УДК 537.533

М. А. СКОВОРОДКО

# К РАСЧЁТУ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМИССИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Представлена математическая модель, описывающая взаимозависимость высоты формируемого столба плазмы в эмиссионном канале от геометрических размеров канала.

Формирование плазменной поверхности в эмиссионных каналах является важным аспектом в области плазменных технологий. Эмиссионный канал в плазменных источниках заряженных частиц представляет собой пространство, где происходит формирование эмитирующей плазменной поверхности.

При этом различают «длинные» и «короткие» каналы. В «длинном» канале возможно получение плазменной поверхности с более равномерным распределением температуры и плотности плазмы. В «коротком» – плазма, формируемая на меньшем расстоянии, приводит к более высокой плотности энергии, но меньшей стабильности, что может быть полезно для точечной обработки материалов.

От геометрических параметров канала зависит характер проникновения плазменной поверхности в эмиссионный канал. Увеличивая высоту канала, можно увеличить объем, но при этом снизить плотность плазмы. Расширяя канал, можно улучшить распределению потока, однако увеличить потери частиц из-за расширения потока. В «длинном» канале на формирование эмитирующей плазменной поверхности определяющее влияние оказывает влияние поле пристеночного слоя, в «коротком» – поле ускоряющего электрода.

Эмиссионная способность плазмы, формируемой в области эмиссионного канала, зависит от формы эмитирующей поверхности, параметров пристеночного слоя, напряженности ускоряющего поля в канале.

Главным параметром, определяющим эффективность плазменных источников заряженных частиц, является эффективность извлечения, характеризуемая коэффициентом извлечения α [1]:

$$\alpha = \frac{I_e}{I_d},$$

который определяется, как отношение тока эмиссии $I_e$ к току разряда $I_d$.

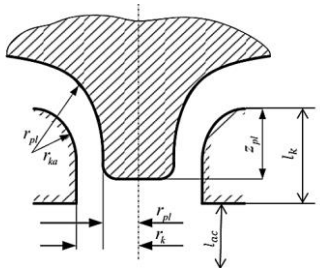



**Рисунок 1 – Геометрия эмиссионного «короткого» канала при формировании столба плазмы $z_{pl}$**

Основной задачей при создании математической модели является установление зависимости коэффициента извлечения от геометрических размеров и формы эмиссионного канала. Ток эмиссии зависит от плотности тока $j_e$ и площадь плазменной поверхности $S_e$ [2; 3]:

$$I_e = j_e S_e,$$

$$j_e = \frac{1}{4} e n_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}},$$

($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, – заряд электрона, $n_e$ – концентрация плазмы на границе, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $T_e$ – электронная температура плазмы, $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона).

$$S_e = f S_{em},$$

где $S_{em}$ – площадь эмиттерного электрода, с которого электроны уходят из плазмы ($S_{em} = \pi r_k^2, r_k$ – радиус эмиссионного канала).

$f$ – функция относительной площади эмитирующей поверхности, которая получается при совместном решении системы, состоящей из:

- уравнения зависимости площади эмитирующей поверхности от тока разряда и ускоряющего напряжения [2; 4]:

$$\frac{1}{4} e n_i \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} S_e = \frac{4\sqrt{2}}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{e}{m_e}} \frac{{\varphi_0}^{3/2}}{d^2} S_0$$

- и формулы расстояния между эмитирующей плазменной поверхностью и поверхностью эмиттерного электрода (для полусферической поверхности)

$$d = \sqrt{\frac{S_e}{2\pi}} - \sqrt{\frac{S_0}{2\pi}}.$$

Таким образом, функция *f* выглядит следующим образом:

$$f = f_0 \left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + A \frac{{\varphi_0}^{3/4}}{\sqrt{n_i}}} \right)^2,$$

где $A = \sqrt{\frac{16\pi\varepsilon_0}{9 S_{em} f_0 \sqrt{ekT_e}}}$, $f_0 = \frac{S_0}{S_{em}}$, $S_0 = \pi r_{pl}^2$ – площадь сечения канала ($r_{pl}$ – радиус плазменной поверхности).

Для модели «короткого» канала радиус плазменной поверхности рассчитывается $r_{pl} = \sqrt{0{,}25C^2 - r_k(r_k + r_{ka})} - 0{,}5C$ ($r_{ka}$ – радиус электрода, собирающего ионы) [5; 6].

$$C = r_{ka} + 2r_k + \frac{10}{9} \sqrt{\frac{e}{kT_e}} \frac{\varepsilon_0 \cdot \varphi_{em}^{3/2}}{0{,}14 r_{ka} e n_i},$$

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м$^2$ – электрическая постоянная,

$\varphi_{em}$ – потенциал плазмы относительно потенциала стенок канала (эмиттерного электрода).

$\varphi_0 = DU_{ac} - \varphi_{em}$ – падение потенциала в слое объемного заряда, равного радиусу сферы, с помощью которой аппроксимируется плазменная поверхность,

$U_{ac}$ – ускоряющее напряжение,

D – коэффициент электрической проницаемости эмиссионного канала [5; 6]:

$$D = 0{,}267 \frac{r_k}{l_{ac}} \exp\left( -2{,}36 \frac{l_k - z_{pl}}{r_k} \right),$$

$l_{ac}$ – длина ускоряющего промежутка,

$l_k$ – длина эмиссионного канала.

Положение плазменной поверхности задается выражением [4; 5]:

$$z_{pl} = l_k - \frac{r_k}{2{,}36} ln\left( \frac{r_k}{l_{ac}} \frac{0{,}267 U_{ac}}{\varphi_{em}} \right).$$

Данные расчеты могут использоваться при создании компьютерной модели, визуализирующей картину зависимости проникновения плазмы в эмиссионный канал от геометрических данных самого канала.

*Список литературы*

1. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю. Е. Крейндель [и др.] ; под общ. ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.

2. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. – М. : Мир, 1987. – 398 с.

3. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом / Е. М. Окс. – Томск : Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.

4. Франк-Каменецкий, Д. А. Лекции по физике плазмы / Д. А. Франк-Каменецкий. – М. : Атомиздат, 1964. – 283 с.

5. Груздев, В. А. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов / В. А. Груздев, В. Г. Залесский // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 87–92.

6. Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно – оптические системы плазменных источников электронов : дис. … д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В. Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 л.

This paper presents a mathematical model describing the relationship between the plasma column height and the geometric dimensions of the emission channel.

*Сковородко Марина Александровна*, аспирант Витебского государственного университета имени П. М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь, volal26@ya.ru.

Научный руководитель – *Антонович Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент, заведующий сектором лучевых методов сварки отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы ГНУ ФТИ Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь.