

УДК 537.212:537.213

## Компьютерное моделирование многоострийных автоэмиссионных катодов

Л. А. Баранова, Г. М. Гусинский

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

*Проведено компьютерное моделирование автоэмиссионных микрокатодов. Для расчетов использована программа СРОЗД, позволяющая определить распределение потенциала, напряженность поля и траектории заряженных частиц. Расчеты показали, что сильнее всего напряженность поля зависит от диаметра острия катода, форма которого принята в виде полусферы; достаточно резко выражена зависимость напряженности поля от расстояния между острием катода и анодной пластиной; диаметр отверстия анода мало влияет на величину напряженности поля вблизи острия.*

Автоэмиссионные источники электронов, изготовленные на основе современных нанотехнологий, находят все более широкое применение в современном приборостроении. Особый интерес представляют многоострийные автоэмиссионные катоды, позволяющие получать высокие токи при сравнительно малой токовой нагрузке на отдельное острие. В настоящее время в связи с применением ядерно-физических технологий открывается возможность создания чрезвычайно миниатюрных диодных и триодных систем на основе многоострийных микрокатодов. Миниатюризация системы позволяет существенно снизить напряжение, требуемое для получения заданного тока автоэмиссии.

Основы теории автоэмиссии были заложены Фаулером и Нордгеймом [1]. Зависимость плотности эмиссионного тока  $j$  от напряженности электрического поля  $E$  и работы выхода материала катода  $\phi$  достаточно хорошо описывается выражением [2]

$$j = A \frac{E^2}{\phi} \exp\left(\frac{B}{\sqrt{\phi}}\right) \exp\left(-C \frac{\phi^{3/2}}{E}\right), \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — константы.

Теория Фаулера-Нордгейма справедлива для температуры  $T = 0$  К, однако и при комнатной температуре формула (1) качественно верно описывает процесс автоэмиссии. Из уравнения (1) следует, что плотность автоэмиссионного тока имеет резкую экспоненциальную зависимость от напряженности электрического поля  $E$ , что и определило цель настоящей работы: проведение компьютерного моделирования автоэмиссионного источника и исследование напряженности электрического поля у острия микрокатаода в зависимости от геометрических параметров системы.

Компьютерное моделирование осуществляли с помощью программы СРОЗД [3], позволяющей

рассчитать распределение потенциала, напряженность поля и траектории заряженных частиц в произвольной электростатической системе. Программа основана на методе граничных элементов, суть которого заключается в расчете распределения плотности зарядов на поверхности электродов в соответствии с потенциалами, приложенными к ним, и в последующем расчете пространственного распределения потенциала, создаваемого совокупностью этих зарядов.

### Геометрия системы

Исследовалась диодная система, состоящая из многоострийного катода и плоского анода с круглыми отверстиями. Поскольку число сегментов, на которые программа СРОЗД позволяет разбить электроды рассчитываемой системы, ограничено, то для повышения точности расчета мы подробно моделировали только одно острие многоострийного катода. Окружающие острия были заменены сплошным проводящим цилиндром с диаметром 10 мкм и с длиной образующей, равной длине отдельного острия. Само острие представляет собой усеченный конус, со стороны вершины ограниченный полусферой. Диаметр основания конуса равен 0,6 мкм, диаметр узкого конца в месте сопряжения с полусферой варьируется в пределах 0,02—0,12 мкм. Соответственно, в тех же пределах варьируется и диаметр полусферы.

Анод представляет собой плоский круглый электрод с отверстием в центре. Внешний диаметр анода равен 10 мкм, диаметр отверстия анода изменяется в пределах от 1 до 3 мкм. В тех же пределах изменяется и расстояние от катода до анода. Для того чтобы замкнуть моделируемую систему, между катодом и анодом помещен цилиндр диаметром 10 мкм, к которому приложен потенциал, меняющийся непрерывно от потенциала катода до потенциала анода, в данном случае от 0 до 100 В. За анодом помещен проводящий цилиндр диамет-

ром 10 мкм, находящийся под потенциалом анода и замыкающийся диском, расположенным на расстоянии  $z = 11$  мкм от начала системы, т. е. от основания катода. Катод представляет собой усеченный конус, со стороны вершины ограниченный полусферой. Анод моделируется тонким электродом, расположенным перпендикулярно плоскости рисунка на расстоянии  $z = 7$  мкм.

На рис. 1 дано схематическое изображение исследуемой системы в том виде, как его представляет на экране компьютера программа CPO3D. Сетка показывает сегменты, на которые разделены электроды рассчитываемой системы. Число сегментов, на которые разделена поверхность катода, гораздо больше числа сегментов, на которые разбит окружающий цилиндр. Поверхность полусферического наконечника разбита на самые мелкие сегменты, что позволяет достичь максимально возможной точности расчета электростатического поля в той области, где происходит эмиссия электронов. На рис. 1 приведены также эквипотенциальные линии, рассчитанные программой. При разности потенциалов между катодом и анодом в 100 В значения потенциалов на эквипотенциальных линиях составляют при движении от катода к аноду последовательно: 0; 6,89; 13,8; 20,7; 27,6; 34,6; 41,5; 48,4; 55,3; 62,2; 69,2; 76,1; 83,0; 89,9; 96,8 В.

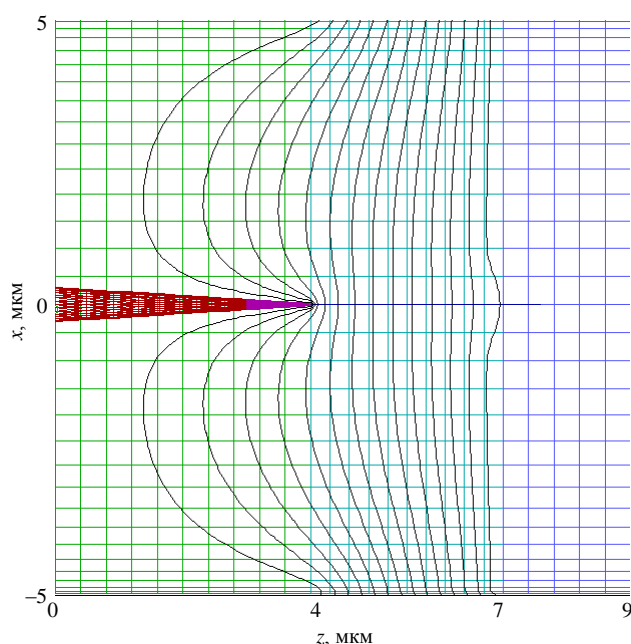


Рис. 1. Сечение  $xz$  автоэмиссионного источника, смоделированное программой CPO3D

### Результаты исследования

Как было сказано выше, в работе исследовалась зависимость напряженности электрического поля

у острия катода от геометрических параметров автоэмиссионного источника. На рис. 2 в качестве примера приведены контуры постоянной напряженности электрического поля в окрестности вершины автоэмиссионного катода при диаметре острия 0,02 мкм. Расстояние между катодом и анодом равно 1 мкм, диаметр отверстия анода составляет 1,5 мкм. Максимальная величина напряженности электрического поля в данном случае равна  $E = 4,08 \cdot 10^7$  (В/см). Напряженность поля резко падает по мере удаления от катода: на расстоянии 0,05 мкм от вершины она уменьшается более чем в 100 раз и составляет  $E = 0,015 \cdot 10^7$  (В/см).

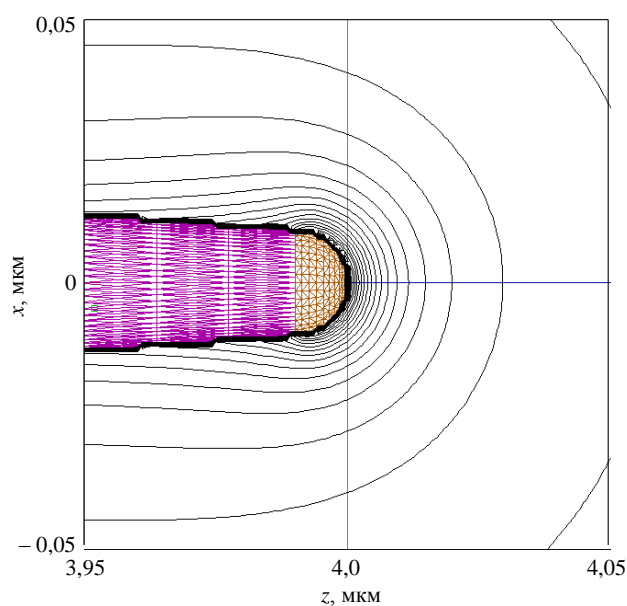
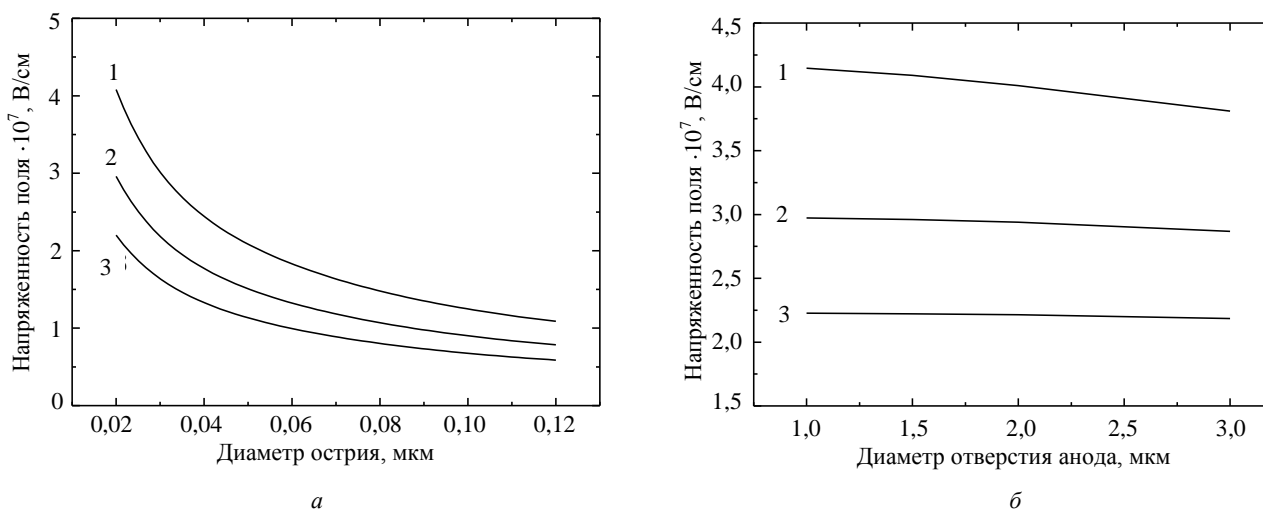


Рис. 2. Контуры постоянной напряженности электрического поля вблизи острия автоэмиссионного микрокатода

Расчеты показали, что наиболее сильно на величину напряженности электрического поля вблизи катода влияет величина диаметра острия, а расстояние между катодом и анодом оказывает меньшее влияние. От размера отверстия анода напряженность поля вблизи острия сколько-нибудь зависит только при малых расстояниях катод–анод (порядка 1 мкм и меньше). При возрастании этого расстояния размер отверстия анода перестает влиять на величину напряженности непосредственно у поверхности катода.

Рис. 3, а, б суммирует полученные результаты. На рис. 3, а показана максимальная напряженность электрического поля как функция диаметра острия при трех различных значениях расстояния между катодом и анодом. При промежуточных значениях расстояния максимальную напряженность поля можно легко определить методом интерполяции.

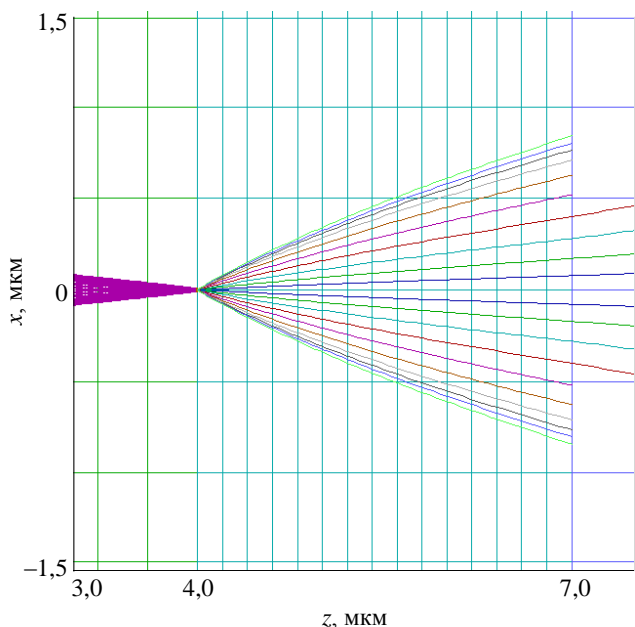


**Рис. 3. Зависимость напряженности поля у острия катода от диаметра:**

*a* — острия при значениях расстояния от острия до анодной пластины:  $h = 1, 2$  и  $3$  мкм, диаметр отверстия анода  $1,5$  мкм, разность потенциалов между анодом и катодом  $100$  В; *б* — отверстия анода при значениях расстояния от острия до анодной пластины:  $h = 1, 2$  и  $3$  мкм, диаметр острия катода  $0,02$  мкм

Рис. 3, б иллюстрирует максимальную напряженность поля в зависимости от диаметра отверстия анода для тех же трех значений расстояния между катодом и анодом. Как видно из рис. 3, б, при расстоянии между катодом и анодом  $3$  мкм напряженность поля практически не меняется при изменении величины отверстия анода в три раза. При малых расстояниях катод–анод влияние отверстия анода на напряженность поля у острия следует учитывать.

начальная энергия электронов принята равной  $1$  эВ, начальный наклон траекторий меняется непрерывно — от параллельного оси до перпендикулярного ей. Расстояние между катодом и анодом равно  $3$  мкм, диаметр отверстия анода —  $1$  мкм. Как видно из рисунка, часть электронного пучка не проходит сквозь отверстие анода. Это обусловлено геометрией системы — большим расстоянием между катодом и анодом и малой величиной отверстия последнего. В большинстве рассчитанных случаев пучок целиком проходит сквозь систему.



**Рис. 4. Траектории электронов, вылетающих из одной точки на вершине автоэмиссионного катода. Начальный наклон траекторий меняется непрерывно от  $0$  до  $\pi/2$**

На рис. 4 показаны траектории электронов в исследуемом автоэмиссионном источнике. На-

### Заключение

В работе исследован автоэмиссионный источник электронов и определено влияние различных геометрических параметров источника на величину электрического поля вблизи катода и, следовательно, на величину плотности тока автоэмиссии.

Показано, что наиболее резко напряженность поля зависит от диаметра острия автоэмиссионного катода. Величина расстояния между катодом и анодом также существенно влияет на величину напряженности. Диаметр отверстия анода оказывает влияние только при малых (порядка  $1$  мкм) расстояниях между катодом и анодом.

Работа позволяет сделать вывод, что миниатюризация многоострийного катода, возможность которой открывает применение ядерно-физических технологий, чрезвычайно перспективна для получения высоких параметров источника.

### Литература

1. Fowler R. H., Nordheim L. // Proc. Roy. Soc. 1928. V. 119. № A781. P. 173.

2. Ненакаливаемые катоды/ Под ред. М. И. Елинсона. — М.: Сов. радио, 1974.  
 3. СРО-программы, см. [www.electronoptics.com](http://www.electronoptics.com).

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

## Computer simulation of field emission multipip cathodes

L. A. Baranova, G. M. Gusinsky  
 Ioffe Physico-Technical Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia

*We have carried out detailed computer simulation of the field emission sources using the CPO3D program. The program computes the potential distribution, the field distribution and electron trajectories in arbitrary electrostatic systems. The calculations have revealed very strong dependence of the electrostatic field on the cathode tip diameter. The field dependence on the distance between the cathode tip and an anode plate is also essential. The size of the anode aperture affects rather little the electrostatic field strength.*

УДК 537.533.3:621.385.833.2

## Предпосылки создания FIB на ионах He<sup>+</sup> с разрешением 1,6 нм для исследования металлических наноструктур

В. А. Жуков  
 Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,  
 Санкт-Петербург, Россия

*Предложен и рассчитан сканирующий зондовый микроскоп (Focused Ion Beam или FIB) на медленных ионах He<sup>+</sup>, регистрирующий вместо кинетической вторичной электронной эмиссии потенциальную вторичную эмиссию и использующий коррекцию осевых aberrаций с помощью комбинированного электромагнитного зеркала. Показано, что при условии коррекции одной только хроматической aberrации, FIB позволит получать разрешение 1,6 нм при исследовании металлических нанобъектов, что приблизительно в 4—6 раз лучше, чем разрешение существующих ионных микроскопов.*

Сканирующая электронная (SEM) и сканирующая ионная (FIB) микроскопия [1, 2] в настоящее время используются в нанотехнологии для исследования и контроля поверхностей объектов, непрозрачных в электронах средних энергий (20 — 200 кэВ).

Системы SEM и FIB позволяют исследовать не только плоские поверхности, но и 3D-структуры. Их разрешение не превышает 5—10 нм, что связано прежде всего со значительным поперечным рассеянием в образцах как первичных зондирующих частиц, так и вторичных электронов перед их выходом в вакуум. В FIB добавляется еще размывание первичного пучка ионов вследствие более значительного влияния хроматической aberrации [3]. Вместе с тем существует реальная возможность создания аналитического FIB для исследования поверхности металлических объектов с разрешением, всего в два раза уступающим разрешению атомно-силовых микроскопов (AFM) [4].

Чтобы доказать эту возможность в работе предлагается и рассчитывается принципиально новый низковольтный FIB (с энергией ионов 300 эВ), регистрирующий потенциальную вторичную электронную эмиссию при столкновении ионов He<sup>+</sup> с поверхностью металлов и использующий корректор осевых aberrаций электростатических линз. Такой прибор позволит получать дополнительно новую информацию о поверхностных слоях нанобъектов, в частности, о локальной структуре их энергетических уровней.

### Постановка задачи и результат

За величину разрешения аналитической FIB-системы примем так называемую “полуширину” или FWHM (full width on half maximum [5]) пятна на мишени, излучающего вторичные электроны. Распределение тока вторичных электронов в этом пятне на мишени имеет форму гауссова распределения