

УДК 621.385, 537.533

## **Компьютерное моделирование влияния ионизации остаточного газа на формирование интенсивных электронных пучков в плазменных источниках заряженных частиц**

*О. Н. Петрович*

Полоцкий государственный университет, г. Полоцк, Беларусь

*Предложена физико-математическая модель промежутка ускорения интенсивного электронного пучка, учитывающая процессы ионизации и подвижность эмитирующей поверхности плазмы. Разработанный алгоритм расчета электронно-оптических систем (ЭОС) с плазменным эмиттером был реализован в программах численного моделирования условий формирования острогофокусированных и трубчатых электронных пучков. Численное моделирование показало, что ионизационные процессы могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на формирование и характеристики пучка.*

Плазменные источники электронов (ПИЭ) способны генерировать электронные пучки в таком диапазоне рабочих давлений, когда пренебрегать ударной ионизацией молекул остаточного газа электронами пучка, и, следовательно, ионным зарядом в промежутке ускорения пучка нельзя [1].

Другая отличительная особенность плазменных источников электронов заключается в том, что геометрия и положение эмитирующей поверхности плазмы не являются жестко заданными, граница эмитирующей плазмы располагается в тех точках промежутка ускорения, где устанавливается нулевая напряженность электрического поля [2].

Ионизационные процессы в промежутке ускорения ЭОС с плазменным эмиттером и подвижность эмитирующей поверхности плазмы приводят к изменению как распределения потенциала в ускоряющем промежутке, так и положения и конфигурации поверхности плазмы, что задает траектории ускоряемых электронов пучка, а, следовательно, оказывает влияние на формирование и характеристики электронного пучка.

Указанные особенности определили актуальность разработки алгоритма расчета ЭОС с плазменным эмиттером при повышенном рабочем давлении. Разработанный алгоритм был положен в основу программ, созданных для численного моделирования динамики условий формирования остросфокусированных и трубчатых электронных пучков.

### Физико-математическая модель

Основу физико-математической модели промежутка ускорения ЭОС с плазменным эмиттером составляет следующая система уравнений.

1. Уравнение Пуассона для распределения потенциала  $\varphi$ , самосогласованного с объемным зарядом электронов пучка  $\rho_e$ , ионов  $\rho_{ii}$  и вторичных электронов  $\rho_{ei}$

$$\frac{\partial^2 \varphi(z, r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi(z, r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi(z, r)}{\partial z^2} = - \frac{\rho(z, r)}{\epsilon_0},$$

где  $\rho$  в каждой точке поля в момент времени  $t$  равно  $\rho(z, r) = \rho_e(z, r) + \rho_{ii}(z, r) + \rho_{ei}(z, r)$ . В качестве граничных условий задавались потенциалы эмитирующей плазмы и электрода с эмиссионным каналом, распределение потенциала в пристеночном ионном слое, потенциал ускоряющего электрода. Геометрия ЭОС приведена на рис. 1.

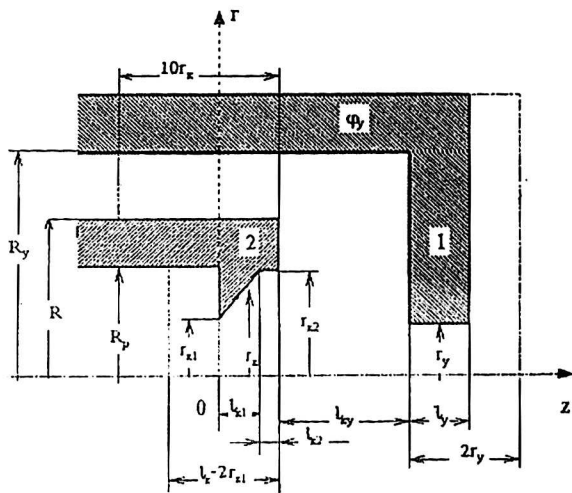


Рис. 1. Геометрия электродной структуры ЭОС:

1 — ускоряющий электрод; 2 — электрод с эмиссионным каналом;  $z$  — ось симметрии;  $r_{k1} = 1$  мм;  $r_{k2} = 2$  мм;  $l_{k1} = 1$  мм;  $l_{k2} = 4$  мм;  $l_{ky} = 5$  мм;  $r_y = 2$  мм;  $l_y = 2$  мм;  $\varphi_y = 30$  кВ

2. Объемный заряд электронов пучка  $\rho_e(z, r) = \frac{j_e}{\vartheta(z, r)}$ , где

$j_e = \frac{1}{4} e n_{\text{пл}} \sqrt{\frac{8kT_e}{m\pi}}$  — величина тепловой плотности тока эмитированных плазмой электронов.

Траектории и скорость электронов пучка определялись из закона сохранения энергии

$$\frac{m_e \vartheta^2}{2} = \frac{m_e \vartheta_0^2}{2} + e(\varphi(z, r) - \varphi_{\text{пл}}),$$

где  $n_{\text{пл}}$  и  $\varphi_{\text{пл}}$  — концентрация и потенциал плазмы, соответственно;  $\vartheta_0$  — начальная скорость электронов, вылетающих из плазмы, равная средней тепловой скорости.

3. Для определения объемного заряда ионов  $\rho_{ii}$  и вторичных электронов  $\rho_{ei}$ , образованных в результате ударной ионизации молекул остаточного газа электронами пучка, использовались уравнения непрерывности

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{ii}}{\partial t} &= \rho_{\text{ген}} - \text{div}(\rho_{ii} \bar{\vartheta}_i); \\ \frac{\partial \rho_{ei}}{\partial t} &= \rho_{\text{ген}} - \text{div}(\rho_{ei} \bar{\vartheta}_e), \end{aligned}$$

где  $\bar{\vartheta}_i$  и  $\bar{\vartheta}_e$  — скорости ухода ионов и вторичных электронов в режиме свободного пролета.

Заряд  $\rho_{\text{ген}}$  частиц, рождающихся в единице объема за единицу времени, определялся по формуле:

$$\rho_{\text{ген}} = p j_e Q_{i0} = p j_e a (\varphi(z, r) - \tilde{\varphi}) \cdot \exp\left(\frac{\tilde{\varphi} - \varphi(z, r)}{b}\right),$$

где для сечения ионизации  $Q_{i0}$  использована функция Моргулиса [3];  $p$  — давление остаточного газа;  $a$ ,  $b$ ,  $\tilde{\varphi}$  — константы для данного газа.

В режиме свободного пролета электроны, возникающие в результате ионизации молекул газа, успевают перераспределиться в промежутке ускорения под действием поля прежде, чем объемный заряд ионов исказит распределение потенциала. Поэтому уравнения непрерывности решались при условии квазистационарного распределения объемного заряда вторичных электронов  $\rho_{ei}$ :

$$\frac{\partial \rho_{ei}(z, r)}{\partial t} = 0.$$

4. Радиус плазменной поверхности в эмиссионном канале радиуса  $R$  определялся из закона степени трех вторых для пристеночного ионного слоя [1]

$$r_{\text{пл}} = \frac{10}{9} \frac{\varepsilon_0}{|e|} \sqrt{\frac{|e|}{kT_e}} \frac{\varphi_{\text{пл}}^{3/2}}{n_{\text{пл}} R \beta^2},$$

где  $\beta^2 = f(R/r_{\text{пл}})$ .

5. Эмитирующая поверхность плазмы располагалась в тех точках, где выполнялось условие равенства нулю напряженности поля  $\overline{\text{grad}} \varphi = 0$ .

### *Алгоритм численного моделирования*

Алгоритм численного моделирования формирования интенсивных электронных пучков основан на модифицированном методе трубок тока, позволяющем рассчитывать квазиламинарные электронные пучки, и включает в себя следующие шаги:

1. Задание геометрии электронно-оптической системы, потенциала электродов, потенциала и концентрации плазмы, электронной температуры плазмы.
2. Моделирование аксиально-симметричного поля, создаваемого системой электродов.
3. Установление плазмы в эмиссионном канале методом итераций, принимая во внимание взаимосвязь радиуса плазмы, ее концентрации и потенциала.
4. Вычисление суперпозиционного поля электродов и плазмы как решение уравнения Лапласа.
5. Нахождение траекторий электронов пучка методом численного интегрирования дифференциального уравнения траектории.
6. Расчет объемного заряда электронов пучка и распределения плотности тока по всем поперечным и продольным сечениям пучка.
7. Нахождение распределения потенциала с учетом объемного заряда электронов пучка как решение уравнения Пуассона.
8. Изменение положения и формы эмитирующей поверхности плазмы.
9. Повторение шагов 5—8 до тех пор, пока распределение потенциала не станет самосогласованным с объемным зарядом электронов пучка.
10. Вычисление распределения ионного объемного заряда и квазистационарного распределения объемного заряда вторичных электронов как решения уравнений непрерывности для вторичных электронов и ионов, которые образовались в результате ударной ионизации молекул остаточного газа электродами пучка.
11. Нахождение распределения потенциала, деформируемого ионизационными процессами с учетом подвижности поверхности плазмы.
12. Определение новых траекторий и характеристик пучка электронов и повторение вычислений 10—12 для следующих моментов времени.

### *Результаты численного моделирования*

Численное моделирование показало, что в электронно-оптических системах с плазменным эмиттером ионизационные процессы могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на формирование пучка.

В электронно-оптических системах с точечным плазменным эмиттером ионизационные процессы улучшают фокусировку электронного пучка, однако, могут приводить к неламинарному характеру движения электронов и к изменению распределения плотности тока по поперечному сечению пучка [4].

В электронно-оптических системах с кольцевым плазменным эмиттером ионизационные процессы могут приводить к замыканию тока пучка на ускоряющий электрод в некоторые моменты времени и, следовательно, к непериодическим колебаниям характеристик пучка, что накладывает ограничения на величину радиуса отверстия в ускоряющем электроде и должно учитываться при расчете электронно-оптических систем с кольцевым эмиттером [5].

## Электронно-оптические системы, формирующие узкий пучок

Объемный заряд ионов, образовавшихся в результате ударной ионизации молекул остаточного газа электронами пучка, во-первых, деформирует распределение потенциала в промежутке ускорения, и, во-вторых, приводит к смещению границы плазмы вглубь канала и изменению формы эмитирующей поверхности. Это может приводить как к уменьшению расходимости пучка за счет частичной или полной компенсации электронного заряда пучка объемным зарядом ионов, так и к увеличению расходимости за счет изменения формы и расположения эмитирующей поверхности плазмы:

Давление, мм рт. ст. .... $p \rightarrow 0$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Расходимость, град. .... 2,8	3,3	4,5	3,4
Диаметр пучка, мм .... 2,5	0,8	0,9	1,0

Моделирование формирования пучка в плазменных источниках электронов позволило определить, что зависимость расходимости пучка и распределения плотности тока по поперечному сечению пучка от давления газа в промежутке ускорения ПИЭ носит немонотонный характер.

При таких значениях давления, когда объемный ионный заряд не превышает 20 % от объемного заряда электронов пучка, преобладающее влияние на расходимость пучка оказывают форма и расположение эмитирующей плазменной поверхности. Чем глубже в эмиссионном канале расположена поверхность плазмы, тем больше ее кривизна и значительней влияние радиальной компоненты напряженности электрического поля. Это приводит к такому изменению траекторий электронов пучка, что его диаметр на выходе из промежутка ускорения значительно уменьшается, а расходимость увеличивается. Уменьшение диаметра пучка приводит к увеличению плотности тока, что влечет за собой возрастание числа ионов, рождающихся в единице объема ускоряющего промежутка за единицу времени. Распределение потенциала еще больше искажается, граница плазмы смещается глубже в канал, где влияние радиальной компоненты напряженности поля увеличивается. Все это может приводить к такому стягиванию электронного пучка, что траектории электронов пересекаются, и пучок становится неламинарным. При значениях давления, когда ионный объемный заряд, увеличивая величину потенциала у плазменной поверхности, сглаживает его провисание, обусловленное отталкиванием электронов пучка и проникновением поля в канал, расходимость пучка уменьшается.

Ионизационные процессы также оказывают влияние на значение диаметра формируемого пучка и на траектории электронов пучка. Указанные причины приводят к тому, что в плазменных источниках электронов при неизменных параметрах электродной структуры и эмитирующей плазмы, но при различных значениях давления, диаметр пучка и распределение плотности тока по сечению пучка (рис. 2) могут существенно различаться, что должно учитываться для генерации пучков с заданными характеристиками. Все расчеты проводились для электронно-оптической системы, схема которой представлена на рис. 1, концентрация эмитирующей плазмы и ее потенциал были равны, соответственно,  $2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  и 300 В.

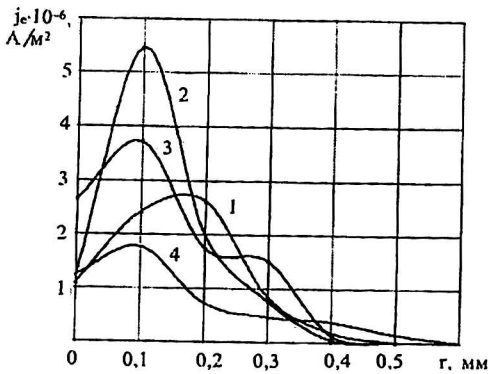


Рис. 2. Распределение плотности тока по сечению пучка для различных значений давлений: 1 —  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.; 2 —  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.; 3 —  $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; 4 —  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.

### Электронно-оптические системы, формирующие полый аксиально-симметричный пучок

Объемный заряд ионов, образующихся в ускоряющем промежутке ЭОС с кольцевым эмиттером, в результате ударной ионизации молекул остаточного газа электронами пучка, деформирует распределение потенциала до тех пор, пока не образуются области максимума и минимума потенциала расположенные на входе в эмиссионный канал со стороны ускоряющего электрода. Такое распределение потенциала искажает распределение объемного заряда вторичных электронов, что понижает потенциал на входе в эмиссионный канал со стороны ускоряющего электрода в точках, расположенных на внутренней поверхности трубчатого потока электронов.

Это приводит к тому, что электроны пучка при движении к ускоряющему электроду огибают эту область пониженного потенциала и удаляются от оси симметрии системы. Внутренний и внешний радиусы трубчатого электронного пучка увеличиваются. Это может привести к замыканию тока пучка в некоторый момент времени на ускоряющий электрод (рис. 3), что накладывает ограничения на величину радиуса отверстия в ускоряющем электроде, и должно учитываться при расчете электронно-оптических систем с кольцевым эмиттером. Ток пучка, выходящего из отверстия в ускоряющем электроде, в такие моменты времени равен нулю (рис. 4).

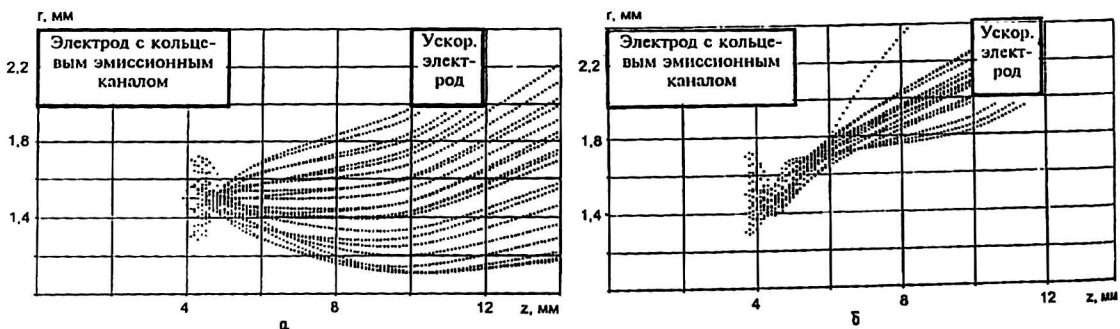


Рис. 3. Траектории электронов в ЭОС с кольцевым эмиттером: а — в вакуумном случае; б — при повышенном рабочем давлении.

Потенциал и концентрация плазмы равны, соответственно, 20 В и  $9 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , ускоряющий потенциал и длина промежутка ускорения равны, соответственно, 30 кВ и 10 мм. Внутренний радиус эмиссионного канала 1 мм, внешний радиус — 2 мм, длина — 5 мм

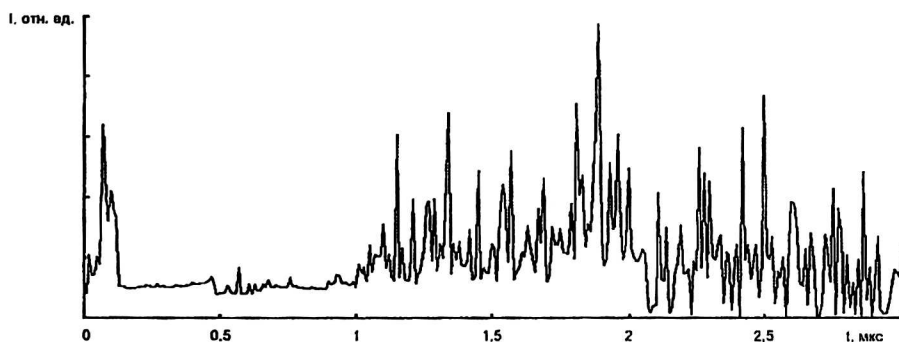


Рис. 4. Ток выходящего из ЭОС электронного пучка.

Ускоряющее напряжение 30 кВ, потенциал и концентрация эмитирующей плазмы 20 В и  $9 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , соответственно, давление  $10^{-2}$  мм рт. ст., радиус апертуры в ускоряющем электроде 2 мм, расстояние между эмиттерным и ускоряющим электродами 5 мм. Внутренний и внешний радиусы кольцевого эмиссионного канала 1 и 2 мм, соответственно

Область минимума потенциала служит потенциальной ямой для ионов, образованных в ускоряющем промежутке при ионизации молекул остаточного газа. Так как максимум распределения объемного заряда ионов расположен в эмиссионном кольцевом канале, то ионы будут заполнять область пониженного потенциала до тех пор, пока распределение потенциала снова не станет монотонным.

Это подтверждается тем, что обратный ионный поток в плазму сначала резко падает до нуля, а затем также резко повышается.

Когда распределение потенциала снова становится монотонным, траектории электронов пучка изменяются таким образом, что пучок проходит через отверстие в ускоряющем электроде. Ток пучка, выходящего из электронно-оптической системы с кольцевым плазменным эмиттером, резко возрастает.

Через некоторое время процессы качественно повторяются. Снова монотонное распределение потенциала сменяется немонотонным, траектории электронов пучка замыкаются на ускоряющий электрод, ток выходящего из отверстия в ускоряющем электроде пучка падает до нуля. Несовпадение промежутков времени, через которые происходит повторение описанных процессов, определяется нелинейными свойствами системы формирования электронного пучка, а значит наличием различной предыстории условий, при которых начинает формироваться немонотонное распределение потенциала.

Изложенные выше процессы приводят к непериодическим колебаниям характеристик, в частности тока, выходящего из электронно-оптической системы электронного пучка, что может оказывать отрицательное влияние на ускоряющий электрод и на процесс обработки материала.

Таким образом, ионизационные процессы совместно с подвижностью эмитирующей поверхности плазмы оказывают существенное влияние, которое носит сложный характер, на формирование и характеристики электронного пучка. Следовательно, при численном моделировании электронно-оптических систем с повышенным рабочим давлением необходимо учитывать ионизацию молекул остаточного газа в промежутке ускорения ЭОС.

**Л и т е р а т у р а**

1. Завьялов М. А., Крейндель Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Крейндель Ю. Е. Плазменные источники электронов. — М.: Энергоатомиздат, 1977.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газах. — М., Л.: ГИТТЛ, 1952.
4. Petrovich O. N., Gruzdev V. A. Nonlinear effects in electron-optical systems with the plasma emitter// Proc. VIII Annual seminar "Nonlinear phenomena in complex systems", Minsk, 1999. P. 157—161.
5. Петрович О. Н. Динамика формирования трубчатого пучка в электронно-оптических системах с кольцевым плазменным эмиттером//Материалы Международной научно-технической конференции "Надежность машин и техн. систем". — Минск, 2001. С. 135—136.

## **Computer simulation of influence of the ionization of residual gas on formation of intensive electronic beams in plasma sources of the charged particles**

*O. N. Petrovich*

Polotsk state university, Polotsk, Belarus

*The physics-mathematical model of acceleration gap of intensive electronic beam which take into account ionization processes and mobility of emitting surface of plasma was suggested. The developed algorithm of calculation of electron-optical systems with the plasma emitter was realized in the programs of numerical simulation of conditions of formation of narrow and tubular electron beams. Numerical simulation has shown, that ionization processes can both positive and negative influences on formation and characteristics of electron beam.*