

УДК 537.534

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

*канд. техн. наук, доц. О.Н. ПЕТРОВИЧ, И.С. РУСЕЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Предложен алгоритм численного расчета положительных ионных пучков в ионно-оптической системе с плазменным эмиттером, основанный на дискретизации потока ионов токовыми трубками с учетом подвижности границы плазма–ионный пучок.

Ключевые слова: *положительные ионные пучки, ионно-оптическая система с плазменным эмиттером, численное моделирование пучков заряженных частиц.*

Введение. Источники заряженных частиц находят разнообразное применение в науке и технике. По мере развития вычислительной техники разрабатывалось и совершенствовалось программное обеспечение для моделирования задач сильноточной электронной и ионной оптики. Можно выделить основные этапы численного моделирования электронных и ионных пучков: описание свойств эмиттера заряженных частиц, расчет электромагнитных полей, описание движения потоков заряженных частиц, нахождение объемных зарядов электронов и ионов в расчетной области, определение характеристик пучков заряженных частиц.

Широкое распространение получили ионные и электронные источники, в которых эмиттером заряженных частиц служит газоразрядная плазма. Разработка алгоритмов моделирования электронных и ионных оптических систем с плазменным эмиттером представляет собой сложную задачу, связанную с подвижностью плазменной поверхности. В виду сложности задачи количество программных комплексов, предназначенных для моделирования ионных и электронных источников с плазменным эмиттером сравнительно невелико.

Подробное описание современных вычислительных кодов для расчета плазменных эмиссионных систем представлено в работе [1]. В первую группу пакетов программ можно отнести код PBGUNS [2] и POISSON-2 [3], которые изначально разрабатывались для моделирования электронных, а затем и ионных пучков в системах с плазменным и твердым эмиттером. Ко второй группе относится код КОBRA-3 [4], который предназначен для моделирования сильноточных ионных пучков в системах с плазменным эмиттером. В третью группу пакетов прикладных программ можно выделить код ELIS [5, 6], который был разработан для решения задач плазменной эмиссионной электроники.

Целью настоящей работы является адаптация программных модулей пакета ELIS к расчету положительных ионных пучков, инжектированных плазмой газового разряда, и разработка алгоритмов моделирования ионно-оптических систем с плазменным эмиттером.

Алгоритм численного моделирования системы формирования потока положительных ионов. Алгоритм расчета электрического поля основан на методе потенциалов. В случае осесимметричного пучка для описания стационарного электрического поля используется уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi(z, r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi(z, r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi(z, r)}{\partial z^2} = - \frac{\rho_i(z, r)}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

$\rho_i(z, r)$ – объемный заряд, вносимый потоком ионов;

$\varphi(z, r)$ – значение потенциала в точке с координатами (z, r) .

В качестве граничных условий задаются потенциал плазмы φ_{pl} и потенциалы электродов ионно-оптической системы. В исходном приближении электрическое поле определяется распределением потенциала $\varphi(z, r)$ в расчетной области с подвижной плазменной поверхностью в отсутствие пучка. Азимутальная напряженность электрического поля равна нулю, и уравнение $\vec{E} = -grad\varphi = -\nabla\varphi$ в цилиндрических координатах преобразуется к виду

$$E_r = -\frac{\partial \varphi(z, r)}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi(z, r)}{\partial z}. \quad (2)$$

Положение и форма плазменного эмиттера задаются потенциалом плазмы φ_{pl} и граничным условием на эмиссионной поверхности [1]:

$$\varphi|_{pl} = \varphi_{pl}, \quad (3)$$

$$n_{pl}kT_e = \frac{\varepsilon_0 E|_{pl}^2}{2}. \quad (4)$$

где $\varphi|_{pl}$ – потенциал поля на границе плазмы;
 n_{pl} – концентрация плазмы;
 $E|_{pl}$ – напряженность поля на границе плазмы;
 k – постоянная Больцмана;
 T_e – температура плазменных электронов.

Концентрация плазмы может быть задана пользователем как функция от координат $n_{pl}(z, r)$ или в матричном виде в соответствии с экспериментальными данными.

Так как плазменные электроны более подвижны, чем ионы, то плазма приобретает положительный потенциал φ_{pl} относительно стенок эмиттерного (фокусирующего) электрода и разрядной камеры [1]. Радиус плазмы внутри отверстия в фокусирующем электроде $r_{pl}(z)$ и распределение потенциала в пристеночном слое задаются концентрацией плазмы n_{pl} и ее потенциалом φ_{pl} и находятся как решение уравнение Пуассона для цилиндрического вакуумного диода с граничными условиями (3)–(4) с учетом объемного заряда ионов, плотность эмиссионного тока которых определяется формулой Бома $j_i = 0,61en_{pl}\sqrt{kT_e/m_i}$, и объемного заряда электронов, двигающихся в тормозящем поле [7], что учитывается в выражении для плотности электронного тока следующим образом:

$$j_e = en_{pl}\sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \exp\left(\frac{e(\varphi - \varphi_{pl})}{kT_e}\right),$$

где e – элементарный заряд;
 m_i – масса иона;
 m_e – масса электрона.

Плотность боровского тока ионов пучка, инжектированных свободной поверхностью плазмы, находится с учетом возможного движения плазменного эмиттера в ускоряющий промежуток с направленной скоростью [8], например, в результате нагрева плазмы электронным пучком [1]:

$$j_{i0} = en_{pl}\left(0,61\sqrt{kT_e/m_i} - v_{pl-i}\right), \quad (5)$$

где v_{pl-i} – скорость движения границы раздела плазма–ионный пучок.

Движение потока ионов описывается токовыми трубками. Трубка тока определяется как область между двумя соседними поверхностями вращения вокруг оси z граничных траекторий, при этом поперечное сечение трубки и, как следствие, плотность ионного тока вдоль оси системы ускорения пучка не остается постоянной, а изменяется. Уравнение граничной траектории трубки тока ионов находится путем исключения времени из уравнений движения в цилиндрических координатах с учетом интеграла энергии:

$$m_i\ddot{r} = eE_r, \quad m_i\ddot{z} = eE_z, \quad \frac{m_i V_i^2}{2} = \varepsilon - e \cdot (\varphi(z, r) - \varphi_{pl}), \quad (6)$$

где ε – начальная энергия ионов, эмитированных плазмой;
 V_i – скорость ионов в точке с координатами (z, r) .

Преобразуем \ddot{r} :

$$\ddot{r} = \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\dot{z} \frac{dr}{dz} \right) = \dot{z} \frac{dr}{dz} + \dot{z} \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dz} \right) = \dot{z} \frac{dr}{dz} + \dot{z}^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{dr}{dz} \right) = \dot{z} \frac{dr}{dz} + \dot{z}^2 \frac{d^2 r}{dz^2}.$$

Учитывая уравнения Ньютона, получим

$$\dot{z}^2 \frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{e}{m_i} \left(E_r - E_z \cdot \frac{dr}{dz} \right). \quad (7)$$

Так как $V_i^2 = \dot{r}^2 + \dot{z}^2$, тогда $\dot{z}^2 \left(1 + \left(\frac{\dot{r}}{\dot{z}} \right)^2 \right) = \dot{z}^2 \left(1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right) = \frac{2\varepsilon}{m_i} - \frac{2e}{m_i} (\varphi(z, r) - \varphi_{pl})$. Отсюда следует

$$\dot{z}^2 = \frac{\frac{2\varepsilon}{m_i} - \frac{2e}{m_i} (\varphi(z, r) - \varphi_{pl})}{1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в уравнение (7), получаем искомое уравнение траектории в дифференциальной форме:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{\left(E_r(z, r) - E_z(z, r) \cdot \frac{dr}{dz} \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right)}{\frac{2\varepsilon}{e} + 2(\varphi_{pl} - \varphi(z, r))}. \quad (9)$$

Плотность тока $j_i(z, r)$ и объемный заряд $\rho_i(z, r)$ ионов пучка, эмитированных плазмой с начальной энергией ε , определяются по следующим формулам:

$$j_i(z, r) = \frac{I_i}{S_n(z)}, \quad (10)$$

$$\rho_i(z, r) = \frac{I_i}{\sqrt{\frac{2\varepsilon}{m_i} + \frac{2e}{m_i} (\varphi_{pl} - \varphi(z, r))} \cdot S_n(z)}, \quad (11)$$

где $S_n(z)$ – площадь поперечного сечения трубки тока пучка плоскостью $z = \text{const}$;

$I_i = j_{i0} \cdot S_0$ – ионный ток эмиссии;

S_0 – площадь эмиссионной поверхности плазмы для каждой трубки тока.

В исходном приближении объемный заряд ионного пучка считается равным нулю и производится расчет поля электродов и трубок тока в этом поле. В каждом последующем приближении поле рассчитывается уже с учетом объемного заряда, распределенного по трубкам тока. Расчет продолжается до получения достаточно малых отклонений в ходе траекторий в двух последовательных приближениях.

По завершении итерационного процесса производится смещение поверхности плазменного эмиттера в соответствии с условиями (3)–(4) и повторение всех расчетов до тех пор, пока положение и форма эмиссионной поверхности не будут определены с заданной точностью в двух последовательных приближениях. Скорость смещения границы раздела плазма–ионный пучок определяется при этом согласно условию Стефана [8]:

$$v_{pl-i} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{m_i n_{pl}}} \left(\text{grad} \varphi - \sqrt{\frac{2n_{pl} k T_e}{\varepsilon_0}} \right). \quad (12)$$

Пример моделирования ионно-оптической системы с плазменным эмиттером с помощью пакета ELIS приведен на рисунке.

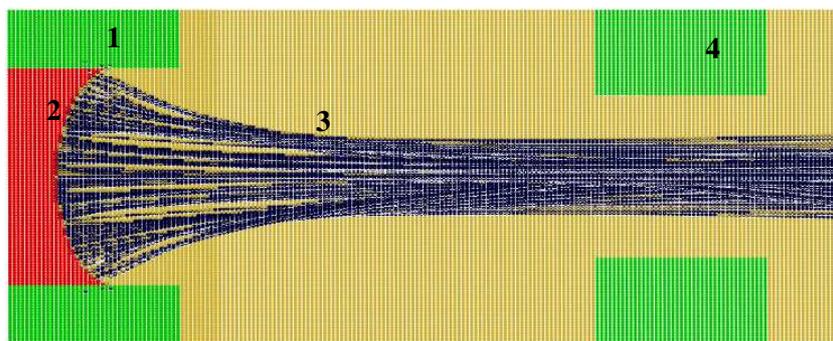


Рисунок. – Пример моделирования ионно-оптической системы формирования пучка положительных ионов с плазменным эмиттером:

1 – фокусирующий электрод с радиусом апертуры 2 мм; 2 – плазма; 3 – ионный пучок;
4 – коллектор ионов (ускоряющий электрод) с радиусом апертуры 1,5 мм;
ускоряющий промежуток 5 мм; ускоряющее напряжение 50 кВ; концентрация плазмы $5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$

Заключение. Разработан алгоритм моделирования ионного потока и расчета характеристик ионного пучка, основанный на дискретизации ионного потока токовыми трубками, который позволяет получить численное решение задачи Стефана на границе плазма–ионный пучок в ионно-оптической системе с плазменным эмиттером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котельников, И. А. Теория плазменного эмиттера положительных ионов / И. А. Котельников, В. Т. Астрелин // Успехи физических наук. – 2015. – № 7, Т. 185. – С. 753–771.
2. FAR-TECH Inc PBGUNS Manual [Electronic resource] / FAR-TECH Inc., 2013. – Режим доступа: <http://far-tech.com/pbguns/manuals.htm>.
3. Астрелин, В. Т. Пакет программ для расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц / В. Т. Астрелин, В. Я. Иванов // Автометрия. – 1980. – № 3. – С. 92–98.
4. Spädtke, P. The Physics and Technology of Ion Sources / ed. I. G. Brown. – New York : Wiley, 2006. – P. 41–60.
5. Петрович, О. Н. Программный комплекс ELIS для моделирования ЭОС ПИЭЛ / О. Н. Петрович, В. А. Груздев // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С. 79–85.
6. Петрович, О. Н. Моделирование электронно-оптических систем с плазменным эмиттером : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / О. Н. Петрович ; Полоц. гос. ун-т, 2012. – 199 л.
7. Распространение плазмы в эмиссионном канале анодного электрода плазменного источника электронов / Д. Г. Данилишин [и др.] // Изв. ВУЗов. Физика. – 2001. – № 5. – С. 29–32.
8. Stekolnikov, A. F. Simulation of formation of an intensive electron beam in bipolar electron-optical system with the plasma anode / A. F. Stekolnikov, V. A. Gruzdev, O. N. Petrovich // Problems of Atomic Science and Technology. Series : Plasma Physics. – 2002. – № 5. – С. 113–114.

Поступила 20.09.2016

ALGORITHM OF SIMULATION OF ION-OPTICAL SYSTEM WITH THE PLASMA EMITTER

O. PETROVICH, I. RUSSETSKI

The algorithm of numerical calculation of the positive ion beams in ion-optical system with plasma emitter based on current tubes for ions flow and taking into account the mobility of boundary of the plasma and ion beam is developed.

Keywords: *positive ion beams, ion-optical system with plasma emitter, numerical simulation of charged particle beams.*