тока разряда 150 и 250 А.

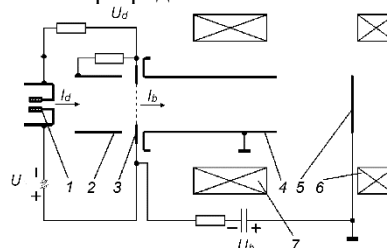


Рисунок 1 - Схема электродов электронного источника с плазменным катодом: 1 – катод, 2 – анод, 3 – эмиссионный сеточный электрод, 4 – труба дрейфа, 5 – коллектор, 6, 7 – соленоиды.

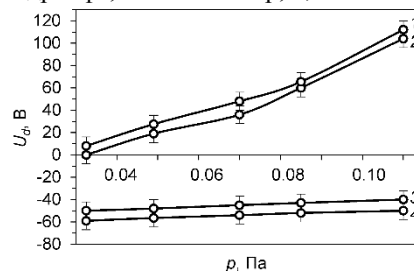


Рисунок 2 - Экспериментальные зависимости напряжения U_d от давления p (в районе эмиссионной сетки): $U_b = 10 \text{ кВ}$ (1,2); $U_b = 0$ (3,4); $I_d = 250 \text{ А}$ (1,4); $I_d = 150 \text{ А}$ (2,3); $B_g = 25 \text{ мТл}$

Численные результаты

Исследование характеристик разрядной плазмы в электронной системе плазменного катода проводилось с применением численной дрейфово-диффузионной модели. На рис. 3 в режиме без эмиссии электронов показано распределение плотности плазмы в неоднородном магнитном поле при давлении газа 0,1 Па (аргон) в разрядной области, магнитное поле у края сетки 25 мТл. Как видно из рисунка, распределение концентрации плазмы неоднородное, что определяет и радиальную неоднородность распределения плотности тока генерируемого электронного пучка.

На рис. 4 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 Па до 0,2 Па. В расчетах учитывалось, что давление в плазменном катоде в 1,5 – 2 раза выше, чем за эмиссионной сеткой плазменного катода в области транспортировки электронного пучка.

Напряжение между катодным и сеточным электродами 1 и 3 (рис.1) в режиме эмиссии электронов: $U_d = -|U_d| + U_f + \varphi$, где U_f - потенциал ускоряющего поля между торцом трубы дрейфа и эмиссионным электродом (рис. 1). На рис. 5 показана расчетная зависимость напряжения U_d от давления газа (аргон) в режиме без эмиссии электронов (3, 4) и в режиме с эмиссией (1, 2). В режиме без эмиссии электронов при вычислении кривых 3 и 4 использовались расчетные концентрации и температура плазмы (рис. 4).

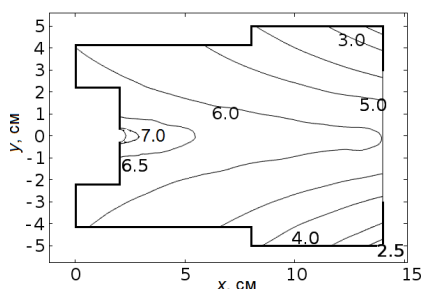


Рисунок 3 - Распределение плотности разрядной плазмы в электродной системе (10^{11}см^{-3}) плазменного катода.

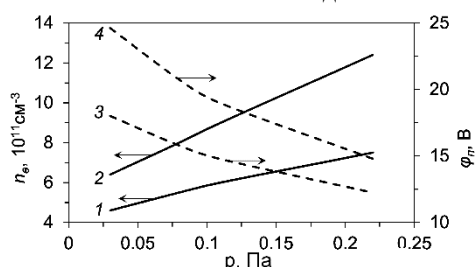


Рисунок 4 - Зависимости концентрации n_e (1,2) и потенциала φ (3,4) разрядной плазмы от давления газа (аргон). 1, 3 – $I_d = 150$ А; 2, 4 – $I_d = 250$ А

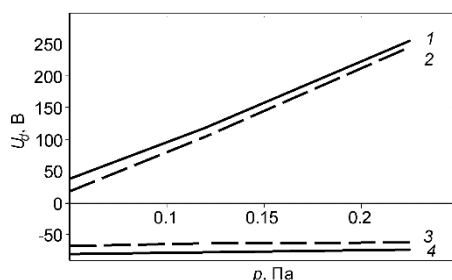


Рисунок 5 - Расчетные зависимости напряжения U_d от давления p (в районе эмиссионной сетки); 1,2 – $U_b = 10$ кВ, 3,4 – $U_b = 0$, 1,4 – $I_d = 250$ А, 2,3 – $I_d = 150$ А.

Зависимости напряжения U_d для режима с эмиссией электронов (кривые 1 и 2 на рис. 5) получены по формуле (4). Смена полярности напряжения U_d в этом режиме (рис. 2 и рис. 5) обусловлена влиянием ускоряющего поля на формирование слоя положительного заряда в области эмиссионных отверстий. Относительно сильная зависимость U_d от давления обусловлена зависимостью потенциала плазмы φ от

концентрации плазмы, которая увеличивается практически линейно с ростом давления газа.

При увеличении тока разряда I_d с 150 до 250 А напряжение U_d растет практически на постоянную величину во всем рассматриваемом диапазоне давлений (рис. 2 и рис. 5). Из этого следует, что при увеличении I_d изменение тока эмиссии происходит в основном за счет быстрых электронов, которые замыкаются через ячейки сетки в ускоряющий промежуток.

Заключение

Экспериментальные и расчетные зависимости показать качественное согласие, смена полярности напряжения U_d в режиме эмиссии электронов связана с влиянием ускоряющего поля на формирование слоя положительного заряда в области эмиссионных отверстий. Напряжение U_d имеет сильную зависимость от давления газа, следовательно, и от концентрации разрядной плазмы. Амплитуда и форма импульса тока пучка и тока разряда определяются процессами в плазменном аноде, связанными со скоростью объемной ионизации газа электронным пучком и ионно-электронной эмиссией на эмиссионном электроде. Положительная обратная связь может обеспечить одновременный рост разрядного и эмиссионного токов.

Экспериментальная часть работы выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00091).

Список использованных источников

1. Крейндель Ю. Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. -145с.
2. Жаринов А. В, Коваленко Ю. А., Роганов И. С., Тюрюканов П. М. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. I. // ЖТФ, 1986, Т.56, В.1, с.66.
3. Коваль Н.Н., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Генерирование импульсных электронных пучков с равномерным распределением высокой плотности тока в системах с плазменным сетчатым эмиттером // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 9. С. 1846–1848.
4. Devyatkov V.N., Koval N.N. 2014 Effect of electron extraction from a grid plasma cathode on the generation of emission plasma // Journal of Physics: Conference Series 552 0102014.
5. Koval N N, Grigoryev S V, Devyatkov V N, Teresov A D, Schanin P M 2009 Effect of Intensified Emission During the Generation of a Submillisecond Low-Energy Electron Beam in a Plasma-Cathode Diode // IEEE Transactions on Plasma Science V. 37. P. 1890
6. Devyatkov V N, Koval N N and Schanin P M 2001 Generation of high-current low-energy electron beams in systems with plasma emitters // J Russian Physics Journal V.44 No.9 P.937