

Секция 1
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

УДК 537.533; 621.384

**АНАЛИЗ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ
МЕЖДУ ПЛОСКИМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
В ИСТОЧНИКЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ**

канд. техн. наук, доц. Д. А. АНТОНОВИЧ, Д. В. ШИДЛОВСКАЯ

*(Витебский государственный университет
имени П. М. Машерова, Беларусь)*

Представлена краткая физическая формулировка результатов наложения двух систем: электронно-оптической и ионнооптической, получены соотношения, определяющие характер влияния на параметры электрического слоя между двумя плазмами, полученные результаты могут быть использованы для численного моделирования электронно-ионных оптических характеристик электрических слоев в плазме мультиразрядных структур для формирования совмещенных электронно-ионных пучков технологического назначения.

***Ключевые слова:** поток заряженных частиц, плазменные источники, электронно-оптические системы, вторичная плазма, модель электрического слоя.*

Перспективы и преимущества источников заряженных частиц (ионов и электронов) с плазменным эмиттером для технологического применения обсуждаются и доказываются опытом практического применения уже более пятидесяти лет [1–3]. Однако до настоящего времени в научной литературе обсуждаются вопросы, связанные с формированием плазменных эмиттеров в электронных и ионных оптических системах. Это обусловлено, во-первых, подвижностью плазменного эмиттера при изменении режимов работы источников электронов или ионов и, как следствие, изменением геометрических и электрических параметров формируемых пучков заряженных частиц. Во-вторых, указанные изменения в значительной степени неоднозначны и могут значительно отличаться как качественно, так и количественно в зависимости от условий формирования плазменного эмиттера. В-третьих, в плазменных источниках, работающих при повышенных давлениях в отличие от электронно-оптических систем с твердым эмиттером, более существенное влияние на параметры пучка могут оказывать процессы ионизации газа в промежутке ускорения и дрейфа пучка. Указанные факторы существенно увеличивают объём экспериментального моделирования плазменных источников заряженных частиц и стимулируют

разработку алгоритмов и программ для предварительного численного моделирования с целью снижения объёма экспериментальных исследований.

На протяжении всего опыта практического использования источников заряженных частиц появляются сведения о возможном формировании в плазменных образованиях электрических слоёв. В простейшей физической модели такой слой представляется как слой однонаправленного градиента потенциала между двумя плазмами с различными потенциалами. При этом одна из плазменных поверхностей, ограничивающих электрический слой, является эмиттером в слой ионов, другая – электронов.

Наблюдение возникновения при определенных условиях в плазме различных газоразрядных структур электрических слоёв породило гипотезу о возможности создания источников совмещенных электронно-ионных пучков [4]. Практическая реализация гипотезы стимулируется развитием технологий одновременного воздействия на материалы электронного и ионного пучков, которые в настоящее время генерируются с использованием разделенных источников пучков, что не всегда оказывается оптимальным.

Одним из возможных способов формирования совмещённых пучков ионов и электронов является создание газоразрядной структуры, в плазме которой формируется два последовательно расположенных электрических слоя. Одним из слоёв обеспечивает поток зарядов (ионов или электронов) в другой электрический слой, который обеспечивает поток зарядов другого типа в том же направлении, что и поток зарядов из первоначального слоя и одновременно является «прозрачным» для потока зарядов из первого электрического слоя. Очевидно, что такая система формирования совмещённых пучков заряда значительно сложнее известных плазменных источников электронов или плазменных источников ионов. Однако в известных публикациях отсутствуют в достаточной мере сведения, необходимые для анализа и моделирования формирования слоёв с заданными параметрами, а также реакции параметров слоя на вариации параметров образующих слой плазм.

Далее представлены результаты анализа простейшей (одномерной) модели электрического слоя между плоскими плазменными поверхностями.

В упрощенном варианте (первом приближении) физическую модель электрического слоя (рисунок 1) между двумя плазменными поверхностями можно охарактеризовать следующими параметрами:

- n_1, n_2 – концентрация зарядов в плазменных слоях при равенстве концентрации электронов и ионов в слое;
- φ_1, φ_2 – плазменные слои эквипотенциальны с потенциалами φ_1 и φ_2 ;
- l – толщина электрического слоя на границах слоя, X – протяженность рассматриваемой области пространства с двумя плазменными поверхностями и электрическим слоем между ними;

- для границ a и b выполняется условие $\frac{\partial\varphi}{\partial x}(a)=0, \frac{\partial\varphi}{\partial x}(b)=0$;
- если $\varphi_1 > \varphi_2$, граница (b) плазмы с n_2 обеспечивает эмиссию электронов в электрический слой с плотностью тока j_{e2} , а граница (a) плазмы с n_1 эмитирует в электрический слой ионы с плотностью j_{i1} ;
- если $\varphi_2 > \varphi_1$, в электрический слой будут эмитироваться токи j_{i2} и j_{e1} ;
- наличие обмена плазменных слоев зарядами не приводит к изменению потенциалов слоев (φ_1, φ_2) и концентраций зарядов в них (n_1, n_2).

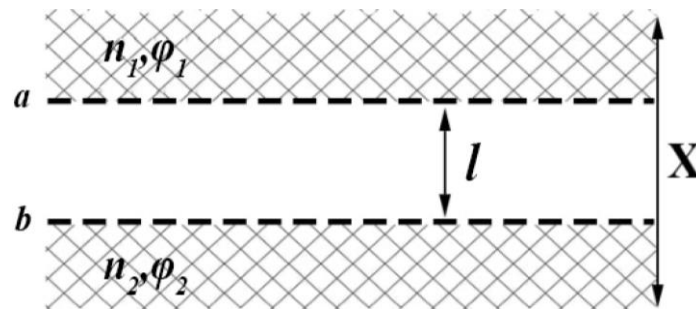


Рисунок 1. – Физическая модель электрического слоя

Рассмотрим распределение потенциала в слое (рисунок 2) вдоль выбранного направления (ось X на рисунке 2) считая координаты x_1 и x_2 , эквипотенциальными границами соответствующих слоев с потенциалами φ_1 и φ_2 . В отсутствие эмиссии зарядов из плазм в электрический слой распределение потенциала в слое можно считать линейным (рисунок 2, пунктирная линия φ_1, φ_2). В случае эмиссии зарядов (j_{i1}, j_{e2}) деформация распределения потенциала в электрическом слое объемными зарядами движущихся в нем качественно можно отобразить сплошной кривой ($\varphi_1, \varphi_c, \varphi_2$ на рисунке 2). Распределение потенциала и другие параметры электрического слоя могут в определенной степени зависеть и от ионизационных процессов в слое. Поэтому целесообразно в качестве параметра электрического слоя ввести в модель слоя концентрацию нейтрального газа в нем n_0 .

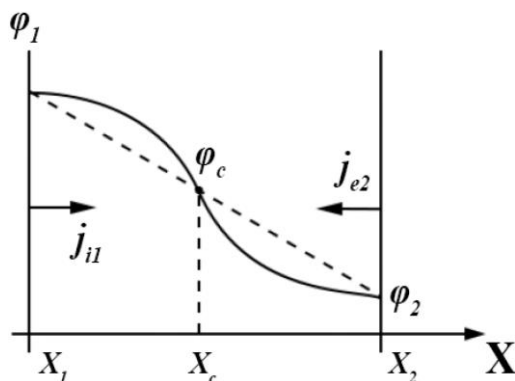


Рисунок 2. – Распределение потенциала в слое

Очевидно, что в точке x_c градиент потенциала $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ должен быть максимальным.

φ_c – можно рассмотреть как потенциал квазинейтральной плоскости как для потока диода с n_i и j_n , так и для электронного диода с n_2 и j_{e2} .

Алгоритм моделирования можно представить следующим.

Начальный этап определения l можно считать как $l = (x_c - x_1) + (x_2 - x_c) = x_2 - x_1$, то есть как сумму двух лэнгмюровских электронного и ионного промежутка (плоских).

На втором этапе моделирование распределения φ_c с учетом объемного заряда электронов в пространство $(x_c - x_1)$ из $(x_2 - x_c)$ и зарядов ионов в область $(x_2 - x_c)$ из $(x_c - x_1)$. При этом x_1 и x_2 будем перемещать относительно x_c . Итерация этого шага позволит установить l стационарно ($l = const$).

Для потоков заряженных частиц, электронов (1) и ионов (2) соответственно, можем записать:

$$j_e = en_e \sqrt{\frac{2kTe}{m_e}} = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{(\varphi_e - \varphi_c)^{\frac{3}{2}}}{l_e^2} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{U_e^{\frac{3}{2}}}{l_e^2} \quad (1)$$

$$j_i = en_i \sqrt{\frac{2kT_i}{m_i}} = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \frac{(\varphi_c - \varphi_i)^{\frac{3}{2}}}{l_i^2} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \frac{U_i^{\frac{3}{2}}}{l_i^2} \quad (2)$$

Откуда можем получить:

$$\frac{j_e}{j_i} \rightarrow \frac{n_e}{n_i} \sqrt{\frac{T_e m_i}{T_i m_e}} = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \frac{l_i^2}{l_e^2} \frac{U_e^{\frac{3}{2}}}{U_i^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

или:

$$\frac{n_e}{n_i} \sqrt{\frac{T_e}{T_i}} = \frac{l_i^2 U_e^{\frac{3}{2}}}{l_e^2 U_i^{\frac{3}{2}}} \rightarrow \frac{l_i}{l_e} = \left(\frac{n_e}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_e}{T_i} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{U_i^{\frac{3}{4}}}{U_e^{\frac{3}{4}}} \quad (4)$$

С другой стороны для $\varphi_c(x_c)$ должно выполняться условие равенства объемных зарядов $\rho_i = \rho_e$, где

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_i = \frac{j_i}{v_i} \\ \rho_e = \frac{j_e}{v_e} \end{array} \right. \quad (5)$$

Откуда можно получить взаимосвязь по концентрации между слоями:

$$n_e \sqrt{\frac{k T_e}{e U_e}} = n_i \sqrt{\frac{k T_i}{e U_i}} \rightarrow \frac{n_e}{n_i} = \sqrt{\frac{T_i U_e}{T_e U_i}}. \quad (6)$$

Или по напряжению:

$$\sqrt{\frac{U_i}{U_e}} = \frac{n_i}{n_e} \sqrt{\frac{T_i}{T_e}} \rightarrow \frac{U_i}{U_e} = \frac{T_i}{T_e} \left(\frac{n_i}{n_e} \right)^2. \quad (7)$$

Записав известный закон «степени 3/2» [5] для плотности электронного (8) и ионного (9) тока

$$j_e = A_e \frac{U_e^{\frac{3}{2}}}{l_e^2}, \text{ где } A_e = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_e}}, \quad (8)$$

$$j_i = A_i \frac{U_i^{\frac{3}{2}}}{l_i^2}, \text{ где } A_i = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_i}}, \quad (9)$$

можем получить аналогичные соотношения для других параметров:

$$\sqrt{\frac{T_i U_e}{T_e U_i}} \sqrt{\frac{T_e}{T_i}} = \left(\frac{l_i}{l_e} \right)^2 \left(\frac{U_e}{U_i} \right)^{\frac{2}{2}} \rightarrow \quad (10)$$

$$\rightarrow \frac{l_i}{l_e} = \left(\frac{U_i}{U_e} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Или с учетом (7) получаем:

$$\frac{l_i}{l_e} = \frac{n_i}{n_e} \sqrt{\frac{T_i}{T_e}}. \quad (12)$$

Полученные результаты численного моделирования показывают влияние параметров электрического слоя между двумя плазмами на его другие параметры и послужат основой для численного моделирования электронно-ионных оптических характеристик электрических слоев в плазме мультиразрядных структур для формирования совмещенных электронно-ионных пучков технологического назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крейндель Ю. Е. Плазменные источники электронов. – М. : Атомиздат, 1977. – 145 с.
2. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В. Т. Барченко [и др.] ; под общ. ред. В. Т. Барченко. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
3. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich, V. Gruzdev, V. Zalesski, I. Pobol & P. Soldatenko // High Temperature Material Processes 21(2):143–159 (2017).
4. Multi-bit structure for the formation of combined or alternating electron-ion beams / D. Antonovich [et al.] // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2020. – Vol. 24, № 2. – P. 147–156.
5. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. – М. : Мир, 1987. – 398 с.