

Электронные и ионные пучки

УДК 621.385.6

Формирование ламинарных электронных потоков в триодных электронных пушках с многоострийными автоэмиссионными миникатодами в ячейках управляющей сетки

Н. А. Бушуев, Ю. А. Григорьев, А. А. Бурцев, И. А. Навроцкий

Проведено 3D-моделирование триодных электронных пушек (ЭП) и электронно-оптических систем (ЭОС) с многоострийными автоэмиссионными катодами (АЭК) в ячейках управляющей сетки. Определена зависимость между параметрами ЭП и потенциалами управляющей сетки, при которых электрическое поле в отверстиях сетки однородно, что означает равенство напряженностей поля на вершинах микроострий. Таким образом минимизируются линзовый эффект сетки и величина магнитного поля. Представлены расчеты ЭП с магнитным формированием пучков высокой плотности на основе планарных кремний-углеродных АЭК (Si-SiO₂-C-Mo).

PACS: 41.85.-p

Ключевые слова: автоэмиссионный катод, многолучевая электронная пушка, управляющая сетка, стеклоглерод, электронно-оптическая система.

Введение

Экспериментальным исследованиям и численному моделированию диодных и триодных электронных пушек (ЭП) с управляемой эмиссией посвящено достаточно много работ [1—6]. В работах [4—5] рассмотрены диодные ЭП с крупночестными сетками на основе двумерной модели без учета конфигурации микроострийного рельефа поверхности, т. е. системы автоэмиссионных катодов (АЭК). Недостатком таких диодных ЭП является неламинарность формируемого электронного потока с большим угловым разбросом скоростей электронов и значительным перепадом токов автоэлектронной эмиссии, отбираемых с микроострий, управляющей сеткой [4].

Однако в указанных работах не рассматривалась общая задача о существовании физически обоснованных решений по геометрической конфигурации и соответствующим потенциалам на электродах триодных ЭП, формирующих в зазорах катод-сетка-анод прямолинейные пучки электронов, в которых отсутствует угловой разброс электронов, обычно являющийся следствием линзового эффекта отверстий крупночестных управляющих сеток. Очевидно, что в ЭП с однородным полем в отверстиях сетки единственным эффектом, возмущающим формируемый электронный поток, остается неустраняемый линзовый эффект анодного отверстия. Этот эффект для ЭП, погруженных в однородное магнитное поле, проявляется в виде пульсаций огибающей дрейфующего протяженного электронного потока в СВЧ ЭВП О-типа.

Цель работы — на основе численного 3D-моделирования определить зависимости между безразмерными геометрическими параметрами плоскосимметричных триодных ЭП с АЭК и соответствующими оптимальными относительными потенциалами прикатодной управляющей сетки, являющиеся необходимым условием существования в отверстиях сетки однородного электростатического поля, формирующего в таких ЭП ламинарные электронные пучки. При этом диаметр отверстий в ячейках сетки значительно превышает период АЭК.

Бушуев Николай Александрович, ген. директор.

Бурцев Антон Александрович, нач. лаборатории.

Навроцкий Игорь Александрович, инженер.

ОАО "НПП "Алмаз".

Россия, 410033, г. Саратов, ул. Панфилова, 1.

Тел.: (8452) 63-25-57. E-mail: almaz@overta.ru;

antbourssew@gmail.com

Григорьев Юрий Алексеевич, вед. научн. сотрудник.

Саратовский филиал Института радиотехники

и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, 38.

Тел.: (8452) 47-97-63.

Статья поступила в редакцию 5 августа 2014 г.

© Бушуев Н. А., Бурцев А. А., Навроцкий И. А.,

Григорьев Ю. А., 2014

Математическая модель и результаты расчета электронной пушки с групповым расположением острий в ячейках сетки

Трехмерный анализ распределения электростатических полей, формируемых в ЭП с АЭК, был проведен с помощью программного обеспечения Lorentz-3EM. Данная САЕ-программа реализует метод граничных элементов для моделирования распределения полей, а также поддерживает итерационный метод при самосогласованном решении задач траекторного анализа с учетом поля пространственного заряда электронного пучка.

Объектом моделирования является электронная пушка с многоострийным АЭК. Острия высотой 10 мкм имели форму конуса с вершинами в виде полусферы с радиусом $r = 0,1$ мкм, с углом конуса 30° . Они расположены с периодом 50 мкм на катодном выступе диаметром 0,3 мм. Для представленной системы электродов ЭП была проведена серия расчетов, направленных на установление величины нормальной составляющей напряженности электрического поля вблизи вершин микроострий, расположенных периодически на одном выступе в отверстии управляющей сетки (рис. 1).

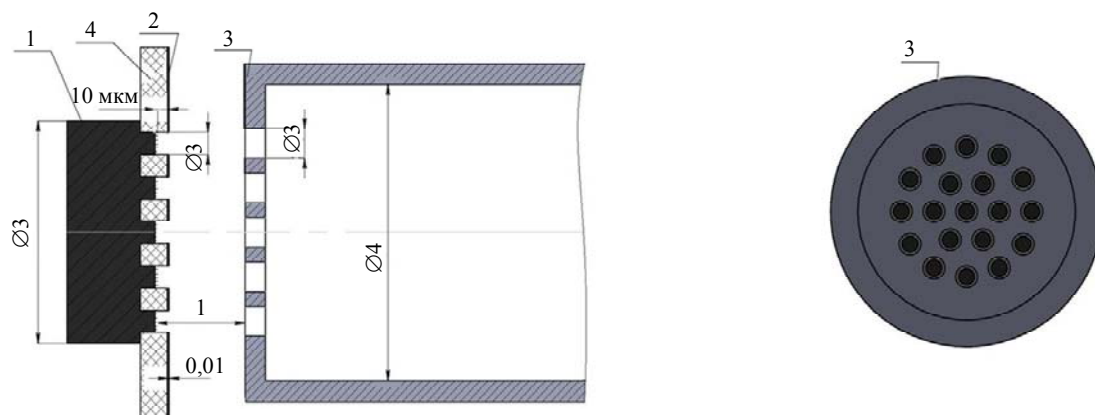


Рис. 1. Размерная схема 19-лучевой ЭП:

1 — АЭК, 2 — крупноячеистая микроразмерная сетка, 3 — анодная сетка и пролетный канал, 4 — изолятор

Для многоострийных АЭК характерно высокое аспектное отношение, что осложняет расчет распределения полей на их вершинах. Предусмотренная в программе функция самоадаптивной сходимости решения с помощью двумерных граничных элементов с изменением плотности элементов в зависимости от кривизны поверхности, позволяет существенно ускорить процесс вычислений при относительно малых ошибках. Количество граничных элементов для расчета распределения электрического поля на вершинах острий по трехмерной модели составило около 100 000 элементов и определено по совпадению с точностью, не превышающей 5 %, коэффициентов усиления поля k для отдельного острия, рассчитанного по аналити-

ческой формуле ($k \approx h / r_{apex}$) и численным методом. В ходе исследований применялся ПК с 4-ядерным процессором, с 64-разрядной операционной системой.

Результаты расчетов электростатических полей в триодной ячейке с АЭК

Для компьютерной модели выбран катод, представляющий собой диск с 19-ю цилиндрическими выступами из стеклоглиноуглерода [6] диаметром 0,3 мм, где вершины микроострий расположены в углах правильных треугольников с периодом 50 мкм. Рассматривается двухрядная 19-острийная миникатодная матрица диаметром 0,2 мм, расположенная на торцах выступов. Вычислены значения напряженности поля на остриях при различных удалениях управляющей сетки относительно катода. Отмечено уменьшение неравномерности величины напряженности поля на вершинах микроострий катодного выступа при увеличении расстояния между сеткой и катодом.

Результаты расчета распределения электрического поля вблизи вершин микроострий на цилиндрических выступах катодного основания в многолучевой ЭП с крупноячеистой сеткой представлены на рис. 2. Диаметры отверстий в анодной и управляющей сетках $D_a = D_g = 0,3$ мм. Для геометрии рис.1-2, при зазоре $d_{g-a}/d_{c-g} = 100$ и $d_{c-g} = 0,01$ мм однородное поле устанавливалось при оптимальном относительном потенциале на сетке $U_g/U_a = 0,015$. При этом $d_{g-a}/D_a = 3,3$. При увеличении потенциала сетки до $U_g/U_a = 0,07$ (рис. 2) в зазоре катод-сетка образуется расфокусирующая электростатическая линза, и за сеткой формируется расходящийся электронный поток.

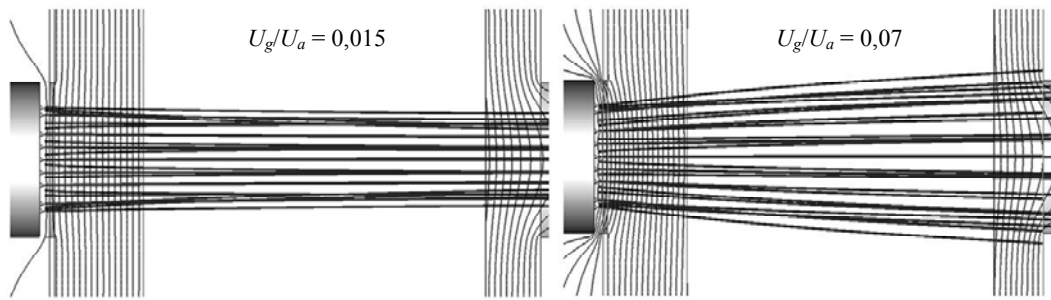


Рис. 2. Фрагменты триодной ЭП (рис. 1). Распределение электрического поля и электронные траектории в зазорах катод-сетка-анод. $(U_g/U_a)_{\text{опт.}} = 0,015$, $(U_g/U_a) = 0,07$

Проведены компьютерные эксперименты для зазоров в относительных величинах $d_{g-a}/D_a = 1,0—3,5$ и при различных относительных потенциалах сетки U_g/U_a . В ходе проведенных расчетов определена область геометрических параметров автоэмиссионных триодных ЭП с управляющими сетками и соответствующих потенциалов сетки, при которых в отверстиях сетки устанавливается локальное однородное электрическое поле. Для конфигураций ЭП рис. 1 условия однородности электрического поля выполняются для значений d_{g-a}/D_a и U_g/U_a , удовлетворяющих неравенствам $d_{g-a}/D_a \geq 1,0$, $U_g/U_a < 0,05$. При значениях $d_{g-a}/D_a < 1,0$ не удается найти величины U_g/U_a , при которых в отверстиях крупноячейковой сетки электрическое поле однородно. При $d_{g-a}/D_a \geq 3,5$ влияние анодного отверстия на распределение поля в ячейках сетки становится пренебрежимо малым, и имеет место режим естественного потенциала и однородного поля в отверстиях сетки для плоского триода, означающей равенство средних напряженностей электрического поля E_{c-g} и E_{g-a} в зазорах катод-сетка и сетка-анод, соответственно.

d_{g-a}/D_a ($D_a/d_{c-g} = 30$), при которых реализуются однородные поля в области отверстий сетки и имеет место равномерная эмиссия с каждого острия массива АЭК для планарной ЭП при отсутствии цилиндрических выступов ($h = 0$). Дополнительным индикатором однородности электрического поля в отверстиях сетки в ходе численного моделирования являлось равенство напряженностей поля на вершинах двухрядного микроострийного АЭК с числом острий $m = 12+6+1 = 19$.

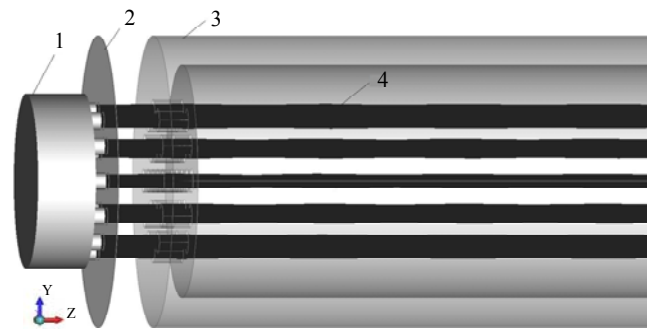


Рис. 4. Расчет 19-лучевой ЭП с МАЭК (табл. 1) в однородном магнитном поле:

1 — АЭК, 2 — управляющая сетка, 3 — анод с пролетным каналом, 4 — электронные пучки

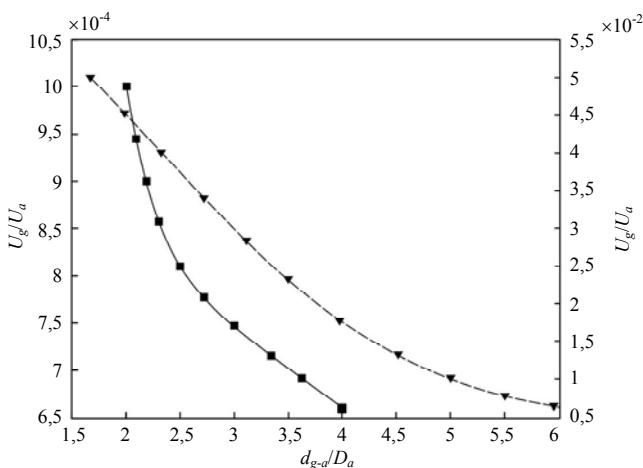


Рис. 3. Зависимость оптимального потенциала на сетке U_g/U_a от отношения d_{g-a}/D_a :

■ — $D_a/d_{c-g} = 300$ (левая ось),
▲ — $D_a/d_{c-g} = 30$ (правая ось)

На рис. 3 представлены зависимости относительного потенциала на сетке U_g/U_a от отношения

По результатам численного анализа оказалось, что более предпочтительными следует считать конструкции триодных ЭП с АЭК не на торцах цилиндрических катодных выступов, а в цилиндрических углублениях подложки АЭК, в которых необходимо иметь (растить) острые катоды, например, УНТ. В этом случае острые автоэммиттеры, расположенные вблизи края цилиндрического углубления, частично экранируются от влияния локального неоднородного поля сеточных перемычек. Таким способом достигается более равномерная автоэмиссия по всему массиву мини-АЭК. При этом минимизируются: линзовый эффект, токоперехват и поперечные скорости электронов.

На рис. 3 представлены условия существования однородного электрического поля в отверстиях сетки для конструкции ЭП без катодных выступов, т. е. для планарных катодно-сеточных эмиттерных

структур. В табл. 1 представлены параметры погруженной в однородное магнитное поле 19-лучевой ЭП с многоострийным АЭК из стеклоуглерода СУ-2000, формирующей ламинарный поток электронов в канале $D_a = 4$ мм. Модулирующий потенциал сетки составил не более 300 В при общем токе пучка 50 мА. Величина напряженности в зазоре сетка-катод $d_{g-c} = 35\text{--}40$ В/мкм, что соответствует экспериментальным данным [2]. На рис. 4 представлены результаты траекторного анализа многолучевого электронного потока в однородном магнитном поле напряженностью 1,28 Тл с пульсациями парциальных пучков, не превышающих 10 %.

Проектирование ЭП для ЛБВ терагерцового диапазона с плотностью тока на катоде более 100 А/см^2 станет возможным с помощью АЭК с низковольтным сеточным управлением, с оптимальной плотностью упаковки острий $N = (1\text{--}4) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ [7]. Входящий в конструкцию проектируемой ЭП планарный АЭК состоит из микрокатодов, содержащих вертикальные пучки углеродных нанотрубок (УНТ), полученных на кремнии

локально по технологии CVD в отверстиях структуры Si/SiO₂/Mo. Микрокатодные матрицы представляют собой правильные шестиугольники, вписанные в окружность радиусом r_c . Общее количество ячеек сетки с УНТ определяется формулой: $k = 3r_c/l(r_c/l+1)+1$, где l — период АЭК. В рассматриваемом варианте КСУ содержится 217 ячеек с диаметром отверстий в сетке 30 мкм (рис. 5). Общее количество нанотрубных АЭК составляет $3,91 \cdot 10^5$ шт. Важным техническим параметром импульсных ЭВП СВЧ О-типа является коэффициент модуляции катодного тока K_m , определяемый отношением $(U_{gnom} - U_{start})/U_a$, где U_{gnom} и U_{start} , соответственно, рабочий и стартовый (запирающий) потенциалы управляющей сетки. Для экспериментального диода с АЭК на основе УНТ [8], взятого в качестве аналога с зазором $d_{c-g} = 9$ мкм, $U_{start} = 30$ В, $U_{nom} = 50$ В, коэффициент модуляции для варианта ЭП (рис. 5) с таким зазором может составить 0,1 % от U_a . Однако для получения ЭП с эмиссионным током большей плотности необходимо увеличить упаковку квадратных кластеров на катоде до значений $N = 1,6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$.

Таблица 1

d_{c-g} , мм	d_{c-a} , мм	D_g , мм, диаметр отверстий в сетке	D_{μ} , мм, диаметр парциал. АЭК	I , мА	U_a , кВ	j , А/см ²	D_a , мм, диаметр отверстий в аноде	U_g/U_a	K_m , %	B , Тл
10^{-2}	1	0,3	0,2	50	10	8,3	0,3	0,015	0,3	1,28

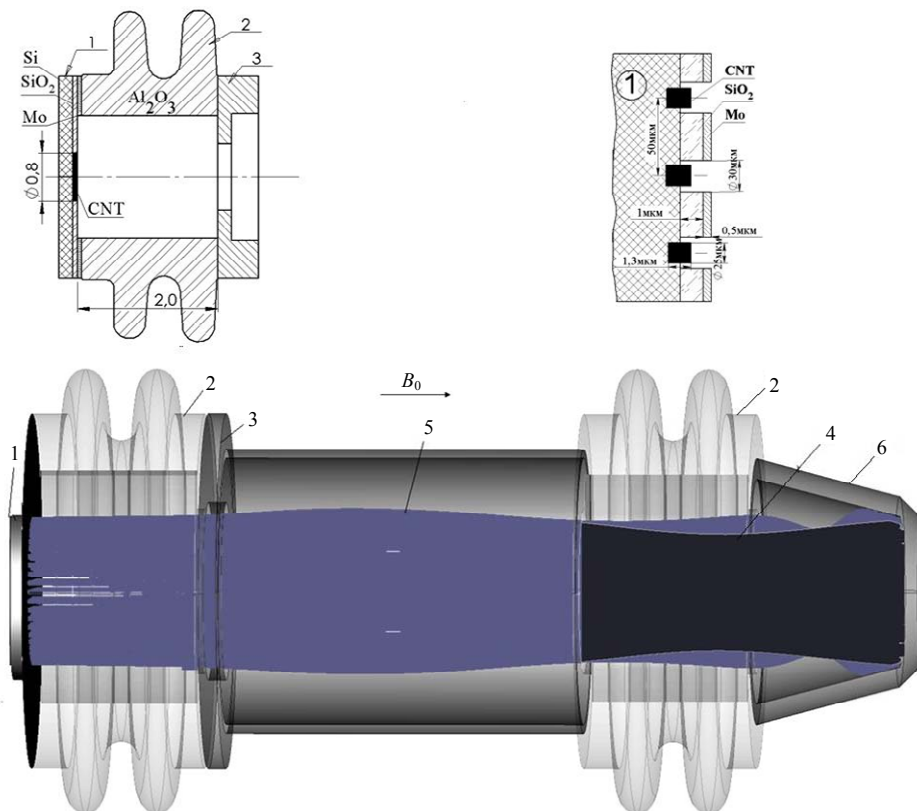


Рис. 5. Автоэмиссионная ЭП с УНТ-катодом (табл. 2) для ЛБВ мм диапазона ($B = 0,9$ Тл):
1 — КСУ, 2 — изоляторы, 3 — анод, 4 — электронный пучок ($U_{кол} = 2 \cdot 10^4$ В),
5 — электронный пучок ($U_{кол} = 500$ В), 6 — коллектор

Для экспериментального диода с многоострийным АЭК на основе СУ-2000 в работе [2] показано, что при зазоре 1 мкм $U_{start} = 55$ В, а $U_{nom} = 115$ В и коэффициент модуляции для варианта ЭП (рис. 1) с таким зазором составит 0,3 % от U_a . Для современных термоэмиссионных ЭП с низковольтным управлением с применением теневых сеток коэффициент модуляции составляет не менее 3—5 % от потенциала замедляющей системы ЛБВ.

В табл. 2 представлены параметры однолучевого варианта ЭП в однородном магнитном поле на основе планарных кремний-углеродных АЭК.

Применение предложенных в работе критериев определения геометрических размеров и электрических режимов ЭП дает возможность существенно уменьшить поперечные скорости электронов и соответственно уменьшить величину напряженности магнитного поля, необходимого для сопровождения электронных потоков высокой плотности в протяженных каналах с малым поперечным сечением. Результаты компьютерного моделирования автоэмиссионной ЭОС с управляемой эмиссией при оптимальных значениях напряженностей электрического поля в зазорах АЭК-сетка и сетка-

Таблица 2

Параметры ЭП на основе планарных кремний-углеродных АЭК

d_{c-g} , мм,	d_{c-a} , мм	D_g , мм, диаметр отверстий в сетке	D_{mc} , мм, диаметр миникаатода из УНТ	l_{μ} , мм, период матрицы УНТ миникаатода	I , мА	U_a , кВ	j , А/см ²	D_a , мм, диаметр отверстия в аноде	K_m , %	$D_{кан}$, мм, диаметр канала	B_0 , Тл
10^{-3}	2,0	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	78	20	15,5	1	0,1	1,5	0,9

Оценка величины однородного магнитного поля при условии амплитуды пульсации пучка, не превышающей $0,1 r_c$, проводилась по формуле:

$$B_0(\text{Тл}) = 12,8 \cdot 10^{-3} \frac{U^{0,5}(\text{В})}{d_{g-a}(\text{мм})},$$

отличающейся от приведенной в работе [9] лишь числовым коэффициентом, уточненным в ходе численного моделирования вариантов ЭП (рис. 5), погруженных в однородное магнитное поле. Применение коллектора с пониженным потенциалом $U_{кол} = 500$ В существенно снижает удельные нагрузки в нем, при этом технический КПД ЛБВ в терагерцовом диапазоне может составить более 10 %.

Заключение

На основе трехмерного компьютерного моделирования триодных ЭП с мини-АЭК, расположенных в ячейках крупноячеистых управляющих сеток, определены условия существования оптимальных значений геометрических параметров ЭП и соответствующих потенциалов сетки, при соблюдении которых в отверстиях сетки устанавливается однородное распределение электростатического поля, а напряженность поля на вершинах микроострий имеет равные значения, что является также условием обеспечения ламинарности формируемого электронного потока и равномерной автоэлектронной эмиссии с каждого микроострия мини-АЭК.

анод предназначены для построения высоковольтных СВЧ-приборов О-типа терагерцового диапазона, отличающихся малой эффективностью взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем, где электронный КПД $\eta_e < 0,5$ % [10]. Однако практическое создание таких приборов связано с преодолением трудностей отвода тепла и сочетания в производственном процессе современных электровакуумной и кремний-углеродной технологий.

Литература

1. Григорьев Ю. А., Правдин Б. С., Шестеркин В. И. // Обзоры по электронной технике. Серия 1, Электроника СВЧ. 1987. вып. 7(1246). С. 71.
2. Григорьев Ю. А., Шалаев П. Д., Бурцев А. А. и др. // Нано и микросистемная техника. 2008. № 7(96). С. 47.
3. Bushuev N., Grigoriev Yu., Bourtsev A., et al. // The Proceedings of the 13th IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2012. P. 559.
4. Петросян А. И., Роговин В. И. // Прикладная физика. 2008. № 2. С. 86.
5. Трубецков Д. И., Краснова Г. М. // Изв. вузов «ПНД». 2013. Т. 21. № 1. С. 35.
6. Бушуев Н. А., Григорьев Ю. А., Гаврюшова Н. Д. и др. // Нанотехника. 2006. № 3. С. 3.
7. Елецкий А. В. // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897.
8. Батурин А. С., Кузин А. А., Лейченко А. С. и др. // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 1. С. 10.
9. Яковлевский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. — М: Сов. радио, 1966.
10. Jack C. Tucek, Mark A. Basten, David A. Gallagher, et al. // The Proceedings of the 15th IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2014. P. 153.

Forming of the laminar electron flows in triode electron guns with multiple tip field-emission mini-cathodes in control grid cells

N. A. Bushuev¹, Yu. A. Grigoriev², A. A. Burtsev¹, I. A. Navrotsky¹

¹Joint Stock Company "NPP "Almaz"
1 Panfilov str., Saratov, 410033, Russia
E-mail: antbourtsev@gmail.com

²Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS
38 Zelenaya str., Saratov, 410019, Russia

Received August 5, 2014

3D simulation of triode electron gun (EG) is performed with regards its structure of multiple-tip field emission cathode in control grid cell. Correlation between EG parameters and control grid potentials is found which leads to uniform electric field in grid holes that means equality of the filed intensity on tops of the tips. Thus the lens effect of the grid and the value of magnetic field are minimized. The simulation of EG with magnetic forming of the high density current beams based on planar silicon-carbon cathodes (Si-SiO₂-C-Mo) is performed.

PACS: 41.85.-p

Keywords: field-emission cathode, multiple beam electron gun, control grid, glassy carbon, CNT.

References

1. Yu. A. Grigor'ev, B. S. Pravdin, and V. I. Shesterkin, *Obzory po Elektronnoi Tekhnike, Seriya 1*, No. 7(1246), 71 (1987).
2. Yu. A. Grigor'ev, P. D. Shalaev, A. A. Burtsev, et al., *Nano I Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 7(96), 47 (2008).
3. N. Bushuev, Yu. Grigoriev, A. Bourtsev, et al., in *Proceedings of the 13th IEEE International Vacuum Electronics Conference*. (2012), p. 559.
4. A. I. Petrosyan and V. i. Rogovin, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 86 (2008).
5. D. I. Trubetskov and G. M. Krasnova, *Izv. Vuzov "PND"*, **21**, 35 (2013).
6. N. A. Bushuev, Yu. A. Grigor'ev, N. D. Gavryushova, et al., *Nanotekhnika*, No. 3, 3 (2006).
7. A. V. Elatsky, *Usp. Phys.* **180**, 897 (2010).
8. A. S. Baturin, A. A. Kuzin, A. S. Leichenko, et al., *Bull. MFTI*, **5**, 10 (2013).
9. I. V. Alyamovsky, *Electron Beams and Electron Guns* (Sov. Radio, Moscow, 1966) [in Russian].
10. Jack C. Tucek, Mark A. Basten, David A. Gallagher, and Kenneth E. Kreischer, in *Proceedings of the 15th IEEE International Vacuum Electronics Conference*. (2014), pp. 153, 154.