

## ФИЗИКА

УДК 537.533.3

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМИТТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОНОВ

канд. физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, О.Н. ПЕТРОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)

*Численным моделированием исследуется влияние на положение и форму плазменного эмиттера характеристик плазменных источников электронов. Приводится сравнительная характеристика различных способов формирования плазменной поверхности: полем ускоряющего электрода, полем ионного слоя, суперпозицией полей. Показывается эффективность режима управления током пучка путем изменения протяженности пристеночного ионного слоя как способа получения пучков с малой компрессией. Изменение протяженности ионного слоя позволяет формировать слаборасходящиеся пучки в широком диапазоне ускоряющих напряжений, параметров плазмы и геометрических размеров электронно-оптической системы, а также получать сверхтонкие пучки высокой яркости.*

**Введение.** Электронно-оптические свойства системы формирования пучка определяются множеством разнообразных факторов: типом и формой эмиттера, геометрией электронно-оптической системы (ЭОС), собственным объемным зарядом пучка, ускоряющим напряжением и т.д. По типу эмиттера электронно-оптические системы можно разделить на источники электронов с термокатодом, с плазменным катодом и пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с холодным катодом.

В пушках с накаливаемым и холодным катодами геометрия эмиттера является заданной, поэтому форма электронного пучка не изменяется при любых значениях ускоряющего напряжения в режиме ограничения тока пространственным зарядом. В источниках электронов с плазменным катодом подвижность эмиттера влияет на форму эмиттирующей поверхности, которая задается положением плазменной границы. Геометрия плазменного эмиттера на этапе первичного формирования пучка оказывает определяющее влияние на форму пучка и, как следствие этого, такие его характеристики, как расходимость, диаметр, сила и плотность тока.

В плазменных источниках электроны пучка инжектируются плазмой разряда в ускоряющий промежуток через канал в эмиттерном электроде, который может быть включен как в цепь катода, так и в цепь анода разрядного промежутка. Следовательно, потенциал эмиттирующей плазмы превышает потенциал эмиттерного электрода на величину катодного (сотни вольт) или анодного (десятки вольт) падения потенциала. Это приводит к уходу ионов из плазмы на стенки эмиттерного электрода и образованию приэлектродного слоя объемного ионного заряда.

Таким образом, в плазменных источниках электронов (ПИЭЛ) эмиттирующая поверхность формируется суперпозицией двух полей: ускоряющего электрода и пристеночного ионного слоя. Взаимное влияние указанных факторов на положение и форму плазменной границы приводит к следующим характерным случаям установления эмиттирующей поверхности в ПИЭЛ [1]:

- 1) в промежутке между ускоряющим и эмиттерным электродами (рис. 1, а);
- 2) на выходе из эмиссионного канала (рис. 1, б);
- 3) внутри эмиссионного канала (рис. 1, в);
- 4) в газоразрядной камере (рис. 1, г);

Однако количественные исследования указанных характерных случаев формирования поверхности эмиттирующей плазмы не проводились. Поэтому в данной работе методом численного моделирования рассмотрено влияние характеристик ПИЭЛ (как параметров плазмы, так и параметров ЭОС) на положение и, как следствие, геометрию плазменного эмиттера, что в свою очередь определяет форму и характеристики пучка.

**Метод численного моделирования.** Компьютерное моделирование формирования эмиттирующей поверхности в ПИЭЛ проводилось по алгоритму, разработанному ранее [2], однако область применения физико-математической модели была расширена таким образом, чтобы иметь возможность моделировать процессы формирования пучка в разрядной камере [3].

Основные положения модели заключались в следующем:

- 1) геометрия электронно-оптической системы плазменного источника электронов имела вид, приведенный на рисунке 2. Радиус эмиссионного канала  $r_k = 1$  мм, радиус выходной апертуры  $r_y = 2,5$  мм, длина

выходного канала в ускоряющем электроде  $l_y = 5$  мм. Радиус и длина разрядной камеры  $R_p = l_p = 10$  мм, внутренний радиус ускоряющего электрода  $R_y = 25$  мм. Потенциалы эмиттирующей плазмы  $\phi_{пл}$  и ускоряющего электрода  $\phi_y$  находились относительно эмиттерного электрода 2. Длина канала  $l_k$  и расстояние между эмиттерным и ускоряющим электродами  $l_{кy}$  в численной модели принимали различные значения;

2) распределение потенциала находилось как решение уравнения Лапласа в цилиндрических координатах с осевой симметрией. Граничные условия выбирались в предположении, что поле проникает в канал на расстояние, сравнимое с его диаметром (граничное условие 5 и 6). Граничное условие 4 задавалось линейной зависимостью потенциала от координаты;

3) положение плазменной границы и форма ее поверхности определялись согласно принципу эквипотенциальности плазмы, т.е. устанавливались в тех точках расчетной области, потенциал которых равен потенциалу плазмы в случае, если  $r_{пл}(z) > 0,31r_k$ . Если радиус плазмы  $r_{пл}(z) \leq 0,31r_k$ , то плазма не может существовать в канале в точке  $z$  [4];

4) потенциал эмиттирующей плазмы относительно эмиттерного электрода принимался равным либо катодному падению потенциала (прикатодная плазма), либо анодному падению (прианодная плазма), что типично для рабочих конструкций ПИЭЛ в зависимости от того, катодом или анодом служит эмиттерный электрод в разрядной камере [1];

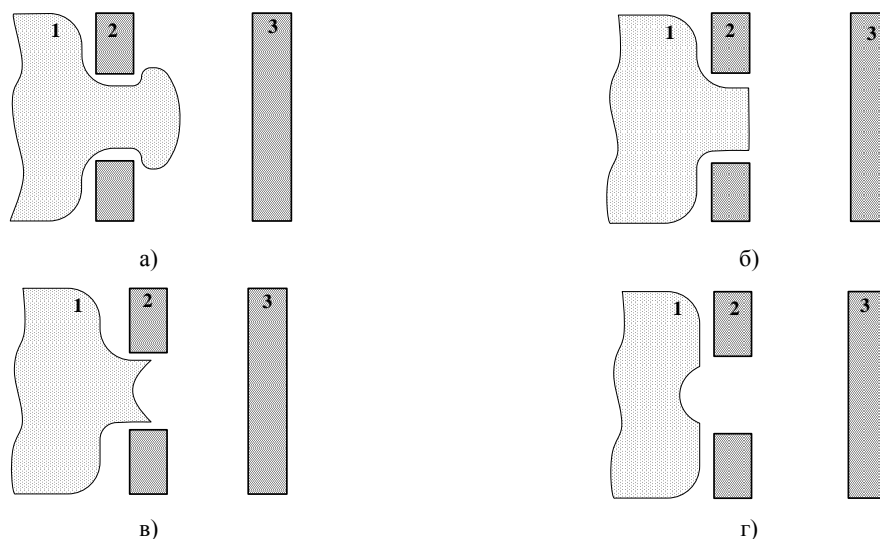


Рис. 1. Возможные положения плазменной поверхности в ПИЭЛ  
(1 – газоразрядная плазма; 2 – эмиттерный электрод; 3 – ускоряющий электрод)

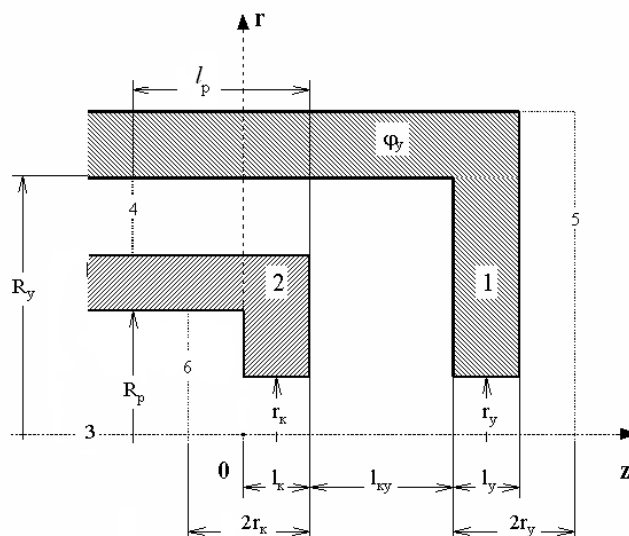


Рис. 2. Геометрия электронно-оптической системы ПИЭЛ  
(1 – ускоряющий электрод; 2 – эмиттерный электрод; 3 – ось симметрии системы;  
4, 5, 6 – граничные условия для потенциала)

5) при проникновении плазмы в эмиссионный канал концентрация ионов плазмы за счет их ухода на стенки канала в расчетной модели уменьшалась согласно закону:

$$n_{nl}(z) = n_{nl}(0) \exp\left(-\frac{z}{r_{nl}}\right);$$

6) квазинейтральность плазмы с потенциалом, равным катодному падению потенциала вследствие ухода ионов на стенки эмиссионного канала, может быть обеспечена только лишь при наличии продольного электрического поля, возвращающего электроны в разрядный промежуток. Следовательно, потенциал прикатодной плазмы при ее проникновении в канал также уменьшается. Если принять распределение электронов по скоростям максвелловским, то для концентрации электронов можно использовать формулу Больцмана, откуда, учитывая условие равенства электронной и ионной концентраций плазмы, следует

$$n_{nl}(0) \exp\left(-\frac{e}{kT_e} \Delta\phi\right) = n_{nl}(z).$$

Отсюда для потенциала прикатодной плазмы получим

$$\phi_{nl}(z) = \phi_{nl}(0) - \frac{kT_e}{e} \frac{z}{r_{nl}}.$$

При проникновении прианодной плазмы в эмиссионный канал ее потенциал не изменялся. В этом случае квазинейтральность плазмы достигается за счет ухода плазменных электронов на стенки эмиссионного канала с тепловой энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера;

7) связь радиуса плазмы  $r_{nl}$ , её концентрации  $n_{nl}$  и потенциала  $\phi_{nl}$  устанавливалась законом «степени трех вторых» для цилиндрического вакуумного диода, ионный ток в котором определяется формулой Бома [4]:

$$r_{nl} = \frac{10 \varepsilon_0}{9 e} \sqrt{\frac{e}{kT_e}} \frac{\phi_{nl}^{3/2}}{n_{nl} r_k \beta^2} \frac{r_k}{r_{nl}}.$$

Табулированную функцию  $\beta^2$  при  $1 \leq \frac{r_k}{r_{nl}} \leq 3$  можно аппроксимировать прямой вида [4]:

$$\beta^2 = 0,257 \left( \frac{r_k}{r_{nl}} - 1 \right).$$

По заданным значениям концентрации и потенциала плазмы рассчитывался радиус эмиттирующей поверхности как разность между радиусом эмиссионного канала и радиусом цилиндрического диода с ионным бомовским током:

$$r_{nl}(z) = r_k(z) - \frac{10 \varepsilon_0}{9 e} \sqrt{\frac{e}{kT_e}} \frac{\phi_{nl}^{3/2}(z)}{0,257 n_{nl}(z) \cdot r_k(z)}.$$

В итоге плазменная поверхность устанавливалась в разрядной камере, эмиссионном канале или ускоряющем промежутке методом итераций, учитывая взаимосвязь радиуса плазмы, ее концентрации и потенциала.

**Результаты численного моделирования.** Расчеты, проведенные по изложенному выше алгоритму, подтвердили известные представления о возможных положениях плазменной границы как в случае эмиттирующей плазмы с потенциалом, равным анодному падению потенциала, так и в случае потенциала плазмы, равного катодному падению потенциала. Численным моделированием были получены зависимости между приведенной напряженностью поля ускоряющего электрода  $\phi_{sv}/l_{sv}$  и положением плазменной границы  $z_{nl}^{sp}$  на оси симметрии ( $r=0$ ) ЭОС при заданных значениях длины  $l_k$  и радиуса  $r_k$  канала (рис. 3). Однако, как показало численное моделирование, форма электронного пучка определяется не только положением границы плазмы, но и режимом формирования эмиттирующей поверхности, что оказывает принципиальное влияние на характеристики плазменных ЭОС.

1. *Режим формирования плазменной поверхности полем ускоряющего электрода.* В том случае, когда параметры плазмы (концентрация и потенциал) и размеры канала таковы, что в отсутствие ускоряющего напряжения плазма проникает в канал ( $r_{nl} > 0,31r_k$ ), а затем и в промежуток между эмиттерным и ускоряющим электродами, эмиттирующая поверхность формируется полем ускоряющего электрода, и эмиссия элек-

тронов осуществляется с поверхности плазмы, полностью открытой для ускоряющего поля. При таком режиме эмиссии граница плазмы может располагаться и в промежутке между эмиттерным и ускоряющим электродами (III), и в эмиссионном канале (II), и в разрядной камере (I) в зависимости от приведенной напряженности поля ускоряющего электрода  $\frac{\varphi_y}{l_{cy}}$  (рис. 3, кривые 2, 4, 7, 8).

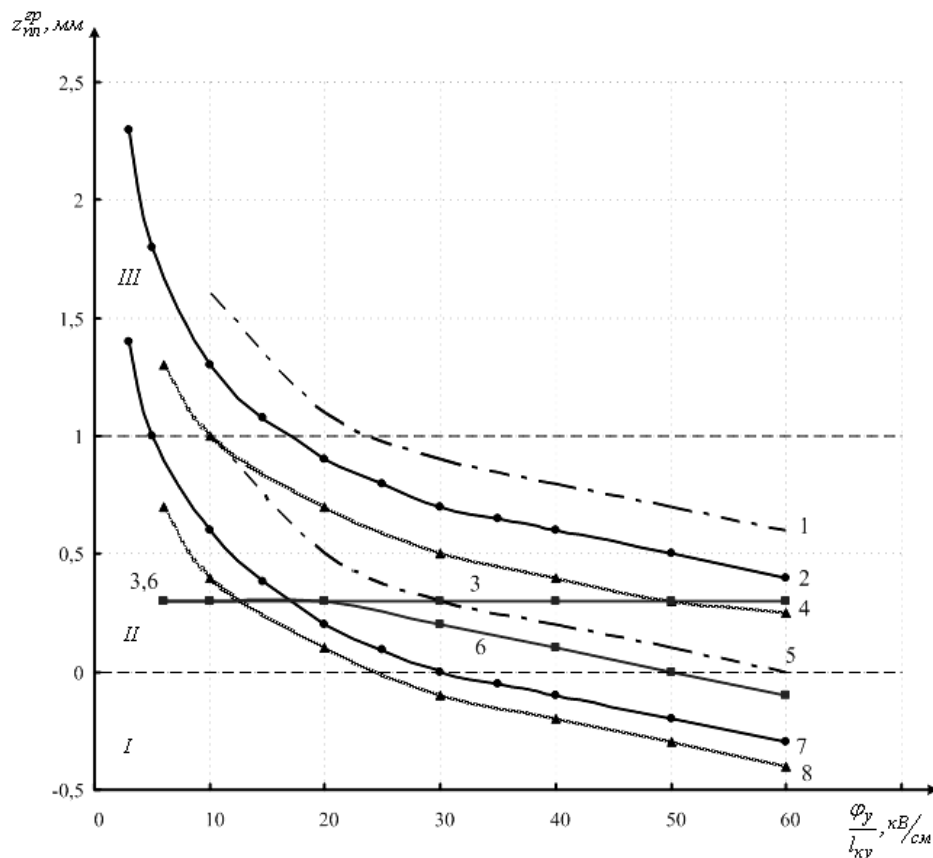


Рис. 3. Положение границы плазмы  $z_{pl}^{sp}$  в зависимости

от приведенной напряженности поля ускоряющего электрода  $\frac{\varphi_y}{l_{cy}}$ .

1, 5 – положение эквипотенциальных поверхностей с потенциалом 300 В;

2, 7 – положение границы плазмы с  $\varphi_{nl} = 20$  В; 4, 8 – положение границы плазмы с  $\varphi_{nl} = 150$  В;

3, 6 – положение границы плазмы с  $\varphi_{nl} = 300$  В. 1, 2, 3, 4 – длина канала  $l_c = 1$  мм; 5, 6, 7, 8 – длина канала  $l_c = 0,5$  мм.

Концентрация плазмы на входе в канал  $n_{pl}(0) = 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Пунктирные линии соответствуют границам эмиссионного канала со стороны разрядной камеры ( $z = 0$ ) и ускоряющего промежутка ( $z = l_c$ ) для канала длиной  $l_c = 1$  мм

Положение эмиттирующей поверхности в промежутке между эмиттерным и ускоряющим электродами, с одной стороны, снижает электрическую прочность промежутка ускорения [5] вследствие частичного заполнения межэлектродного расстояния плазмой, с другой – приводит к формированию пучков с большой расходимостью вследствие выпуклой по отношению к ускоряющему электроду поверхности расширяющейся плазмы. Поэтому данный случай не представляет практического интереса и в дальнейшем не рассматривается.

В случае расположения эмиттера в канале или в разрядной камере, как показали численные расчеты, форма плазменной поверхности повторяет форму эквипотенциальных поверхностей ускоряющего поля, что приводит к компрессии пучка (рис. 4 – 6). Плоская эмиттирующая поверхность соответствует расположению границы плазмы на выходе эмиссионного канала (рис. 7), что ведет к формированию слабоборасходящихся электронных пучков. Указанная ситуация представляется наиболее оптимальной, однако она может быть реализована в очень узком диапазоне характеристик источника – ускоряющего напряжения, геометрии канала, параметров плазмы.

Кроме того, в данном режиме эмиссии (с открытой для поля ускоряющего электрода поверхности плазмы) подвижность плазменной границы высока и зависит не только от стабильности характеристик источника электронов, но и от влияния ионизационных процессов на электронно-оптические свойства

системы формирования пучка. Это приводит к ограничению возможности формирования пучков с заданными характеристиками и к ограничению эффективности управления током пучка.

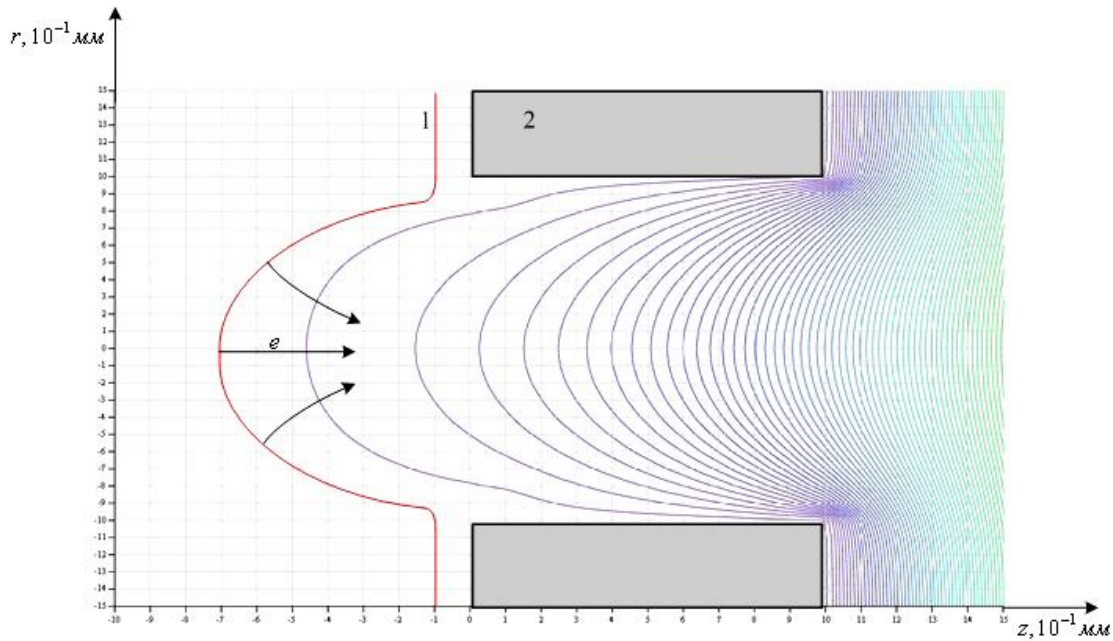


Рис. 4. Эквипотенциальные уровни в случае формирования эмиттирующей поверхности полем ускоряющего электрода в разрядной камере: 1 – плазма; 2 – эмиттерный электрод; e – электроны.

Концентрация и потенциал плазмы на входе в канал:  $n_{pl}(0) = 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ,  $\varphi_{pl}(0) = 20 \text{ В}$ ; радиус и длина канала  $r_k = l_k = 1 \text{ мм}$ ; приведенная напряженность поля ускоряющего электрода  $\varphi_y / l_{ky} = 70 \text{ кВ/см}$

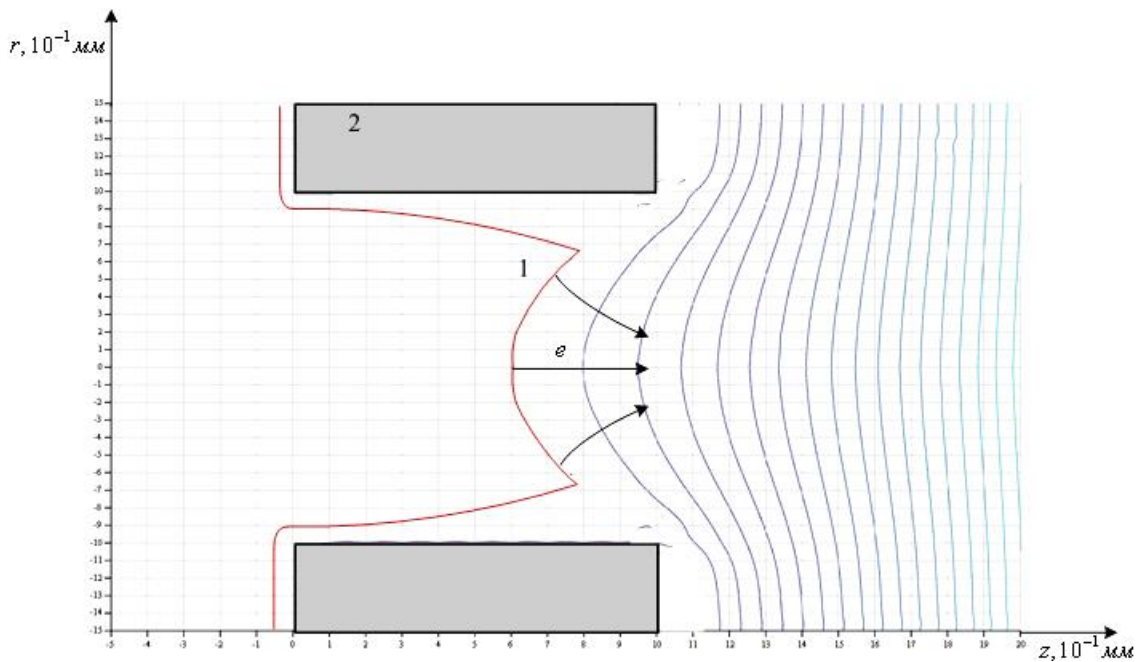


Рис. 5. Эквипотенциальные уровни в случае формирования эмиттирующей поверхности полем ускоряющего электрода в эмиссионном канале: 1 – плазма; 2 – эмиттерный электрод; e – электроны.

Концентрация и потенциал плазмы на входе в канал:  $n_{pl}(0) = 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ,  $\varphi_{pl}(0) = 20 \text{ В}$ ; радиус и длина канала  $r_k = l_k = 1 \text{ мм}$ ; приведенная напряженность поля ускоряющего электрода  $\varphi_y / l_{ky} = 40 \text{ кВ/см}$

2. Режим формирования эмиттирующей поверхности полем пристеночного ионного слоя. В том случае, когда соотношения между размерами канала и параметрами плазмы таковы, что при проникновении плазмы в эмиссионный канал выполняется условие  $r_{pl} \leq 0,31r_k$  и состояние системы плазма – слой

становится неустойчивым, что приводит к перекрытию поверхности плазмы слоем пространственного заряда, эмиссия электронов будет осуществляться через потенциальный барьер (рис. 3, кривые 3, 6). Это означает, что протяженность промежутка ускорения (положение плазменной границы) определяется не столько ускоряющим напряжением, сколько характеристиками проникающей в эмиссионный канал плазмы (ее потенциалом и концентрацией).

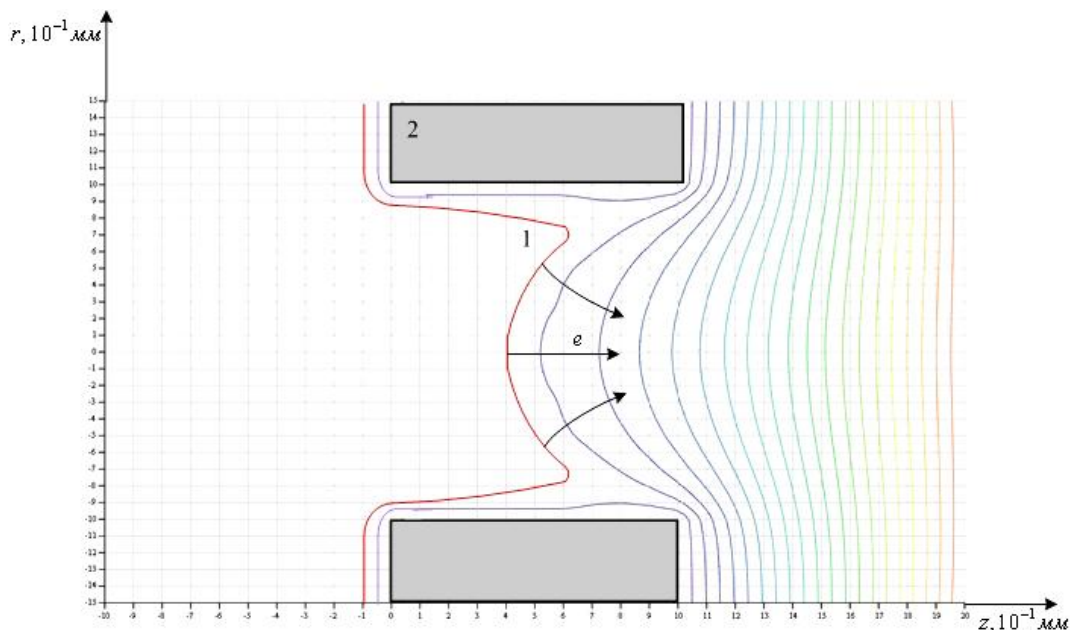


Рис. 6. Эквипотенциальные уровни в случае формирования эмиттирующей поверхности полем ускоряющего электрода в эмиссионном канале: 1 – плазма; 2 – эмиттерный электрод; e – электроны.

Концентрация и потенциал плазмы на входе в канал:  $n_{pl}(0) = 5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ,  $\varphi_{pl}(0) = 300 \text{ В}$ ;

радиус и длина канала  $r_k = l_k = 1 \text{ мм}$ ; приведенная напряженность поля ускоряющего электрода  $\varphi_y / l_{кy} = 70 \text{ кВ/см}$

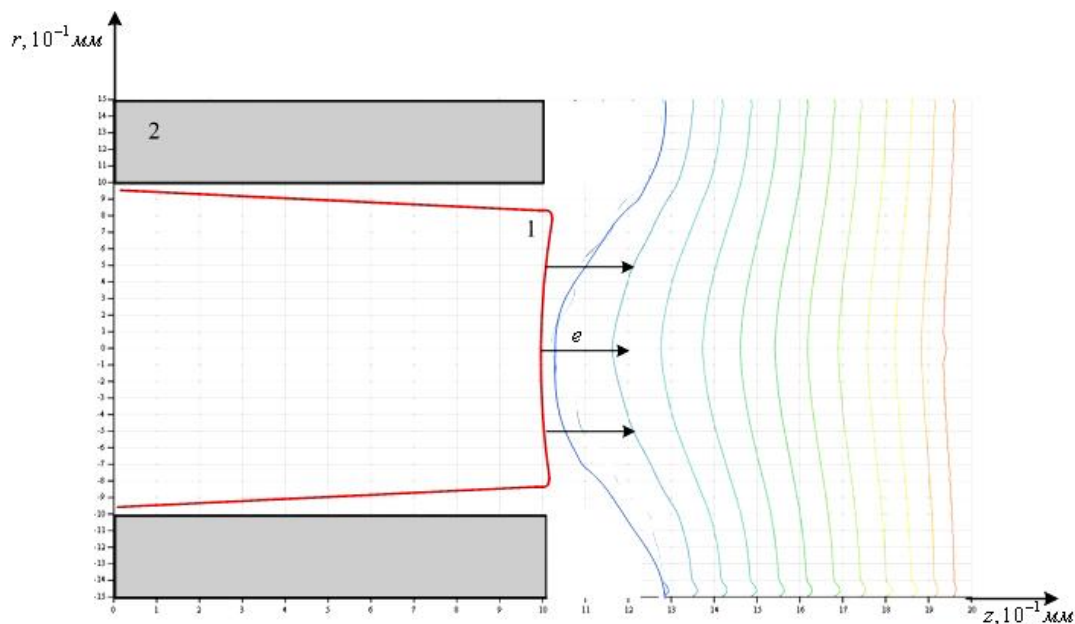


Рис. 7. Эквипотенциальные уровни в случае формирования эмиттирующей поверхности полем ускоряющего электрода на выходе из эмиссионного канала в ускоряющий промежуток:

1 – плазма; 2 – эмиттерный электрод; e – электроны.

Концентрация и потенциал плазмы на входе в канал:  $n_{pl}(0) = 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ,  $\varphi_{pl}(0) = 20 \text{ В}$ ;

радиус и длина канала  $r_k = l_k = 1 \text{ мм}$ ; приведенная напряженность поля ускоряющего электрода  $\varphi_y / l_{кy} = 20 \text{ кВ/см}$



При эмиссии электронов с плазменной поверхности, полностью закрытой полем ионного слоя, граница плазмы располагается внутри эмиссионного канала, однако ее форма отличается от эквипотенциалей ускоряющего поля и является плоской (рис. 8). Это приводит к первичному формированию параксиального электронного пучка.

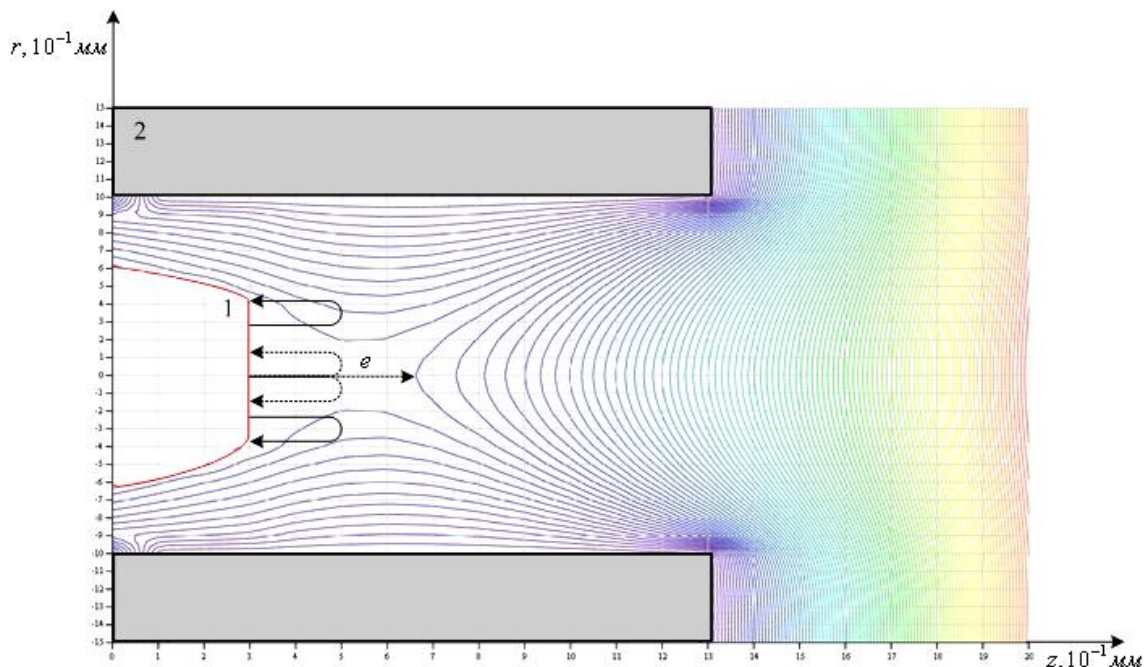


Рис. 8. Эквипотенциальные уровни в случае эмиссии с плазменной поверхности, закрытой пристеночным ионным слоем. Глубина потенциальной ямы на оси пучка порядка 25 В.

1 – плазма; 2 – эмиттерный электрод; e – электроны. Концентрация и потенциал плазмы на входе в канал:

$$n_{pl}(0) = 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}, \quad \varphi_{pl}(0) = 300 \text{ В};$$

радиус и длина канала  $r_k = 1 \text{ мм}, \quad l_k = 1,3 \text{ мм};$   
 приведенная напряженность поля ускоряющего электрода  $\varphi_y / l_{ky} = 70 \text{ кВ/см}$

Как показали численные расчеты, определяющую роль на форму эмиттера в данном случае оказывает уменьшение концентрации плазмы при ее проникновении в канал. Однако такой режим формирования поверхности эмиттера обладает существенным недостатком. Так как эмиссия электронов осуществляется через потенциальный барьер, то такой режим отбора частиц не позволяет получать пучки с плотностью тока, достаточной для осуществления ряда технологических процессов.

3. Режим формирования плазменной поверхности результирующим полем ускоряющего электрода и пристеночного ионного слоя. В том случае, когда проникновение плазмы в канал ограничено условием  $r_{pl} \leq 0,31r_k$ , а поле ускоряющего электрода проникает в эмиссионный канал настолько, что компенсирует потенциальный барьер у границы плазмы в приосевой области, эмиттирующая поверхность формируется суперпозицией полей ускоряющего электрода и ионного слоя. Эмиссия электронов в таком режиме отбора осуществляется с плазменной поверхности, частично закрытой полем пространственного заряда ионов (рис. 9). Эмиттирующая поверхность в этом случае также имеет плоскую форму, что является важным для получения параксиальных пучков. Площадь эмиссии определяется разностью потенциалов между стенками эмиттерного электрода и плазмой. Необходимо отметить, что в отличие от случая, представленного на рисунке 7, данный режим может быть реализован в достаточно широком диапазоне параметров плазмы и ЭОС.

Это позволяет сделать вывод о том, что в плазменных источниках электронов управление током пучка через протяженность ионного слоя является самым эффективным, что соответствует совокупным экспериментальным данным по оптимизации конструкции ПИЭЛ [1]. Кроме того, изменение протяженности ионного слоя позволяет формировать слаборасходящиеся пучки в широком диапазоне ускоряющих напряжений при заданном значении плотности тока (см. рис. 3, кривая 3), а также получать сверхтонкие пучки высокой яркости.

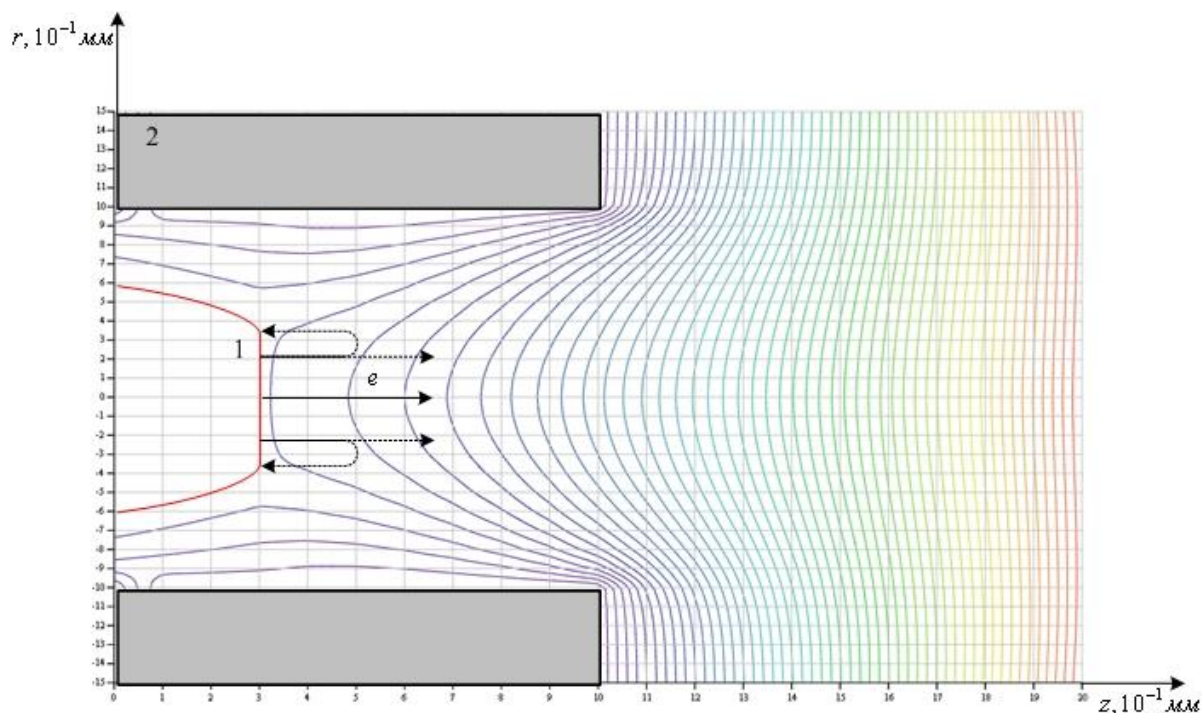


Рис. 9. Эквипотенциальные уровни в случае эмиссии с плазменной поверхности, частично закрытой пристеночным ионным слоем.

1 – плазма; 2 – эмиттерный электрод; e – электроны. Концентрация и потенциал плазмы на входе в канал:

$$n_{pl}(0) = 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}; \quad \varphi_{pl}(0) = 300 \text{ В}; \quad \text{радиус и длина канала } r_k = l_k = 1 \text{ мм};$$

приведенная напряженность поля ускоряющего электрода  $\varphi_y / l_{кy} = 70 \text{ кВ/см}$

**Выводы.** Особенности формирования эмиттирующей поверхности в плазменных источниках электронов указывают на необходимость проведения предварительных численных расчетов, которые учитывают как конструкционные особенности ЭОС источника, так и параметры газоразрядной плазмы, с целью предварительного определения первичных характеристик пучка – формы, и как следствие, его расходимости. Эффективным способом получения пучков с малой компрессией в отличие от общепринятых представлений является режим, при котором формирование плазменной поверхности осуществляется суперпозицией ускоряющего поля и поля ионного слоя внутри эмиссионного канала, а не на его выходе в ускоряющий промежуток. При таком режиме формирования эмиттера подвижность границы плазмы ограничена, что приводит к формированию пучков со стабильными характеристиками. Данный режим отбора может быть реализован в широком диапазоне ускоряющих напряжений, параметров плазмы и геометрических размеров ЭОС. Указанный режим открывает перспективы использования ПИЭЛ для формирования сверхтонких пучков высокой яркости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
2. Груздев, В.А. Метод численного анализа газонаполненных электронно-оптических систем с подвижным плазменным катодом / В.А. Груздев, О.Н. Петрович // Сб. материалов междунар. конф. по вычислительной математике. – Новосибирск, 2004. – Ч. II. – С. 590 – 595.
3. Петрович, О.Н. Нестационарная задача нелинейной электронной оптики в плазменных источниках электронов / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тез. докл. IX Всерос. семинара. – М., 2009. – С. 15 – 16.
4. Галанский В.Л. [и др.] // ЖТФ. – 1990. – Т. 60, вып. 4. – С. 168 – 175.
5. Бурачевский Ю.А., Куземченко М.Н., Окс Е.М. // ЖТФ. – 2002. – № 72. – С. 134.

Поступила 04.09.2009