

## Субмикронный источник свободных электронов

© Г.М. Гусинский, Л.А. Баранова, В.О. Найденев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: naidenov@cycla.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 26 августа 2014 г.)

Использован оригинальный способ изготовления многоострижных микрокатодов, в основе которого лежит трековая мембранная технология. Достигнуты воспроизводимые геометрические параметры микрокатодов с диаметрами острий 20–40 nm. Режим автоэлектронной эмиссии возникает при таких диаметрах катода при разности потенциалов 100–300 V. В диодном и триодном вариантах применения таких структур возможно достичь быстродействия  $\sim 10^{12}$  s. В экспериментальных образцах плотность острий составляла  $\sim 10^6$  /cm<sup>2</sup>, что по расчетам может обеспечить технически значимые токи автоэмиссии. Предложенная технология создания многоострижных микрокатодов достаточно проста, что позволило в лабораторных условиях получить образцы площадью десятки квадратных сантиметров. По такой же технологии на специальном оборудовании можно производить сотни квадратных метров многоострижных эмиттеров.

### Введение

Современные технологии позволяют довести размеры элементов твердотельной электроники до наноразмерных величин. Основное требование, которому во многих случаях не могут удовлетворять твердотельные приборы, является их ограниченное быстродействие, характеризующееся длительностью переключения  $p$ – $n$ -перехода, которая в лучших образцах достигает  $10^{-10}$ – $10^{-11}$  s. Чувствительность к корпускулярному облучению и  $\gamma$ -радиации также ограничивает их повсеместное использование. Указанные недостатки твердотельных приборов могут быть преодолены с помощью вакуумной микроэлектроники. В ряде случаев основу таких приборов могут составить катоды с автоэлектронной эмиссией.

Автоэлектронная эмиссия обладает рядом полезных особенностей: возможность достижения высокой плотности токов (до  $10^6$  A/cm<sup>2</sup>), создание при нанометровых размерах эмиттирующих систем с быстродействием  $\sim 10^{-12}$ – $10^{-13}$  s, относительная дешевизна технологических процессов. Широкое использование автоэмиссии в различных областях науки и производства требует создания электрических полей с напряженностью  $E \approx 10^9$  V/m для получения технически значимых токов автоэмиссии.

Как следует из работы [1], в случае малых межэлектродных расстояний необходимые напряженности электрического поля вблизи острий могут быть получены при сравнительно небольших межэлектродных потенциалах: при диаметре острия  $\sim 35$  nm, межэлектродном расстоянии  $\sim 1.5$   $\mu$ m, разности потенциалов на электродах 250 V напряженность поля у вершины иглы эмиттера достигает значения  $E \approx 6 \cdot 10^9$  V/m.

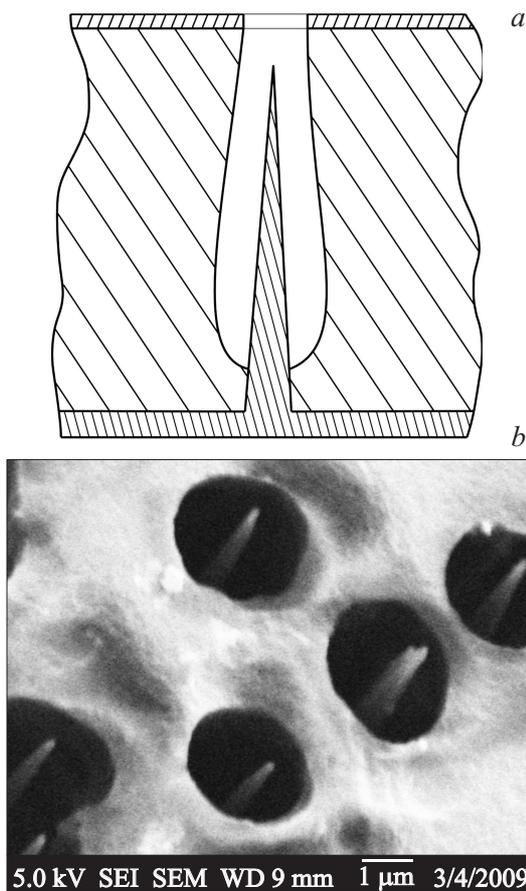
Создание автоэмиссионных источников субмикронных размеров оказалось возможным на основе использования трековой технологии [2]. К настоящему времени

опубликовано несколько патентов, касающихся способов изготовления многоострижных микрокатодов с использованием трековых технологий (см., в частности, [3]). Все известные по патентной литературе способы их изготовления характеризуются сложной технологией, в которой за редким исключением используют электрохимический процесс заострения эмиттеров до размеров, лежащих в нанометровом диапазоне. Создание качественных острий с такими размерами носит случайный характер и мало вероятно, что эмиссионные параметры в различных областях таких многоострижных катодов будут достаточно идентичны.

### Технология изготовления многоострижных микрокатодов

В настоящей работе использован принципиально отличающийся способ изготовления эмиттеров, в котором протравленный латентный трек полностью определяет форму и геометрические параметры эмиттера. Идея такого подхода изложена в работе одного из авторов данной статьи [4]. Лавсановую пленку толщиной  $\sim 10$   $\mu$ m облучают ионами аргона с энергией 53 MeV. Плотность облучения составляет  $10^6$  cm<sup>-2</sup>. В результате последующего ультрафиолетового облучения и травления в щелочи (KOH, 3.5 N) при температуре 72°C в пленке формируются протравленные конусные треки длиной  $8.0 \pm 0.2$   $\mu$ m. Эти треки заполняют никелем по стандартной методике металлизации диэлектриков [5].

Для подачи отрицательного потенциала на образовавшиеся микроиглы со стороны их оснований также высаживают никель на всю поверхность лавсановой пленки. Затем щелочью (KOH, 6 N) проводят травление оставшейся области латентного трека для образования отверстий диаметром  $\sim 0.7$   $\mu$ m над микроиглами.



**Рис. 1.** Конфигурация микрокатода (а) и реальное изображение участка многоострийного эмиссионного катода (b).

При этом происходит уменьшение толщины пленки за счет травли поверхности, а также усиленное травление лавсана вдоль поверхности микроэмиттеров из-за большой разности электродных потенциалов никеля и катиона щелочи ( $K^+$ ). Обычно при вакууме  $\sim 6.5 \cdot 10^{-3}$  Pa образцы выдерживают межэлектродные потенциалы до 300 V.

Указанный способ позволяет реализовать оптимальное расстояние ( $\pm 1.5 \mu m$ ) от острий микроиглол до поверхности пленки, образовавшейся в результате травления. Анодный электрод может быть создан путем напыления металла на поверхность лавсановой пленки со стороны вершин микроэмиттеров.

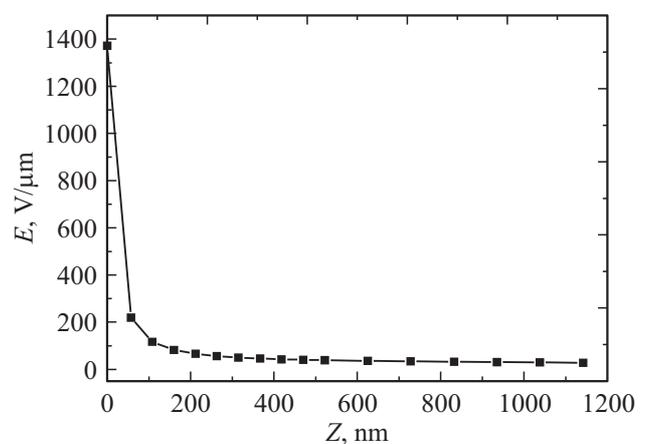
На рис. 1 показаны структуры, полученные по описанной выше технологии. В лучших образцах радиусы вершины острий достигают значений 10–20 nm. Следует подчеркнуть, что разработанная методика изготовления многоострийных катодов значительно проще и доступнее, предлагаемых в других работах. Геометрия острий и межэлектродные размеры обоснованы расчетами необходимых значений напряженности электрического поля [1].

## Компьютерное моделирование микрокатодов

Компьютерное моделирование автоэмиссионных источников субмикронных размеров было проведено с целью исследования зависимости распределения поля от геометрических параметров устройства. Моделирование осуществлялось с помощью программы CRO3D, позволяющей рассчитывать распределение потенциала и напряженности поля, а также траектории заряженных частиц в произвольной электростатической системе. Для повышения точности расчетов моделировался только один микроэмиттер, окружающие острия были заменены сплошным цилиндром с длиной, равной длине отдельного острия, диаметр цилиндра варьировал в пределах от 2 до  $10 \mu m$ . Согласно выражению, приведенному в работе [6], для ансамбля микроэмиттеров с равными длинами и плотностью числа игл  $10^6 \text{ cm}^{-2}$  ослабление напряженности  $E$  по сравнению с одиночным эмиттером пренебрежимо мало.

Расчетные зависимости распределения напряженности электрического поля от расстояния до вершины острия в осевом направлении показаны на рис. 2.

Расчет проведен для разности потенциалов между катодом и анодом  $V = 100 \text{ V}$ , радиус острия принят равным 20 nm, расстояние между вершиной микрокатода и анодом составляет  $1.5 \mu m$ . Значение напряженности вблизи вершины эмиттера равно  $E = 1.4 \cdot 10^9 \text{ V/m}$ . Значения  $E = 6 \cdot 10^9 \text{ V/m}$  можно достичь при разности межэлектродных потенциалов 250 V. Тогда в соответствии с формулой Фаулера–Нордгейма теоретическое значение плотности тока эмиссии  $j$  из никелевых острий (работа выхода  $\phi$  для Ni составляет 4.5 eV) составляет  $\sim 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ . При этом значении  $j$  токовая нагрузка на отдельную эмиттирующую иглу составила бы  $\sim 1 \text{ A}$ . В качестве примера на рис. 3 приведена эксперимен-



**Рис. 2.** Расчетные зависимости напряженности электрического поля от расстояния до вершины катода в осевом направлении. Радиус острия катода равен 20 nm, разность потенциалов между катодом и анодом составляет  $V_{\text{max}} = 100 \text{ V}$ .

тально измеренная плотность тока в зависимости от напряжения в диодном режиме.

Из рис. 3 видно, что реальный ток эмиссии на несколько порядков ниже расчетного. Можно выделить две основные причины наблюдаемого результата. Одной из причин уменьшения тока эмиссии микрокатода является уменьшение напряженности поля из-за заряда электронов, осевших на диэлектрик вблизи анода. Этот эффект может быть исключен путем значительного расширения канала в лавсане вблизи анода. В целях определения величины этого эффекта была численно исследована зависимость напряженности электрического поля на острие эмиттера от диаметра канала в диэлектрике. На

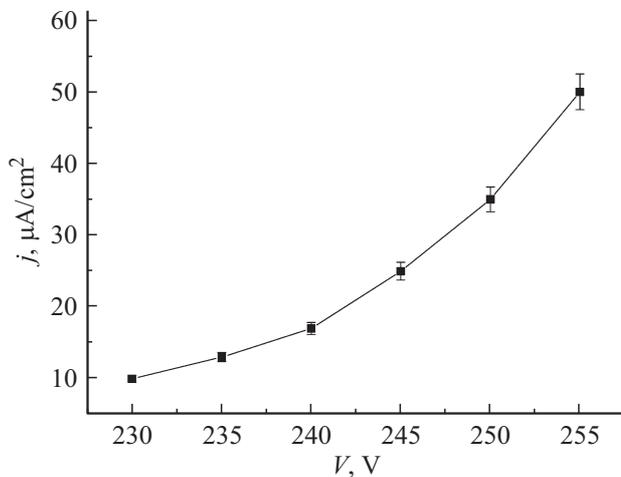


Рис. 3. Экспериментально измеренная зависимость плотности тока от напряжения в диодном режиме.

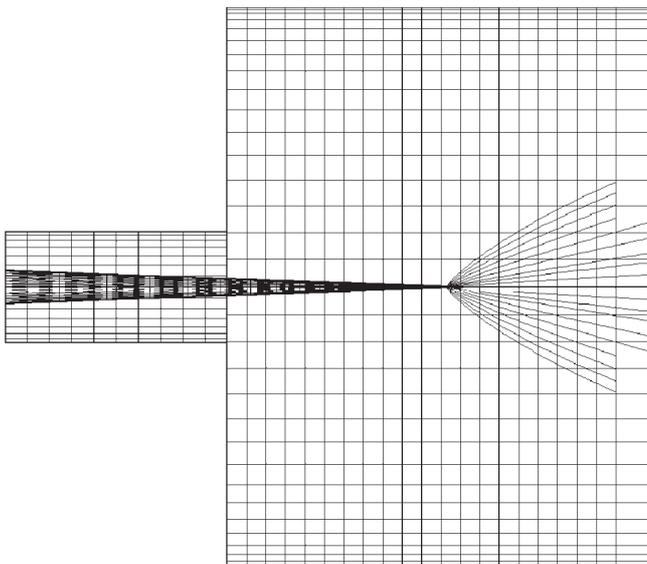


Рис. 4. Сечение автоэмиссионного источника, смоделированное программой CPO3D, и траектории электронов.

Напряженность электрического поля  $E_z$  на острие микрокатода при различных геометрических параметрах системы

Длина первого цилиндра	Длина второго цилиндра	Радиус первого цилиндра	Радиус второго цилиндра	Напряженность поля на острие $E_z$ , $V/\mu m$
$\mu m$				
4	1.5	5	5	$1.37 \cdot 10^3$
4	1.5	1	1	$0.51 \cdot 10^3$
4	1.5	1	2	$0.65 \cdot 10^3$
4	1.5	1	3	$0.70 \cdot 10^3$
4	1.5	1	5	$0.72 \cdot 10^3$
3	2.5	1	5	$1.06 \cdot 10^3$
2	3.5	1	5	$1.33 \cdot 10^3$

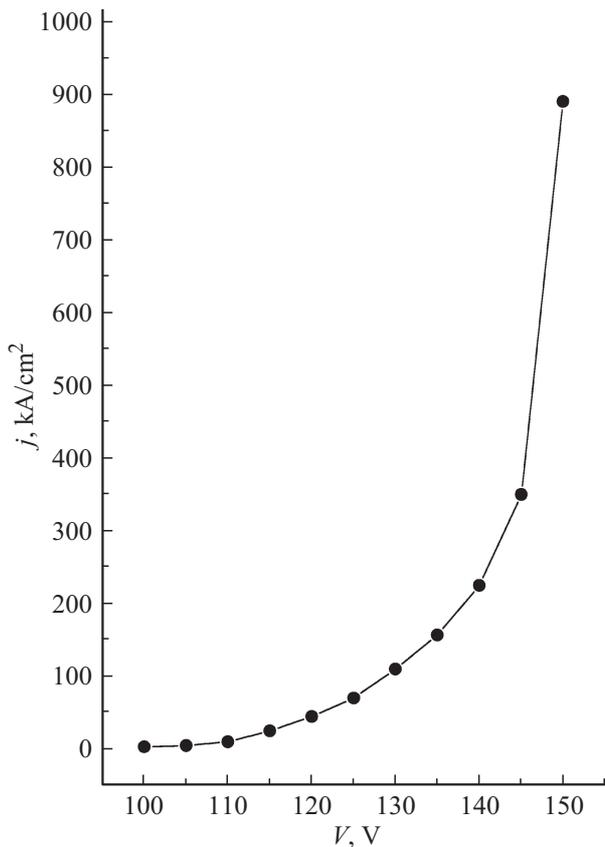
рис. 4 дано схематическое изображение исследуемой системы в том виде, как его представляет на экране компьютера программа CPO3D. Сетка показывает сегменты, на которые программа разделяет электроды. Катод и пространство между катодом и анодом окружены двумя цилиндрами, которые замыкают пространство от основания катода до анодной пластины. Длины и радиусы цилиндров варьировали в ходе расчета. Ближайший к катоду цилиндр находится под потенциалом катода, на втором цилиндре потенциал меняется линейно от потенциала катода до потенциала анода. Результаты расчета представлены в таблице.

Из приведенных в таблице данных следует, что в пределах изменения радиуса отверстия вблизи вершины иглы от 1 до  $5 \mu m$  напряженность поля меняется от  $0.51 \cdot 10^3$  до  $1.37 \cdot 10^3 V/\mu m$ . Такое изменение напряженности поля приводит к варибельности тока эмиссии на несколько порядков величины.

Другой возможной причиной уменьшения эмиссии может быть исследованное нами загрязнение материала игл в процессе химической высадки и травления лавсановой пленки, приводящее к существенному увеличению работы выхода. Так, согласно [7], работа выхода никеля, покрытого пленкой кислорода, составляет 6.34 eV.

Оба эти фактора должны быть учтены при отработке окончательного процесса изготовления многоострижных микроэммиттеров. Ограничение эмиссионных токов до значений, обеспечивающих сохранность образцов, легко регулируется величиной приложенного напряжения.

Острижные эммиттеры могут служить точечными источниками электронов в лучевых диагностических приборах высокого пространственного разрешения. На основе острижных эммиттеров могут быть созданы триодные микросистемы с большой крутизной и временем срабатывания  $\sim 10^{-12}$  с. В качестве примера на рис. 5 представлены расчетные значения плотности тока при указанных на рисунке параметрах.



**Рис. 5.** Расчетные значения плотности тока в зависимости от потенциала управляющего электрода при следующих параметрах: потенциал катода — 0 В, потенциал анода — 100 В, расстояние между катодом и анодом —  $2\ \mu\text{m}$ , расстояние между катодом и управляющей сеткой —  $0.2\ \mu\text{m}$ , диаметр острия катода — 40 нм, диаметр отверстия управляющего электрода —  $0.5\ \mu\text{m}$ .

## Заключение

Анализ различных методов создания микроэмиттеров показал, что предложенный авторами настоящей работы процесс их изготовления является наиболее эффективным, дешевым и технологически доступным методом среди известных из патентной литературы. Область использования таких систем чрезвычайно широка. Подобные диодные и триодные микроэмиттеры могут служить активными элементами при создании вакуумных интегральных схем, при создании дисплеев, матриц ЭВМ, при создании генераторов ВЧ-колебаний в субмиллиметровом диапазоне. Массивы микроигл могут быть использованы для получения коронного разряда в электрических фильтрах очистки газов.

## Список литературы

- [1] Баранова Л.А., Гусинский Г.М. // Прикладная физика. 2008. Т. 2. С. 79–82.
- [2] Гусинский Г.М., Барышев С.В., Нащекин А.В., Саксеев Д.А., Найденов В.О., Конников С.Г. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 14. С. 84–88.
- [3] Патенты US № 5607335 (04.03.1997), US № 5562516 (08.10.1996), EP № 0945885 (29.09.1999).
- [4] Патент РФ №2413328. Способ изготовления многоострийного эмиссионного катода. Г.М. Гусинский. 27.02.2011.
- [5] Baranova L.A., Baryshev S.V., Gusinskiy G.M., Konnikov S.G., Nashchekin A.V. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B. 2010. Vol. 268. P. 1686–1688.
- [6] Бугаев С.П. и др. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 88.
- [7] Герман Г., Вагнер С. Оксидный катод. М.: Гостехиздат, 1949. С. 134.