

Исследование эмиссионных характеристик многолучевой электронной пушки с автоэмиссионным катодом из стеклоуглерода

© Н.А. Бушуев,¹ О.Е. Глухова,² Ю.А. Григорьев,³ Д.В. Иванов,² А.С. Колесникова,²
А.А. Николаев,¹ П.Д. Шалаев,¹ В.И. Шестеркин¹

¹ Акционерное общество „Научно-производственное предприятие „Алмаз“,
410033 Саратов, Россия

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия

³ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
410019 Саратов, Россия
e-mail: shesterkin.v@mail.ru

(Поступило в Редакцию 13 мая 2015 г.)

Представлены результаты исследования многолучевой триодной электронной пушки с автоэмиссионным катодом из стеклоуглерода для СВЧ-усилителя О-типа. Проведены расчеты напряженности электростатического поля и плотности тока на микроостриях в зависимости от их удаления от центра ячейки катодно-сеточного узла электронной пушки. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. Показано, что примерно 70% тока катода в каждой ячейке принадлежит микроостриям, расположенным на его периферии внутри кольца шириной не более 20 μm . Плотность тока автоэлектронной эмиссии внутри кольца превышает значение 40 A/cm^2 , а ток с единичного микроострия составляет 43.1 μA .

Введение

В работе [1] приведены конструкция и результаты экспериментального исследования многолучевой электронной пушки (ЭП) с 19 автоэмиссионными миникатодами в форме цилиндров из стеклоуглерода. На торцах цилиндрических миникатодов была сформирована матрица микроострий с плотностью упаковки $2.5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$ методом термохимического травления [2]. В работе [3] представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) аналогичной по конструкции ЭП с увеличенной плотностью упаковки микроострий до $1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$. По сравнению с ЭП [1] ток катода возрос с 113 до 270 mA , а усредненное по всей поверхности катода значение плотности тока возросло с 5.5 до 13.2 A/cm^2 . Прохождение электронного пучка через анод ЭП составило 33% от тока катода.

Причины значительного перехвата тока пучка электродами ЭП были рассмотрены в [4]. В работе [5] приведены результаты численных расчетов электростатических полей в ячейках катодно-сеточного узла (КСУ) и автоэлектронной эмиссии с микроострий без учета нанорельефа поверхности их вершин. Было показано, что плотность тока с микроострий с плоскими вершинами возрастает более чем в 10 раз от центра ячейки к ее периферии.

Целью настоящей работы является исследование распределения электростатических полей в ячейке КСУ и тока с микроострий с учетом реального рельефа поверхности их вершин, а также определение размеров периферийной области катода, вносящей основной вклад в ток электронного пучка.

Экспериментальный макет электронной пушки

В качестве экспериментального макета была использована электронная пушка с 19 автоэмиссионными миникатодами из стеклоуглерода, изготовленными методом электроискровой обработки. Миникатоды диаметром 370 μm , располагались на двух концентрических окружностях с диаметрами 1.25 и 2.5 mm по 6 и 12 миникатодов соответственно. Один миникатод располагался в центре. На плоской поверхности каждого миникатода была сформирована матрица микроострий в форме усеченного конуса высотой 12 μm , диаметром вершины 1.6 μm . Вершины микроострий имели 13-й класс чистоты поверхности. Плотность упаковки микроострий составляла $1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$. Управляющая сетка из анизотропного пиролитического графита толщиной 110 μm с 19 отверстиями диаметром 500 μm располагалась над поверхностью микроострий. Анод имел 19 отверстий диаметром 500 μm , совмещенных с отверстиями управляющей сетки и миникатодами. Потенциал анода изменялся от 6750 до 20000 V . За анодом размещалась диафрагма с малым отверстием (диаметром 30 μm) для измерения распределения плотности тока по диаметру пучка за анодом пушки и служила коллектором электронов, прошедших через анод. Конструкция макета ЭП позволяла в процессе эксперимента изменять положение катода относительно управляющей сетки. Зазор между управляющей сеткой и анодом не изменялся. Схема единичной ячейки КСУ представлена на рис. 1.

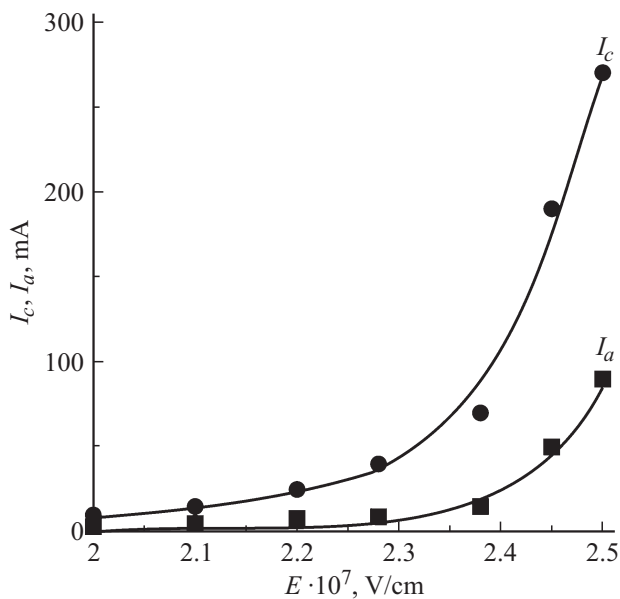


Рис. 4. График зависимости тока за анодом I_a и тока катода I_c от напряженности поля на микроостриях.

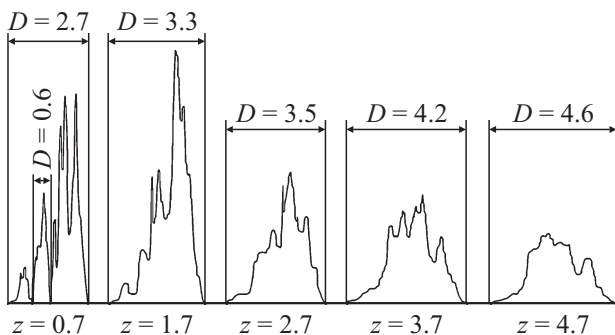


Рис. 5. Распределение плотности тока по диаметру пучка на различных расстояниях от анода (все размеры даны в мм).

ния Фаулера–Нордгейма [6] путем замены поля E на произведение βU_g .

Для данной конструкции ячейки усредненная величина параметра преобразования поля составила $\beta = 3.8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$. С использованием полученного значения параметра преобразования поля была построена зависимость тока катода от напряженности поля на эмиссионных центрах (рис. 4).

Методом диафрагмы с малым отверстием измерены распределения плотности тока по сечению пяти микропучков на расстояниях $z = 0.7, 1.7, 2.7, 3.7$ и 4.7 мм от анода (рис. 5).

Из-за разброса поперечных скоростей электронов, являющегося следствием линзового эффекта ячеек КСУ, кривые распределения плотности тока по мере удаления от плоскости анода сглаживаются, образуя единую огибающую электронного пучка. Полуугол расходимости границы пучка на расстоянии 4.7 мм от анода состав-

ляет $\sim 13.5^\circ$. Аналогичные значения поперечных скоростей электронов зарегистрированы экспериментально в электронных пушках с теньевыми и управляющими сетками вблизи поверхности термоэмиссионного катода [7].

Расчет распределения напряженности поля и автоэлектронной эмиссии на микроостриях в ячейке КСУ

Стационарная задача о распределении потенциала между катодом, управляющей сеткой, анодом и измерительной диафрагмой решалась численно методом конечных элементов. Плоская осесимметричная геометрическая модель была построена в системе автоматизированного проектирования SolidWorks 2008 и импортировалась в систему конечно-элементного анализа Ansys Mechanical APDL 15.0.

Минимальный размер вычислительной сетки на вершине микроострия составлял 0.05 nm , а максимальный — $2 \mu\text{m}$ в области диафрагмы. Общее число узлов вычислительной сетки, состоящих из четырехугольных элементов, составило порядка $2.5 \cdot 10^6$. При численном расчете использовался плоский конечный элемент PLANE121 — восьми узловой четырехугольный конечный элемент, который в каждом узле имел одну степень свободы (потенциал электростатического поля) и применялся для решения задач электростатики [8]. На плоской поверхности миникатода по его радиусу располагалось 18 микроострий. Первое микроострие располагалось на оси симметрии миникатода, 18-е — вблизи перемычки управляющей сетки.

Проведен расчет напряженности поля на микроостриях в ячейке для трех положений вытягивающей сетки $\Delta x = -20, 0$ и $+20 \mu\text{m}$. На каждом микроострии были рассчитаны два значения напряженности поля — на левом и правом краях по диаметру вершины микроострия. На диаграмме рис. 6 представлены напряженности поля для пяти микроострий (№ 1, 6, 10, 14 и 18). Результаты

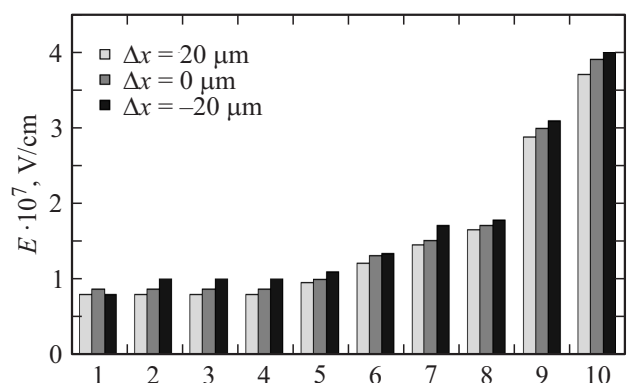


Рис. 6. Диаграмма изменения напряженности электростатического поля по радиусу ячейки.

Рассчитанные эмиссионные параметры ячейки

Радиус, μm	Средняя напряженность для каждого микроострия с учетом наноострий, $\times 10^7, \text{V/cm}$	Плотность тока с микроострия, A/cm^2	Ток с одного микроострия, μA
180	9.5	$7 \cdot 10^8$	53.7
160	5	$6.7 \cdot 10^5$	0.05
140	4.25	$5.8 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-3}$
120	3.25	440	$33 \cdot 10^{-6}$
100	2.75	11	$8.25 \cdot 10^{-7}$
80	2.5	1	$7.5 \cdot 10^{-8}$
60	2.25	0.057	$4.2 \cdot 10^{-9}$
40	2	0.002	$1.5 \cdot 10^{-10}$
20	2	0.002	$1.5 \cdot 10^{-10}$
0	1.8	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-12}$

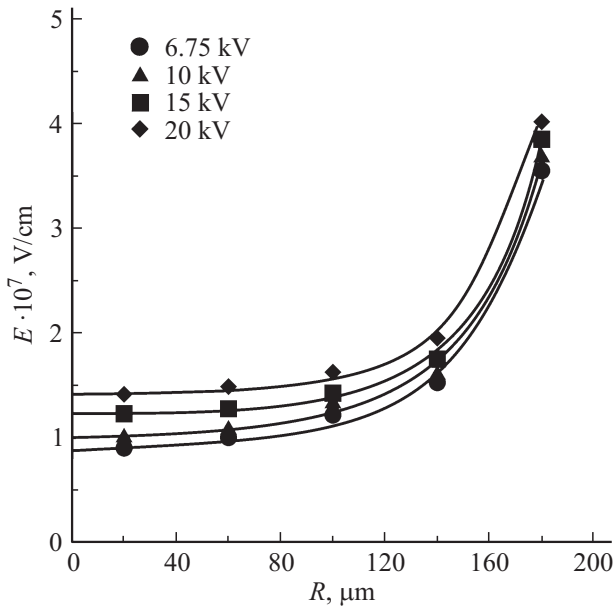


Рис. 7. Напряженность поля по радиусу ячейки при различных напряжениях анода.

расчетов хорошо согласуются с данными эксперимента (рис. 2).

Наибольшее значение напряженности поля (до $4 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$) достигалось на вершине крайнего микроострия, наиболее близко расположенного к перемычке управляющей сетки. Напряженность поля существенно уменьшалась уже на втором от края микроострии и продолжала снижаться на микроостриях по мере их приближения к центру ячейки.

Проведен анализ влияния потенциала анода на напряженность поля в ячейке КСУ (рис. 7). Расчеты показали, что при напряжении анода $U_a = 2000 \text{ V}$ напряженность поля на вершине центрального микроострия возросла с $0.9 \cdot 10^7$ до $1.4 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$.

Реальная поверхность вершин микроострий не является гладкой даже при их полировке до 13-го класса

чистоты поверхности. Измерения профиля поверхности вершин микроострий с помощью атомно-силового микроскопа показали, что она представляет собой поверхность с неупорядоченно расположенными остриями наноразмерной величины (рис. 8), коэффициент усиления электростатического поля которых может составлять более 10 безразмерных единиц [9].

Расчеты электростатических полей с учетом наноострий на вершинах микроострий проведены при напряжении управляющей сетки $U_g = 6550 \text{ V}$ и представлены на рис. 9. На каждом микроострии располагалось 5 наноострий. Значения напряженностей полей на вершинах наноострий усреднялись для каждого микроострия. На основе полученных значений напряженности поля были рассчитаны плотность эмиссионного тока и ток для каждого из микроострий, расположенных по радиусу миникатода (см. таблицу, рис. 10, a, b). Из полученных результатов расчетов можно сделать вывод, что максимальная напряженность поля в ячейке достигалась на микроостриях на периферии катода внутри кольца шириной не более $20 \mu\text{m}$. На данном

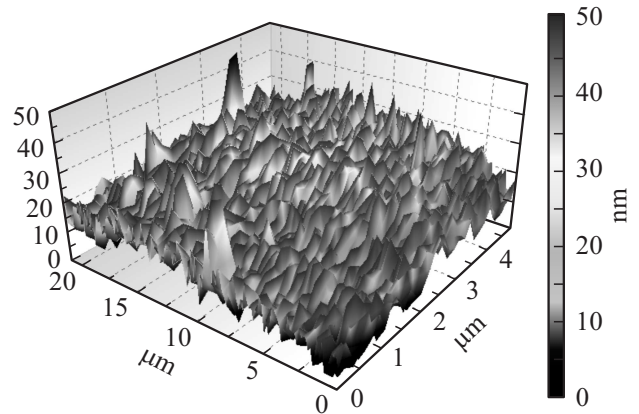


Рис. 8. Поверхность вершины полированного микроострия, полученная при помощи атомно-силового микроскопа Nanosurf, США.

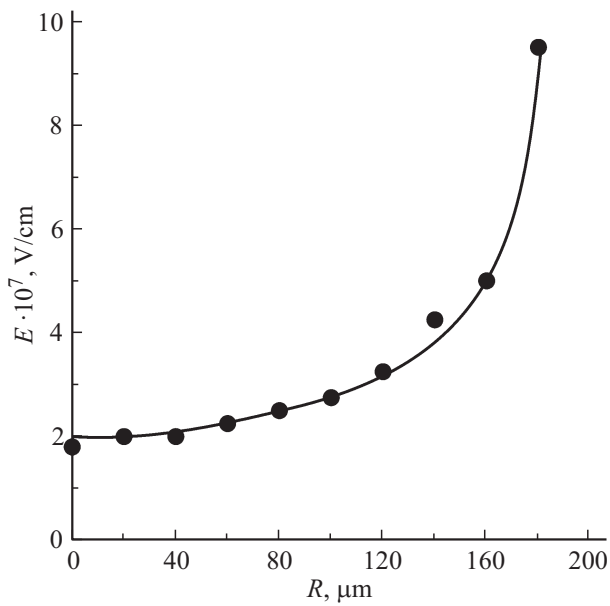


Рис. 9. Зависимость напряженности поля по радиусу ячейки с учетом наностростей.

кольце, площадь которого не превышала 20% всей площади миникатода, находились примерно 220 микроострий. Как показал траекторный анализ [5], а также результаты проведенных в настоящей работе расчетов электростатического поля и тока с микроострий в ячейке исследуемой ЭП, примерно 70% тока катода были перехвачено управляющей сеткой. Этот ток был эмитирован микроостриями с периферийного кольца на катоде. Ток с единичного микроострия внутри кольца составил примерно $43 \mu\text{A}$, а усредненное по площади кольца значение плотности тока составляло

более 40 A/cm^2 . Расчетное значение тока с единичного микроострия внутри данного кольца составило $53.7 \mu\text{A}$. Для центральной области миникатодов усредненное значение тока с единичного микроострия составляло примерно $4.9 \mu\text{A}$, а плотность тока не превышала 5 A/cm^2 .

Заключение

Результаты проведенных исследований 19-лучевой ЭП при оптимальном положении управляющей сетки относительно плоскости вершин микроострий показали, что ток катода составил 270 mA , а усредненное значение плотности тока по всей площади катода составило 13.2 A/cm^2 . Ток, прошедший через анод, был эмитирован микроостриями в основном из центральной области миникатодов и составил 90 mA . Плотность тока в данной области миникатода не превышала 5 A/cm^2 , а величина тока с единичного микроострия составила $4.9 \mu\text{A}$. Плотность тока в каждом парциальном пучке на выходе из анода составила 4.4 A/cm^2 .

Расчеты распределения напряженности поля по диаметру миникатода в ячейке с учетом острий наноразмерного уровня на вершинах микроострий показали, что основная доля тока автоэлектронной эмиссии катода (около 70%) принадлежит микроостриям, расположенным на его периферии внутри кольца шириной не более $20 \mu\text{m}$. Площадь кольца не превышала 20% площади миникатода. Плотность тока автоэлектронной эмиссии внутри кольца составила более 40 A/cm^2 . Ток автоэлектронной эмиссии единичного микроострия превысил $43 \mu\text{A}$, что существенно выше (более 10 раз), чем ток с молибденовых острий в ячейках Спиндта или с углеродных нанотрубных эмиттеров. Полученные

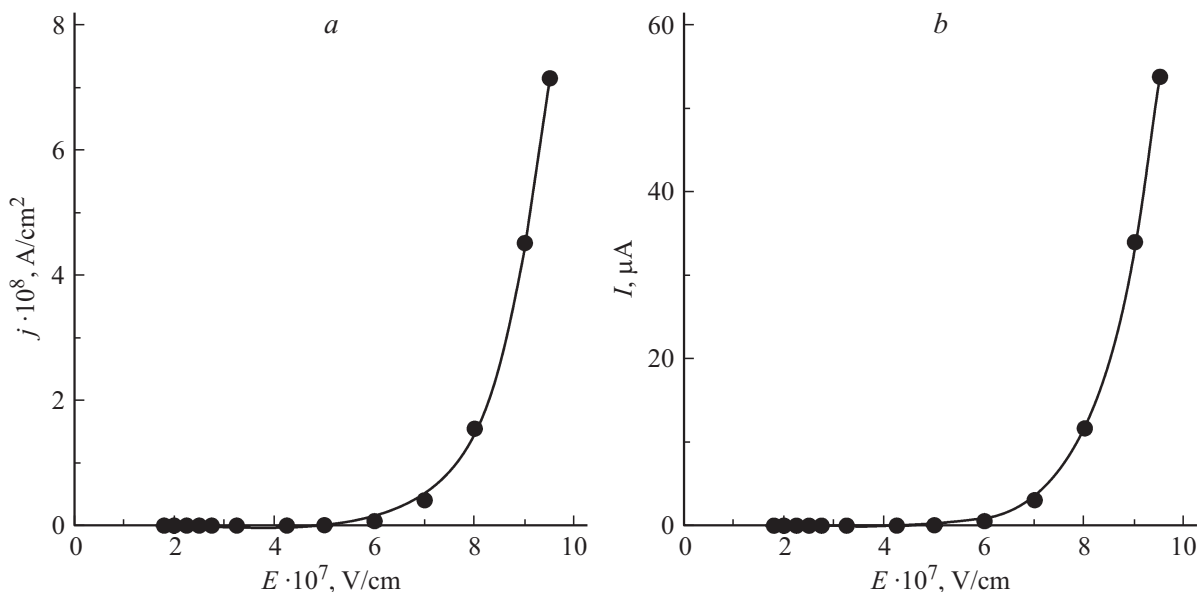


Рис. 10. Зависимости плотности тока (а) и тока (б) с микроострий от напряженности поля с учетом наностростей.

результаты указывают на перспективность применения монолитного стеклоуглерода в качестве материала для создания эффективных безнакальных источников электронов для вакуумных приборов коротковолновой части СВЧ-диапазона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 14-01-31429, 14-01-31508, 13-8-00986), Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 3.1155.2014/К и Президентской стипендии 2013-2016 (проект № СП-2302.2013.1) и гранта РФФИ № 13-08-00986.

Список литературы

- [1] Бушуев Н.А., Шестеркин В.И., Бурцев А.А., Григорьев Ю.А. и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Вып. 4 (519). Ч. 2. С. 175.
- [2] Григорьев Ю.А., Васильковский С.В., Шестеркин В.И., Ярцева З.А. // Патент № 1738013. 06.04.93.
- [3] Shesterkin V.I., Grigoriev Yu.A. // IEEE Trans. 2014. IVESC. P. 250–251.
- [4] Петросян А.И., Роговин В.И. // Прикладная физика. 2008. № 2. С. 86–91.
- [5] Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Морев С.П., Шестеркин В.И., Шалаев П.Д. // РЭ. 2014. Т. 59. № 8. С. 744–781.
- [6] Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. // Автоэлектронная эмиссия. Физ.-мат. лит., 1958. 272 с.
- [7] Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестеркин В.И. // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М.: Изд-во ЦНИИ Электроника, 1987. Вып. 7. 71 с.
- [8] Moaveni S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS (4th edition). Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014. 880 p.
- [9] Елецкий А.В. // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897–929.