

**Морев С.П.^{1,2}, Дармаев А.Н.¹, Комаров Д.А.^{1,2},
Муравьев Э.К.¹, Бессонов Д.А.³, Соколова Т.Н.³,
Сурменко Е.Л.³, Шалаев П.Д.⁴, Шестеркин В.И.⁴**

¹АО НПП «Торий»

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

³Саратовский государственный технический

университет им. Ю.А. Гагарина

⁴АО НПП «Алмаз»

Автоэмиссионные ячейки из стеклоуглерода с высоким аспектным отношением острий и электронно-оптические системы на их основе

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.

Из-за возможности получения стабильной автоэлектронной эмиссии катодов при давлении остаточных газов не хуже 10^{-6} мм рт. ст. игольчатые или лезвийные модификации углеродных материалов (стеклоуглерод или алмазоподобные пленки) продолжают быть основными материалами в катодных узлах различных электровакуумных устройств [1].

Использование вертикально расположенных эмиттеров из стеклоуглерода с большим отношением радиуса кривизны острия к его высоте, над которыми расположены отверстия сеточной структуры позволило увеличить плотность автоэмиссионного тока до $1,0 \text{ А/см}^2$ и выше при стабильной работе катодов в условиях технического вакуума [2]. Однако в подобных структурах может наблюдаться чрезмерное (до 50% катодного тока) оседание на сетку электронного потока.

В докладе рассмотрена возможность повышения как величины тока, эмитируемого ячейкой, так и формирования электронной пушкой с последующей транспортировкой в пролетном канале протяженного электронного потока с относительно невысоким значением разброса поперечных составляющих скоростей электронного потока и высоким уровнем токопрохождения на коллектор.

В ходе поиска оптимальных конструкций на основе численных расчетов рассматривались различные варианты исполнения катодно-сеточных узлов с вертикально расположенными эмиттерами катодной матрицы. В качестве наиболее перспективных

конструктивных исполнений, предназначенным для использования электронных потоков в электровакуумных приборах, было выбрано две группы. К первой группе были отнесены катодные структуры из стеклоуглерода, элементарная ячейка которых состояла из аксиально-симметричного уединенного эмиттера с большим аспектным отношением и электрода с отверстием, расположенного соосно с острием (аналог ячейки Спиндта [3]). Ко второй группе были отнесены структуры, в которых эмиттеры из стеклоуглерода с большим аспектным отношением расположены по окружности¹, соосной с отверстием в крупнотрунтурной сетке в пределах одной ячейки (аналог ячейки Григорьева–Шестеркина [4]).

При моделировании формирования потока электронными пушками с рассматриваемыми автоэмиссионными ячейками, как и в [5] необходимо учитывать двухмасштабность² структуры таких пушек. Кроме получения максимальной величины тока пучка, при рассмотрении “тонких” характеристик электронного потока, сформированного подобными ячейками, таких как распределение плотности тока в поперечном сечении пучка, средние углы наклона электронов к оси электроно-оптической системы (ЭОС), среднеквадратичное отклонение углов наклона электронов относительно средних (“нулевой”, “первый” и “второй” моменты функции распределения электронов в фазовом пространстве) следует стремиться к минимальной величине эмиттанса пучка. За счет двухмасштабной структуры электронных пушек может быть получена конфигурация электродов электронной пушки, обеспечивающей требуемый ток пучка при относительно небольшой величине фазового объема пучка.

С этой целью были рассмотрены автоэмиссионные ячейки (рис. 1) с основными геометрическими размерами, представленными в табл. 1.

Отношение высоты эмиттера №1 к радиусу кривизны его вершины составило $(h/r)=86$, для эмиттера №2 – $(h/r)=305$, а для эмиттера №3 – $(h/r)=650$.

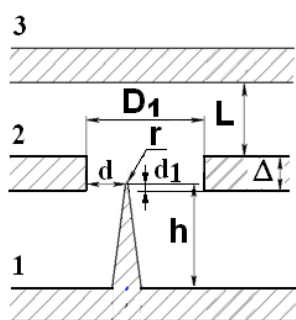


Рис. 1. Ячейка с уединенным эмиттером

Таблица 1. Основные размеры ячеек

Размеры	№ 1	№ 2	№ 3
D_1 , мкм	480	480	480
d , мкм	50	130	110
d_1 , мкм	40	40	-200
L , мкм	200	200	200
Δ , мкм	140	120	120
h , мкм	430	1070	1300
r , мкм	5.0	3.5	2.0

Для получения большей величины электрического поля на поверхности эмиттера, вершины эмиттеров ячеек №1, №2 были погружены в отверстие сеточной структуры.

При большом аспектном отношении эмиттера в импульсном режиме удалось получить ток с одного эмиттера, равный 8 мА, при относительно невысоком значении

¹ В пределе такое расположение игл приводит к образованию кольцевого лезвия (рис. 1в).

² Под двухмасштабностью структуры электронной пушки здесь понимается наличие в пушке двух подобластей: в первой подобласти происходит значительная пространственная декомпрессия микро пучков, эмитируемых с острий ячеек, а во второй - за счет распределения потенциала в пушке происходит относительно небольшая компрессия потока в целом.

напряжения ($U=2350$ В) на вытягивающем ток электроде [5]. Однако оседание пучка на этот электрод составляло $\sim 40\%$, что не позволило использовать напрямую подобную ячейку в электронной пушке.

В таблице 2 представлена расчетная зависимость величины тока с острия эмиттера ячейки №1 при напряжении на сетке и аноде, равном $U=2350$ В, и смещении его от края отверстия сетки к ее центру.

В таблице 3 представлена аналогичная зависимость при вертикальном расположении острия эмиттера ячейки №1, расположенного по оси ячейки, от нижнего края отверстия до верхнего края.

При расположении эмиттера №1 по оси отверстия (со смещением $d_1=50$ мкм) как показал анализ результатов расчетов (рис. 2), для восстановления величины напряженности электрического поля³ на вершине эмиттера (соответственно, восстановления величины тока, до прежнего значения тока в ячейке) достаточно увеличить напряжение на сетке до $U=3000$ В.

При размещении эмиттера ячейки №1 по центру отверстия, а его вершины на уровне верхнего края отверстия, напряжение на аноде снижается до 2800 В.

Для ячейки №2 при $U=2350$ В, том же заглублении вершины эмиттера и его размещении на расстоянии $d=130$ мкм от края отверстия, за счет большего аспектного отношения, значение тока получилось больше. Размещение вершины эмиттера ячейки №3 ниже отверстия в сетке, несмотря на меньший радиус кривизны вершины эмиттера привело к существенному падению тока при напряжении $U=2350$ В и оседанию существенной части тока на сеточную структуру.

Таблица 2. Зависимость тока от горизонтального положения эмиттера в отверстии ячейки

d, мкм	50	100	150	200	240
I, mA	7.91	0.69	0,2	0.11	0.09

Таблица 3. Зависимость тока от вертикального положения эмиттера в отверстии ячейки

d_1 , мкм	0	35	70	105	140
I, mA	0.052	0.082	0,14	0.20	0.24

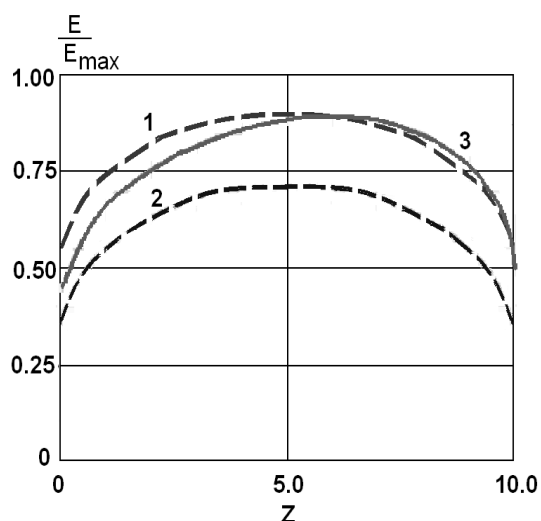


Рис. 2. Распределение электрического поля на вершине эмиттера в ячейке №1:

1, 2 – $d=240$ мкм, 3 – $d=50$ мкм,
1 – $U=3000$ В, 2 – $U=2350$ В, 3 – $U=2350$ В

³ Асимметричность в зависимости 3 связана с несимметричным расположением эмиттера относительно оси ячейки

Измерения тока в автоэмиссионных ячейках проводились в импульсном режиме (длительность импульса 18 мкс, скважность 650) при непрерывном процессе откачки объема вакуумной камеры. Изготовленный автоэмиссионный катод с уединенным острием устанавливался в экспериментальный макет без предварительной химической или плазменной очистки катода. Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проведено при давлении остаточных газов 5.8×10^{-7} тор.

Основные трудности нахождения конфигурации электродов пушки с автоэмиттерами, формирующие электронный поток с требуемым значением первенаса потока, связаны с быстрым расплыванием электронного потока. Кроме того, пространственное пересечение микропотоков от разных эмиттеров может приводить к образованию в пространстве координат распределения по углам наклона, причем значения этих углов могут быть весьма значительными по величине. Для предотвращения образования большого разброса по углам наклона, в соответствии с теоремой Лиувилля, следует «охладить» поток, расширив в пространстве координат, а затем свести его с помощью иммерсионных линз образованием кроссовера. На основе расчетов было найдено распределение потенциала на оси потока (рис. 4), обеспечивающее требуемое формирование потока. Были определены конфигурации электродов электронной пушки с одним, семью и девятнадцатью автоэмиттерами в широком интервале токов от 8 до 200 миллиампер при напряжениях на сетке в пределах 2-5 кВ и потенциалах на аноде от 8 до 30 кВ.

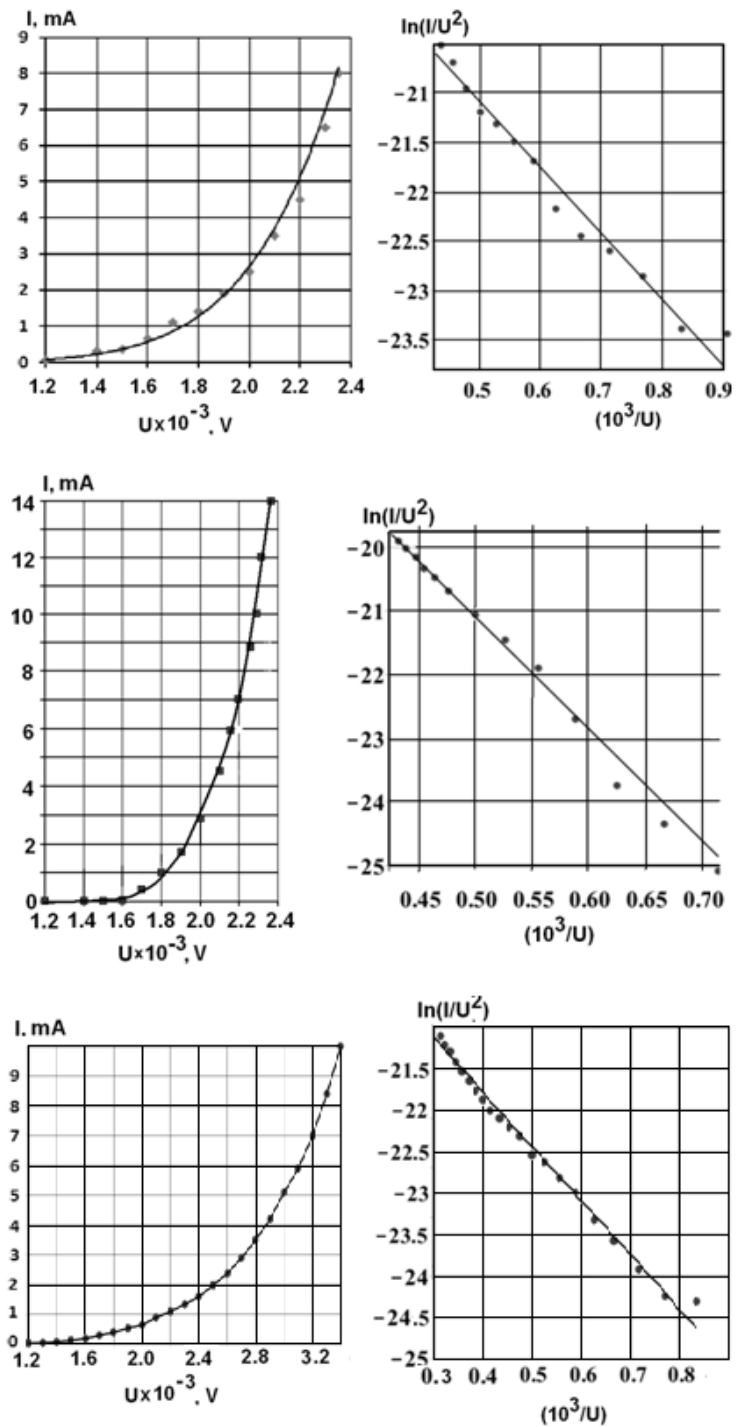


Рис. 3. Экспериментальные ВАХ в координатах I, U и Фаулера-Нордгейма для ячеек с эмиттерами №1 (а,б), №2 (в,г) и №3 (д,е)

В качестве примера на рис. 5-6 приведены конфигурации электродов электронной пушки и транспортировка электронного потока в пролетном канале в однородном магнитном поле (с одним эмиттером) и в поле МПФС (с семью эмиттерами).

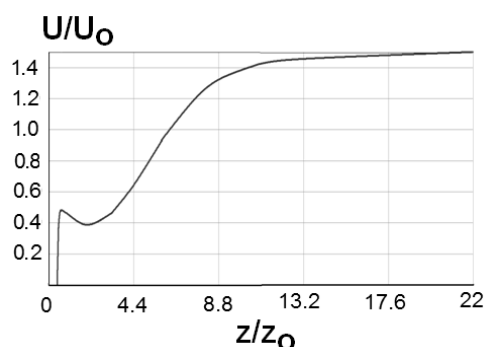


Рис. 4. Распределение потенциала на оси электронной пушки с автоэмиттерами

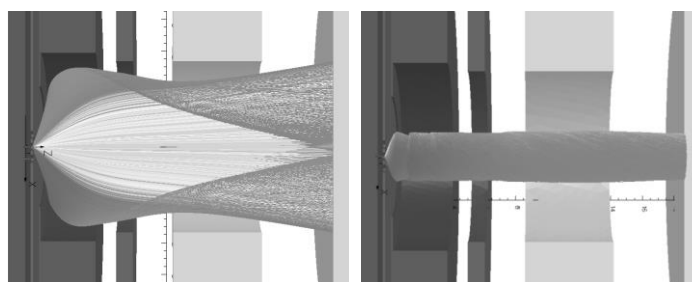


Рис. 5. Электронная пушка и транспортировка электронного потока в пролетном канале диаметром 8.0 мм в однородном магнитном поле. $I=30$ мА, $U_k=U_{\phi 1}=0$, $U_{\phi}=5$ кВ, $U_a=30$ кВ, $B_k=B_0=3000$ Гс

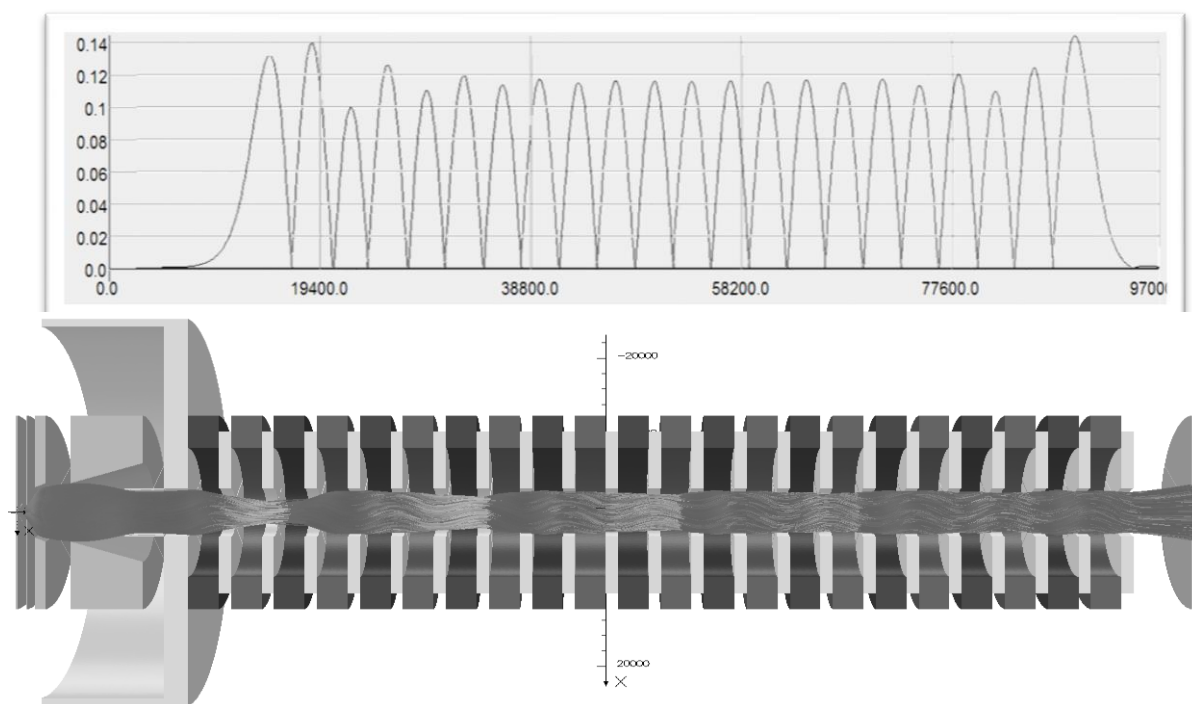


Рис. 6. Распределение магнитного поля в МПФС и транспортировка электронного потока в пролетном канале диаметром 8.0 мм, $I=49$ мА, $U_a=20$ кВ, $B_A=0,14$ Тл, период $L=7.0$ мм

Библиографический список

1. Егоров Н.В., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. М.: ИД "Интеллект", 2011.
2. Григорьев Ю.А., Рехен Г.А., Семенов В.К., Шестеркин В.И. // РЭ. 1995. Вып.40. №7. С. 1127.
3. Spindt С.А. // J of Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 6. Р. 3504.
4. Григорьев Ю. А., Васильковский С. В., Шестеркин В. И., Ярцева З. А. Способ изготовления топологии преимущественно многоострийного катода А.С. 1738013. (СССР). МКИ Н 01 J 1/30. / (Россия). № 4811937/24 – 21. Заявл. 09.04.1990. Опубл. 12.02.1993.
5. Морев С. П. , Абаньшин Н. П. , Горфинкель Б. И. // РЭ. 2013. Т. 58. № 4. С. 399.