

**Давидович М.В.<sup>1,2</sup>, Бушуев Н.А.<sup>1,3</sup>, Яфаров Р.К.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский филиал института радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова

<sup>3</sup>ОАО «НПП «Алмаз»

## **Автоэмиссионная электронно-оптическая система с ленточным пучком для ЛБВ терагерцевого диапазона**

*В работе предложена и рассчитана конструкция автоэлектронной пушки с ленточным электронным пучком и электронно-оптическая система (ЭОС) на ее основе для терагерцевой лампы бегущей волны (ЛБВ) с большим током. Тонкая широкая и длинная пластина катода, лежащая в плоскости пучка, эмитирует перпендикулярно ей в обе стороны, а затем пучок поворачивается на 90 градусов и становится плоским. Рассмотрена электрическая фокусировка в виде электростатических экранов и возможность магнитной фокусировки. Эмиссия идет из наноразмерной пленки из алмазо-графитовых кластеров, напыленных на поверхность катода, на которые нанесена вытягивающая сетка. Аналитический и численный расчет показывает возможность поворота и образования ленточного пучка.*

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны; электронно-оптическая система; электронный пучок; магнитная фокусирующая система; терагерцевая микроэлектроника.

В последнее время имеется ряд программ развития терагерцевой микроэлектроники и наноэлектроники, а также большое число коллективов, занимающихся этой проблемой. Одной из основных проблем в этой области является создание источников и усилителей терагерцевых частот (ТГЧ). Среди них приоритетными являются лампы бегущей волны (ЛБВ). Для их создания нужны сильноточные электронные пучки с малым поперечным размером порядка микрон. Для получения приемлемой мощности пучок должен быть широким, т.е. ленточным и релятивистским. В силу малых размеров всей ЭОС и пушки в частности желательно использовать автоэлектронную эмиссию. Она также принципиально позволяет получать весьма высокие плотности тока и интегральные значения тока ЭОС. Известные автоэмиссионные структуры острейного и лезвийного типов [1–4] не позволяют реализовать перечисленные требования. В острейных автокатадах эмиссия идет в основном с острий, разогрев которых приводит к взрывной эмиссии и не позволяет получать большие интегральные значения тока и долговечные катоды. Матричные автокатады создают большой разброс электронов по углам и не позволяют получать широкие и тонкие ленточные пучки. Лезвийные автокатады не позволяют получать большие токи.

В настоящей работе предложено использовать углеродные структуры, которые демонстрируют увеличение эмиссии на 2-3 порядка [3] по сравнению с традиционной теорией Фаулера-Нордгейма, хорошо работающей для металлов. Экспериментально исследованы различные такие структуры: фулерены, нанотрубки, графеновые чешуйки,

стеклоуглерод, алмазные и графитовые кластеры, структуры из графенов и нанотрубок [1–5]. Повышенная полевая эмиссия наблюдается во всех аллотропных модификациях углерода, что делает их весьма перспективными для создания сильноточных источников электронных пучков. В работах [1, 3] показано, что повышенная эмиссия не связана с усилением поля и с острым эффектом, что позволяет получать токоотбор практически со всей поверхности эмиттера без существенного разогрева каких-либо ее элементов и без образования взрывной эмиссии. Это позволяет увеличить интегральный ток и долговечность автокатодов при меньших напряжениях. Оценки по формуле Фаулера-Нордгейма для таких структур дают физически неоправданные значения работы выхода (РВ) порядка 0.01 – 0.1 эВ, что явно не соответствует квантовомеханическим расчетам и экспериментам для углерода в виде графита (4.6 – 5 эВ) и других его структур типа фуллеренов, нанотрубок, графена, РВ которых имеет такой же порядок [3]. Соответственно при нахождении таких структур на поверхности графита РВ не должна существенно изменяться, но это не так. Увеличение эмиссии, которой формально соответствует понижение работы выхода (РВ) до порядков долей эВ, до сих пор строго не объяснено. Обзор возможных теорий дан в [5], где также предложена теория проникновения поля в полупроводниковый материал соответствующей углеродной фазы эмиттера. В работе [3] указанный эффект объяснен резонансным туннелированием в результате размерного квантования при образовании уровней размерного квантования, совпадающих с уровнем Ферми. В работах [6–12] применен классический подход на основе многократных электрических изображений и вычисления профиля барьера, а этот эффект объяснен на основе размерного эффекта уменьшения толщины потенциального барьера примерно на толщину пленки, а также и его высоты. Пленка из аллотропных модификаций углерода имеет диэлектрическую проницаемость (ДП) порядка 16, что существенно уменьшает силы изображений при выходе в нее электронов из металла. На рассматриваемых структурах экспериментально получена плотность тока порядка 1000 А/см<sup>2</sup>.

В работах [8–12] предложена конструкция катода рис. 1, пушки рис. 2 и ЭОС с поворотом траекторий электронов на 90 градусов и с образование тонкого ленточного пучка. Электроны со всей двусторонней поверхности катода эмитируют в основном со скоростью Ферми нормально к поверхности под действием поля тянущей сетки с потенциалом  $U_g \sim 20$  В относительно катода. При этом в силу наноразмерных масштабов образуется узкий наноразмерный потенциальный барьер, существенно меньший, чем в случае непокрытого пленкой катода. Во всем другом пространстве ЭОС поля как минимум на порядок меньше. Электроны отражаются фокусирующим экраном и поворачиваются под действие поля анода. Предполагается использование релятивисткой ЛБВ, поэтому потенциал анода порядка 20 кВ. Потенциал на экране порядка –3 В относительно катода.

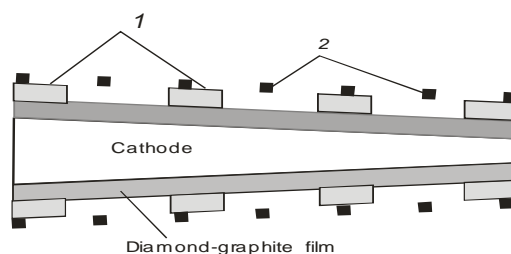


Рис. 1. Эмитирующая структура: катод – алмазографитовая пленка – сетка (2). 1 – крепление, SiO<sub>2</sub>

Эмитирующая структура рис. 1 представляет собой проводящий катод, полупроводниковая наноразмерная пленка из алмазо-графитовых кластеров,

диэлектрическую структуру (1) с закрепленной на ней для проводящей сеткой. Принципиально сетка может быть и сплошной, если ее толщина существенно меньше длины свободного пробега. Находящаяся под постоянным потенциалом сетка формирует сложный потенциальный барьер. Для улучшения эмиссии в качестве сетки можно выполнять несколько периодов проводящих и диэлектрических слоев [2]. В такой структуре имеет место резонансное туннелирование. Вольт-амперные характеристики таких структур с учетом распределения электронов по энергии, когда сверху имеется плоский анод, приведены в [2, 7–11]. Профиль барьера в этом случае получается из решения уравнения Пуассона для точечного заряда [2]. В данном случае анод находится справа, поэтому траектории электронов надо повернуть рис. 2. Расчет тока в такой пушке сложный: необходимо для каждой траектории вычислить форму своего барьера, вычислить коэффициент туннелирования, усреднить результаты по энергиям, а затем найти ток от всех траекторий. Поскольку самая крутая область барьера для всех траекторий одинаковая, электроны покидают сетку почти нормально примерно со скоростью Ферми  $v_F$ , можно задать плотность и скорость вылетающих частиц одинаковой и считать катод с сеткой плоским (рис. 1). Считаем катод и сетку плоскими и находящимися под нулевым потенциалом. Вылетающие электроны движутся нормально по закону  $x(t)=v_F t - g t^2/2$ . Здесь  $g=meU_f/X(z)$  – замедление электрона экраном,  $U_f$  – потенциал экрана (примерно – 3 В относительно сетки),  $X(z)$  – профиль экрана. За время  $t=2v_F/g$  электрон возвращается в плоскость катода. За это же время он должен быть вытянут полем анода из точки  $z$  за точку  $z_0$ , (границу катода). Предположим, что время вылета электрона из точки  $z$  в точку  $z_0$  дается формулой  $t=t_0(\exp(-\alpha(z_0-z)))$ . Дифференцируя, получаем скорость в точке  $z$ :  $v=1/t_0 \alpha \cdot dz/dt$ . Имеем скорости вылета  $v(z_0)=0$ ,  $v(0)=[1-\exp(-\alpha z_0)]/at_0$ . Интегрирование дает среднюю скорость вылета. Дифференцируя еще раз, получаем ускорение и определяем  $E_z(z)$ . Это усредненное по  $x$  продольное электрическое поле. Оно получается экспоненциально затухающим. Записывая уравнение движения вдоль оси  $z$ , интегрируя его и приравнявая время вылета времени попадания на катод, получаем закон изменения формы экрана  $X(z)$ . Он тоже экспоненциальный. Теперь можно записать точное уравнение движения. Его решение приводит к представлению времени вылета интегралом, в знаменателе которого стоит затухающая экспонента. Если она мала, то получаем исходное аналитическое уравнение для времени вылета. Численные расчеты были проведены по программе 3D моделирования методом крупных частиц с учетом пространственного заряда. Результаты расчета хорошо совпали с аналитической моделью и показали формирование тонкого ленточного пучка.

Для фокусировки в области электронной пушки магнитные фокусирующие системы (МФС) можно не использовать. Однако поскольку МФС используется все равно в области прохождения пучка, имеет смысл использовать магнитную фокусировку. Особенно для сильноточных пучков, если необходимо компенсировать расхождение пучка из-за пространственного заряда. МФС можно использовать на всем катоде или выходной его части. В ТГц электронике наиболее перспективны МФС на постоянных редкоземельных магнитах. Конструктивно целесообразнее применять МФС без реверса. В этом случае МФС на катоде и в области кроссовера и на замедляющей системе (ЗС) все же удобно инвертировать. В области катода МФС может быть, как дипольной, так и квадрупольной. В случае магнитной фокусировки удобнее катод и сетку выполнить в виде небольшого конуса рис. 1. Оптимизация на основе 3D модели не реальна из-за большого времени счета. Для широких гребенчатых ЗС и широких ленточных пучков можно использовать 2D модель, в которой отсутствует зависимость от  $y$ . В этом случае удобно использовать метод вспомогательных источников. Он предполагает, что потенциал задается логарифмическим потенциалом  $U_i=-(2\pi\epsilon_0)^{-1}q_i \ln(r_i)$  заряженных бесконечно длинных по оси  $y$  нитей с

плотностью линейного заряда  $q_i$ . Здесь  $r_i = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|$  – двумерное расстояние. Потенциал складывается из потенциала всех нитей рис. 3. Граничные условия наложим на границе в точках, ближайших к двум соседним нитям. Получим неоднородную систему линейных алгебраических уравнений для определения погонных зарядов. Решив ее, найдем потенциал и электрическое поле. Далее решаем уравнения движения и смотрим на токопрохождение. Целевую функцию строим из критерия максимального токопрохождения. Минимизацию целевой функции осуществляем движением координат нитей. Получаемая система имеет размерность порядка 100 (с учетом симметрии). Двигать необходимо координаты нескольких нитей, соответствующих фокусирующему электроду.

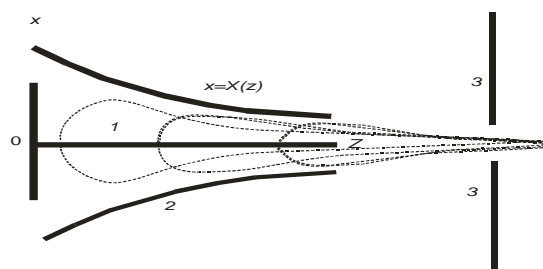


Рис. 2. Электронная пушка: 1 – автокатод с сеткой, 2 – фокусирующий экран, 3 – анод.

Схематично приведены траектории электронов

В силу зеркальной симметрии системы относительно плоскости  $z=0$  число уравнений невелико. Система рис. 2 является тестовой. Реально конструкция должна представлять собой что-то подобное рис. 3. Может быть два анода (первый анод или ускоряющий электрод и второй анод). Область ЗС и коллектора оптимизации не подлежат. Изменять следует координаты ближайших к пучку нитей.

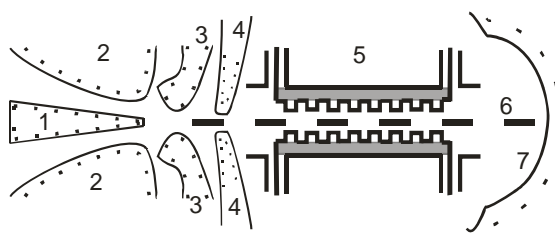


Рис. 3. ЭОС: катод с сеткой (1), фокусирующий электрод (2), первый анод (3), анод (4), ЗС (5), пучок (6), коллектор (7)

МФС представляет собой прямоугольные магниты из редкоземельных материалов и полюсные наконечники. Рассчитывался прибор на диапазон 220 ГГц. Размеры образующих рабочий зазор поверхностей полюсных наконечников магнитопроводов составляют  $5 \times 8$  мм<sup>2</sup> при размерах их внешних поверхностей  $15 \times 22$  мм<sup>2</sup>. Магнитная индукция получалась в пределах от 0.92 Тл до 1.2 Тл. Решение задачи осуществлялось численным методом путем решения уравнений движения с учетом пространственного заряда в однородном осевом магнитном поле, а также на основе полуаналитического подхода. Результаты практически совпали. Для аналитического подхода использовалось решение уравнения Пуассона в прямоугольной области методом рядов [13]. Область была взята в виде прямоугольника, в которую на входе был помещен прямоугольный пучок с постоянной продольной скоростью [2]. Зазор между экраном и пучком был порядка 10 %. В приближенном подходе решалось уравнение движения для поперечных траекторий ведущих центров вращающихся в поле электронов, описывающих сложные движения по контуру пучка и по

конгруэнтным ему контурам. Движение по таким винтовым циклоидам приводит к расширению пучка, но не более, чем циклотронный радиус. Результат приведен на рис. 4.



Рис. 4. Фокусировка прямоугольного пучка: изменение сечения ленточного пучка при  $B=0.5$  Тл на выходе ЗС. Пунктир – форма пучка на входе

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект №16-19-10033 и Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания № 3.1155.2014/К.

#### Библиографический список

1. G.N. Furse. Field emission in vacuum micro-electronics, Kluwer Academic Plenum Publishers, N.Y.: Springer, 2005, 205 p.
2. Ю.В. Алехин, М.П. Апин, А.А. Бурцев, Н.А. Бушуев, О.В. Воронков, Ю.А. Григорьев, М.В. Давидович, А.Б. Данилов, В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.П. Кудряшов, П.П. Куцько, В.П. Мещанов, И.Г. Насенков, А.Д., Рафалович В.И. Роговин, А.Г. Рожнев, В.И. Шестеркин. Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследование в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах. Внедрение в производство / Под ред. Н.А. Бушуева. М.: Радиотехника, 2016, 480 с.
3. Г.Н. Фурсей, М.А. Поляков, А.А. Кантонистов, А.М. Яфясов, Б.С. Павлов, В.Б. Божевольнов. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур. ЖТФ, т. 83, вып. 6, 2013. – С. 71-77.
4. М.В. Давидович, Р. К. Яфаров. Управление напряжением эмиссии многоострижных автоэмиссионных катодов. Труды Международной научно-технической конференции и молодежной школы-семинара Нанотехнологии-2010. Дивноморское, Россия, сентябрь 2010. Таганрог, изд-во Технологического ин-та ЮФУ, т.1, 2010. – С. 52-54,
5. R.G. Forbes, J.P. Xanthakis. Field penetration into amorphous-carbon films: consequences for field-induced electron emission. Surf. Interface Anal., vol. 39, 2007. – P. 139-145.
6. М.В. Давидович, Р. К. Яфаров, Д. М. Доронин. Туннелирование электронов при наличии диэлектрической пленки на катоде. Труды 20-й Международной Крымской конференций СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiKo'2010). Севастополь, сентябрь 2010. – С. 733-734.
7. M.V. Davidovich, N.A. Bushuev. Field Emission in Diode and Triode Vacuum Nanostructures. 2014 Tenth International Vacuum electron Sources Conference and Second International Conference on Emission Electronics. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University, June 2014. – P. 58-59.
8. M.V. Davidovich, N.A. Bushuev, R.K. Yafarov. Tunnel Current in the Presence of Nanosized Film at the Cathode. 2014 Tenth International Vacuum electron Sources Conference and Second International Conference on Emission Electronics. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University, June 2014. – P. 67-68.
9. М.В. Давидович, Н.А. Бушуев. “Автоэмиссионная электронная пушка с широким и тонким ленточным пучком”. Электроника и микроэлектроника СВЧ. 4-я Всероссийская конференция. Санкт-Петербург, июнь 2015. СПбГЭТУ, т. 1, 2015. – С. 245-249.
10. M.V. Davidovich, N.A. Bushuev. “The field emission electron gun with wide and thin ribbon beam”. 2015 25th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2015), Sevastopol, September 2015. – P. 145-14.
11. М.В. Давидович, Н.А. Бушуев, Р.К.Яфаров. “Автоэмиссионная структура с большим током ленточного пучка и поворотом траекторий”. Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной н-т конф. АПЭП'2016, сентябрь 2016. СГТУ, т. 1, 2016. – С. 36-39.
12. М.В. Давидович, Н.А. Бушуев, Р.К.Яфаров. “Автоэмиссионные углеродные структуры с большим током для ТГц электроники”. Материалы 26-й Международной н-т конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2016).. Севастополь: Вебер, сентябрь 2016. – С. 309-315.
13. М.В. Давидович. “Решение трехмерного уравнения Пуассона для цилиндрического магнетрона”. Радиотехника и электроника, т. 31, № 11, 1986. – С. 2224-2232.