

**Д.А. Бессонов<sup>1</sup>, Т.Н. Соколова<sup>1</sup>, Е.Л. Сурменко<sup>1</sup>,  
А.Н. Дармаев<sup>2</sup>, С.П. Морев<sup>2,3</sup>, Э.К. Муравьев<sup>2</sup>,  
П.Д. Шалаев<sup>4</sup>, В.И. Шестеркин<sup>4</sup>, К.В. Шумихин<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический  
университет им. Гагарина Ю.А., г.Саратов

<sup>2</sup>АО НПП «Торий»

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

<sup>4</sup>АО НПП «Алмаз»

## **Автоэмиссионные ячейки из стеклоуглерода с высоким аспектным отношением острий (расчет и изготовление с помощью лазерного фрезерования)**

*На основе численного моделирования рассмотрены различные возможности повышения качества формирования электронного потока катодными матрицами, состоящими из многослойных планарных структур с вертикальным расположением автоэммиттеров. Показана эффективность применения технологий микроразмерного фрезерования лазерным излучением наносекундной длительности импульса для получения автоэмиссионных ячеек с эмиттерами из стеклоуглерода в виде игл с аспектным отношением в несколько сотен единиц и катодных матриц на их основе.*

**Ключевые слова:** Автоэмиссионные ячейки, автоэммиттеры на основе стеклоуглерода СУ-2000, многослойные планарные структуры.

Многообразные модификации углеродных материалов (углеродные нанотрубки, углеродные волокна, острия из стеклоуглерода, алмазоподобные пленки и тому подобное) продолжают оставаться одними из перспективных материалов для автоэмиссионных катодов различных электровакуумных устройств, вследствие возможности получения стабильной автоэлектронной эмиссии катодов при техническом вакууме [1,2].

Использование катодов с вертикальным и плотным расположением острий эмиттеров из стеклоуглерода, над которыми расположена сеточная структура с крупными отверстиями позволило увеличить плотность автоэмиссионного тока до  $1,0\text{А/см}^2$  и выше, при стабильной работе катодов в условиях технического вакуума в течении более 1000 часов. Однако существенным недостатком подобных конструкций является высокое напряжение на управляющей сетке (более 10% по отношению к потенциалу анода) и чрезмерное (до 70% катодного тока) оседание на нее электронного потока.

В докладе рассмотрена возможность улучшения свойств многоострильных катодных структур с вертикально расположенными автоэммиттерами из стеклоуглерода и высоким аспектным соотношением, а также продемонстрирована возможность изготовления таких автоэммиттеров из стеклоуглерода с помощью микроразмерного лазерного фрезерования.

В ходе поиска оптимальных конструкций на основе численных расчетов были рассмотрены варианты исполнения катодно-сеточных узлов с вертикально расположенными остриями катодной матрицы. В частности были рассмотрены многослойные планарные структуры из чередующихся слоев «углерод – нитрид бора – углерод», расположенные вблизи (вплоть до касания) вертикально расположенных острий катодной матрицы [3]. В качестве типичных размеров выбирались размеры, характерные

для автоэммиттеров, изготовленных по тонкопленочной технологии [4]. Кроме этого были рассмотрены варианты исполнения макроострий в виде усеченных конусов с плоской вершиной, с выпуклой вершиной, с размещением на вершине макроострий острий меньшего размера. В этом случае рассматривалось одиночное острие, размещенное соосно с отверстием сеточной структуры, состоящей из керамики VN с одно- или двухсторонним нанесением на нее слоя титана. Анализ результатов проведенного цикла расчетов позволил сформулировать следующие выводы:

- при задании плоской вершины острий за счет значительного (более чем в 10 раз) перепада величины напряженности электрического поля в направлении от центра к краю вершины острия, при одностороннем нанесении на керамику слоя металла происходило оседание существенной части электронного потока на керамику и проводящий слой металла сеточной структуры. Перепад напряженности поля от центра острия к краю может быть существенно уменьшен за счет закругления вершины острия.
- Размещение на плоской или выпуклой вершине острия дополнительного ряда микроострий приводило к увеличению величины электрического поля на вершинах острий второго уровня и при выборе положения сеточной структуры с двухсторонним нанесением проводящих слоев обеспечивалось прохождение электронного потока в отверстие ячейки сетки без потерь.

Однако величина электрического поля на вершинах острий второго уровня при использовании тонкопленочной технологии оставалась недостаточной для получения приемлемых величин тока из ячейки из-за относительно малой высоты острий второго уровня по сравнению с диаметром основания этих острий. Кроме того, увеличению напряженности поля препятствовала проявляющаяся губчатая структура стеклоуглерода с толщиной перегородок от 50 нм до 1 мкм, поскольку самые тонкие перегородки подвержены и к наиболее быстрому «выгоранию» из-за возможности перехода режима автоэмиссии с этих перегородок к режиму взрывной эмиссии или тепловой перегрузки, возникающей вследствие протекания чрезмерно большого тока через малое сечение перегородки.

Для существенного увеличения напряженности электрического поля на вершинах острий и, соответственно, величины тока с них были проведены расчеты автоэмиссионных ячеек с увеличенным аспектным отношением и измененным расположением острий в автоэмиссионной ячейке.

С этой целью было рассмотрено два типа автоэмиссионных ячеек с одинаковыми основными геометрическими размерами.

В первой ячейке двенадцать острий высотой  $h=400$  мкм и диаметром острий  $D_{ост}=2$  мкм были расположены на окружности  $D_1=800$  мкм, соосной с отверстиями сеточной структуры диаметром  $D_2=1400$  мкм. Расстояние между остриями и сеточной структурой составляло  $z_c=400$  мкм. Разность потенциалов между остриями и сеточной структурой составляла  $U_c=10000$  В. На расстоянии  $z_k=1400$  мкм от вершин острий располагался анод с потенциалом  $U_a=20000$  В.

Во второй ячейке вместо уединенных острий, располагалось вертикально ориентированное кольцевое лезвие с высотой  $h=400$  мкм и толщиной острия лезвия  $D_{ост}=2$  мкм.

Результаты расчетов показали, что, несмотря на большую величину напряженности электрического поля создаваемого уединенным острием по сравнению с лезвийным эмиттером (примерно в 3 раза), величина суммарного тока при одинаковых размерах и потенциалах с лезвийного автоэлектронного эмиттера получалась существенно большей, чем с 12-ти острий, расположенных на том же диаметре (почти в 30 раз). Дополнительным положительным свойством подобной лезвийной конструкции, помимо сохранения

возможности защиты от ионного потока, являлась большая стойкость к тепловой перегрузке по сравнению с уединенным острием.

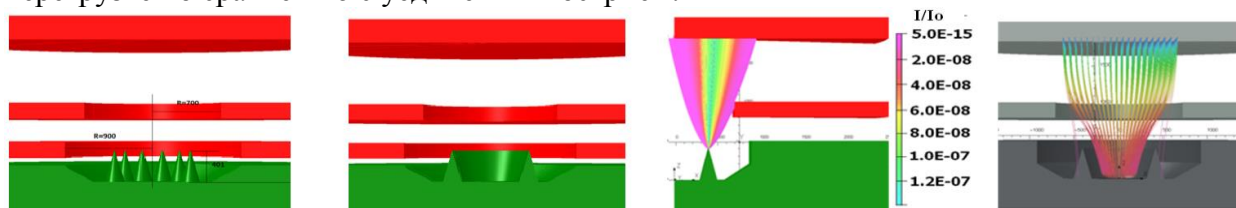


Рис.1. Автоэмиссионная ячейка с вертикально расположенными остриями (а) и лезвием (б), траектории электронов (в) и ионов (г) в ячейке с лезвием

Поскольку расчеты продемонстрировали перспективность работы подобных ячеек и в связи с тем, что изготовление подобных ячеек с помощью тонкопленочной технологии невозможно, была рассмотрена возможность изготовления таких ячеек с помощью лазерного фрезерования.

С этой целью экспериментальные исследования были проведены на оборудовании ЦКП «Лазерные и оптические технологии» (Поволжский филиал).

Выбор режимов лазерного излучения и способа формирования острий проводились на исследовательском стенде с Nd:YAG-лазером с диодной накачкой, обеспечивавшем работу в режиме модулированной добротности. Длина волны лазера составляла 1064 нм, средняя мощность – 4 Вт, длительность импульса – 70 нс.

Визуальное исследование острийных структур было проведено с помощью электронной и силовой микроскопии. Исследование поверхности пластин на чистоту проводилось методом лазерной эмиссионной спектроскопии (LIBS).

Формирование автоэмиссионной структуры на пластине из стеклоуглерода марки СУ-2000 осуществлялось в несколько этапов, на каждом из которых использовалась отдельная программа. На первом этапе формировались массивы „пьедесталов” в виде прямых усеченных конусов с плоской вершиной. На втором этапе осуществлялось формирование сферической поверхности на вершинах каждого из сформированных „пьедесталов”. На третьем этапе осуществлялось формирование массива острий на сферических вершинах „пьедесталов”.

На представленной на рис. 6 цилиндрической заготовке катодной матрицы диаметром 3,1 мм было сформировано 19 катодов, центры которых были расположены на двух концентрических окружностях диаметрами 1,25мм и 2,5 мм по 6 и 12 катодов соответственно, а один катод расположен в центре. Высота катодов составляла примерно 500 мкм. На вершинах катодов были сформированы матрицы острий с радиусом закругления вершин 5 мкм и плотностью упаковки  $2 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

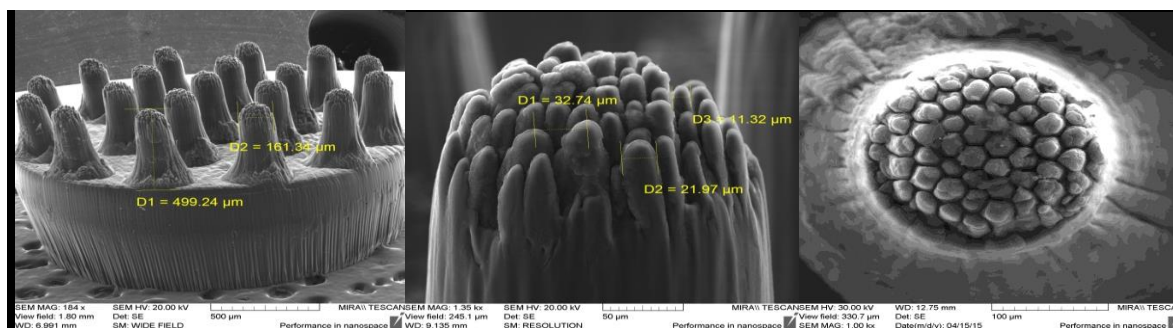


Рис. 2. Автоэмиссионный катод с остриями на пьедестале для 19-ти лучевой ЭОС: а) – общий вид ; б) – вершина миникаатода; в) – вид сверху.

Кроме того, были сформированы массивы уединенных острий катодной структуры с высоким аспектным отношением. Четкие и повторяемые результаты

получались при следующих, найденных опытным путем, параметрах: фокусное расстояние линзы объектива 50 мм, мощность излучения 3,9 Вт, скорость перемещения луча лазера 343 мм/сек, частота следования импульсов 30 кГц.

На рис. 3 представлен катод диаметром 3,1 мм с 19-ю игольчатыми остриями, расположенными на двух concentрических окружностях с диаметрами 1,25 мм и 2,5 мм по 6 и 12 острий соответственно. Одно острие расположено в центре. Высота острий на некоторых образцах катодов достигала до 700 мкм. Радиусы кривизны вершин на отдельных образцах катодов составлялаот 0,8 мкм до 3 мкм.

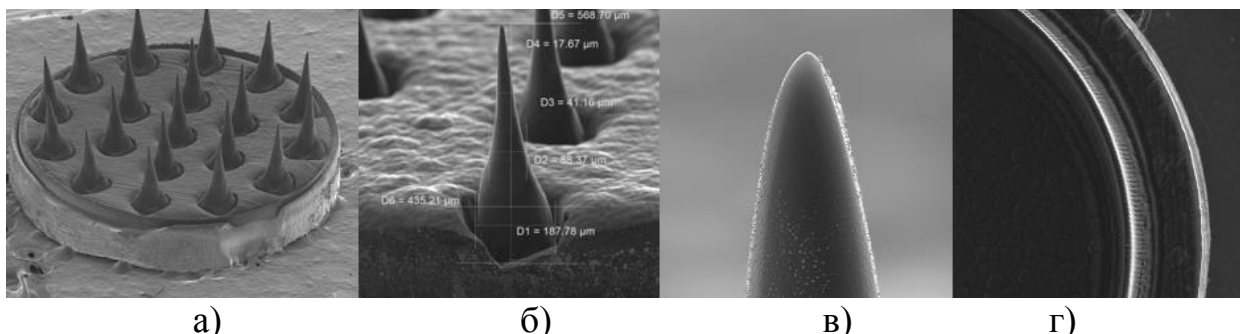


Рис. 3. Катодная структура с игольчатыми и лезвийными остриями: а) – общий вид; б) – размеры острий; в) – вершина острия; г) фрагмент лезвийного острия

Аспектное отношение геометрических размеров острий составило 500 – 600 единиц. Для каждого катода вершины всех острий лежали на одной плоскости. Как видно из приведенных фотографий поверхность вершин являлась гладкой.

Поскольку структура вырезана из единой детали, то полученная матрица обладает повышенной прочностью к разрушению под действием пондеромоторных сил. Кроме того, получение такой поверхности на стеклоуглероде, который по своей структуре состоит из объемных полостей размером  $\approx 50$  нм, разделенных перегородками толщиной  $\approx 5$  нм, говорит о наличии у стеклоуглерода жидкой фазы при воздействии лазерного излучения.

#### Библиографический список

1. Егоров Н.В., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. М.: ИД “Интеллект”, 2011.
2. Елецкий А.В. // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 9. С. 897.
3. Дармаев А. Н., Комаров Д. А., Морев С.П., Шестеркин В.И., Шалаев П.Д. //РЭ 2014. Т.59. №8. С. 774.
4. Григорьев Ю. А., Васильковский С. В., Шестеркин В. И., Ярцева З. А. // А.с. СССР № 1738013. Оpubл.12.02.1993.