

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБОЯ УСКОРЯЮЩЕГО ПРОМЕЖУТКА В ЭЛЕКТРОННЫХ ИСТОЧНИКАХ С СЕТОЧНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ГРАНИЦЫ ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Нгуен Бао Хынг

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
baohung.ng@gmail.com

Введение

В электронных источниках с плазменным катодом с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы получена стабильная генерация эмиссионной плазмы и электронного пучка с высокой плотностью тока $j_b = (1 \div 10) \text{ А/см}^2$ при ускоряющем напряжении $U_a = (10 \div 90) \text{ кВ}$ [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. Пробой ускоряющего промежутка ограничивает предельные параметры данных источников.

В данной работе проводится теоретическое исследование потенциала сеточного электрода относительно плазмы в электронном источнике с плазменным катодом при сеточной стабилизации плазменной границы и механизма пробоия ускоряющего промежутка.

Потенциал плазмы

Упрощенная схема источника на основе системы СОЛО [1-2] показана на рис. 1. В источнике с многодуговым эмиттером [3] используется несколько катодов. Электронный пучок извлекается через эмиссионное окно, перекрытое сеткой 3 и транспортируется в трубе дрейфа 4 до коллектора 5.

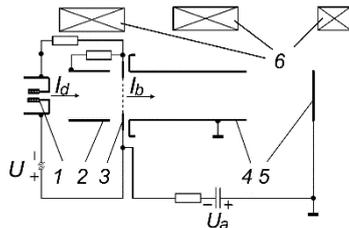


Рис. 1. Схема электродов электронного источника с плазменным катодом: 1 – катод, 2 – анод, 3 – эмиссионный сеточный электрод, 4 – труба дрейфа, 5 – коллектор, 6 – соленоиды

Исходя из уравнения баланса токов в плазменном катоде можно записать выражение для потенциала плазмы относительно эмиссионного электрода:

при эмиссии электронов через потенциальный барьер, $\varphi_n > DU$:

$$\varphi_n = \frac{kT_e}{e} \ln \left[\frac{j_{ch}}{\Delta I_d} \left(S_a + S_e \exp \left(\frac{eDU}{kT_e} \right) \right) \right] \quad (1)$$

при эмиссии с открытой плазменной поверхности, $\varphi_n = DU$:

$$\varphi_n = \frac{mc^2}{e} \left[\frac{\Delta I_d}{NI_A} \right]^{2/3} \left[\left(\frac{j_{ch} S_e}{\Delta I_d} \right)^{1/2} - 1 \right]^{4/3} \quad (2)$$

Здесь j_{ch} – плотность хаотического тока, $I_A = 17 \text{ кА}$, ΔI_d – разность тока разряда и быстрых электронов, не участвующих в ионизации газа, S_a – площадь металлических поверхностей, на которые поступают электроны, S_e – площадь открытой поверхности сеточного электрода, $N = S_e / (2r_0 + \rho)^2$; r_0 – радиус ячейки сетки; ρ – диаметр проволоки сетки; e и T_e – заряд и температура электронов. Ускоряющее поле, проникающее через ячейки сетки, может быть представлено зависимостью $DU(z) = c_1(r_0 U_a / d) \times \exp(-c_2(\rho - z)/r_0)$; z – осевая координата относительно ячейки сетки, $z = 0$ – плоскость сетки со стороны разрядной плазмы, c_1 , c_2 – постоянные, зависящие от прозрачности сетки; d – ширина ускоряющего промежутка в плазменном аноде, определяемая в соответствии с «законом 3/2».

Пробой ускоряющего промежутка

Пробой ускоряющего промежутка ограничивает возможности увеличения энергии генерируемого электронного пучка в плазменном источнике. Сетка стабилизирует границу плазмы до тех пор, пока рост эмиссионного тока компенсируется увеличением потенциала плазмы и, соответственно уменьшением площади эмиссионной поверхности за счет увеличения протяженности слоя пространственного заряда, который отделяет плазму от сеточного электрода. Эмиссия электронов в ускоряющий промежуток происходит с эмиссионной поверхности, координата которой $z_{pl} = \rho [1 - (r_0/c_2) \ln(c_1 c_2 U_a / dE)]$ определяется из равенства газокINETического давления плазмы $E^2 = 8\pi k T_e n_i$ и давления электростатического поля.

На рис. 2 при разных размерах ячейки сетки показана зависимость относительной координаты границы эмиссии z_{pl}/ρ от параметра $\xi = U_a/dE$, где ξ зависит от ускоряющего напряжения, от плотности тока пучка, от концентрации и температуры плазменных электронов.

В электронных источниках с плазменным катодом, как показали эксперименты [2,3], существует некоторое максимальное значение плотности энергии электронного пучка, при котором отсутствует пробой, в узком диапазоне давлений.

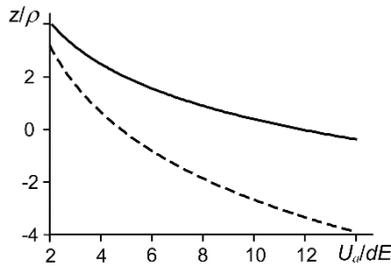


Рис. 2. Зависимость относительной координаты границы эмиссии от отношения U_d/dE ; 1 – $r_0 = 0,15$ мм; 2 – 0,3 мм

При устойчивой работе электронного источника с плазменным катодом ток эмиссии не превышает ток разряда, а потенциал плазменного электрода ниже критического значения $\varphi_{cr,n}$, при котором происходит пробой слоя плазма – анод (сеточный электрод). Нарушение этих положений, записанное в виде неравенств,

$$\varphi_{cr,n} \leq \frac{mc^2}{e} \left(\frac{eU_a}{mc^2} \right)^{1/4} \left(\frac{9\pi r_0^2 c_1^2 j_b}{\sqrt{2} I_A} \right)^{1/2} f(z_{pl}) < \frac{mc^2}{e} \left(\frac{\Delta I_d}{NI_A} \right)^{2/3} \left[\left(\frac{j_{ch} S_e}{\Delta I_d} \right)^{1/2} - 1 \right]^{4/3}, \quad (3)$$

является условием пробоя ускоряющего промежутка

где $f(z_{pl}) = \exp(-(\rho - z_{pl})/r_0)$. Определяющим фактором для межэлектродного пробоя (3) является превышение потенциала плазмы выше критического значения зажигания разряда $\varphi_{cr,n}$.

Если потенциал плазмы $\varphi_n < \varphi_{cr,n}$ и выполняется только правое неравенство в выражении (3) ($DU(z_{pl}) < \varphi$), то при $z_{pl} < 0$ эмиссия электронов в ускоряющий промежуток с открытой плазменной поверхности переходит в эмиссию через потенциальный барьер.

Плазменный пробой происходит при $z_{pl} > \rho$. Модель плазменного пробоя рассмотрена в работе [4], суть которой состоит в том, что пробой ускоряющего промежутка наступает при проникновении в него плазмы из разрядной области, при котором переключение разрядного тока с разрядной плазмы на ускоряющий электрод, сопровождается резким падением напряжения на ускоряющем промежутке.

Из анализа экспериментальных данных электронных источников с плазменным катодом на основе дугового разряда [1-3] следует, что предельные параметры, связанные с пробоем ускоряющего промежутка, связаны с ограничением по плотности энергии переносимой электронным пучком в плазменном аноде. Максимальное значение потенциала плазмы, при котором отсутствует пробой ускоряющего промежутка

$$\varphi_{max} = c_3 \frac{mc^2}{e} \left(\frac{eU_a}{mc^2} \right)^{1/4} \left(\frac{9\pi r_0^2 c_1^2 j_b}{\sqrt{2} I_A} \right)^{1/2} \quad (4)$$

где $c_3 = 1,5$ – постоянная учитывает отличие «закона 3/2» для плазменного диода от вакуумного диода. Исходя из формулы (4) оценим максимальные значения потенциала плазмы в электронных источниках с плазменным катодом. В электронном источнике [1] при давлении газа (аргон) 0,11 Па получен $\varphi_{max} = 170$ В. В источнике на основе системы «СОЛЮ» [2] $\varphi_{max} = 255$ В, в источнике с многодуговым эмиттером [3] $\varphi_{max} = 270$ В, давление газа (аргон) 0,045 и 0,035 Па, соответственно.

Заключение

В электронном источнике с плазменным катодом существенную роль играет взаимосвязь между процессами, происходящими в плазменном аноде, образующемся в пространстве дрейфа пучка при ионизации им рабочего газа, и плазменном катоде. В режиме усиления тока эмиссии основным механизмом пробоя ускоряющего промежутка в плазменных источниках с дуговым разрядом является пробой, ограничивающий пороговую энергию пучка. Определяющим фактором для межэлектродного пробоя является превышение потенциала плазмы выше критического значения $\varphi_{cr,n}$, которое зависит от плотности мощности электронного пучка, давления газа. В электронных источниках с плазменным катодом [1-3] в рабочем диапазоне давлений (0,035÷0,1) Па критическое значение составляет $\varphi_{cr} \sim (270 \div 170)$ В.

Список использованных источников

1. 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 552, 2014. – 012014. – doi:10.1088/1742-6596/552/1/012014.
2. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Schanin P.M. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode // IEEE Transactions On Plasma Science – 2009. – V. 37(10), – P. 1890-1896.
3. Vorobev M.S., Gamermaister S.A., Devyatkov V.N., Koval N.N., Sulakshin S.A., Shchanin P.M. An electron source with a multiarc plasma emitter for obtaining submillisecond pulsed megawatt beams // Tech. Phys. Lett., – 2014, – № 6, – V. 40, – P. 506-508.
4. Григорьев В. П., Коваль Т.В., Озур Б. Е. Формирование и транспортировка низкоэнергетических сильноточных электронных пучков в плазмонаполненном диоде во внешнем магнитном поле // ЖТФ, – 2010. – В. 1. – Т. 80. – С. 103-109.