

Автоэмиссионная электронная пушка с широким и тонким ленточным пучком

Представлены оценочные результаты возможности создания автоэмиссионной электронной пушки для субмиллиметровых и терагерцовых ЛБВ и других вакуумных приборов с ленточным электронным пучком с большим током. Приведены оценочные характеристики тока пучка на единицу его ширины и оценочные результаты для проектирования формы электродов, обеспечивающих оптимальное прохождение пучка через канал. Расчет вольт-амперных характеристик подразумевает решение электростатической задачи, получение траекторий электронов, вылетевших с поверхности сетки, решение задач туннелирования электронов вдоль каждой траектории катод-сетка-коллектор, усреднение по траекториям и энергиям электронов на катоде.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, электронная пушка, ЛБВ, ленточный электронный пучок

Разработка миллиметровых и терагерцовых ЛБВ требует выполнения следующих задач: получение больших токов в пучке при малом размере пролетного канала, использование достаточно высоких анодных напряжений порядка 20 КВ и более, достаточную широкополосность ЗС, обладающую небольшим коэффициентом замедления n порядка 4 и менее. Использование широкополосных спиральной замедляющей системы (ЗС) для этих целей невозможно, поэтому целесообразно рассматривать другие ЗС, обладающие достаточной широкополосностью. Среди них перспективна ЗС типа “гребенки на подложке” [1] рис. 1. При этом для их производства обычно используют МЭМС-технологии. Замедление в такой симметричной ЗС в виде расположенных на подложках гребенок примерно наполовину обусловлено подложкой и слабо изменяется с частотой, а высота гребней (по сравнению с цельнометаллической гребенкой) меньше. Такая ЗС обладает большой шириной полосы при малой высоте канала, что увеличивает ток пучка. Основной задачей при создании терагерцовой ЛБВ является получение широкого и тонкого ленточного электронного пучка с энергией порядка 20 эВ и большим током. Для создания широкого ленточного пучка предлагается использовать широкий клиновидный автокатод, расположенный продольно так, что эмитирующая поверхность почти параллельна электронному пучку рис. 1, 2.

Конструкция имеет плоскость симметрии, при этом угол клина автокатаода мал, а эмиссия происходит почти перпендикулярно поверхности с почти постоянной скоростью (скоростью Ферми v_F). Катод имеет сетку, поверхность которой по конфигурации конгруэнтна его поверхности рис. 2 (на рис. 1 изображена именно поверхность сетки). Считая, что с этой поверхности электроны вылетают почти нормально со скоростью Ферми, легко решить релятивистские уравнения движения с указанными начальными условиями и построить траектории. Сам катод может быть выполнен в виде матричного катода Спиндта с сеткой, или в виде напыления на стеклянную, стеклографитовую или графитовую основу наноалмазной фазы толщины от нескольких до одного-двух десятков нанометров с последующим нанесением на нее тонкой металлической сетки. Вторая конструкция, по-

видимому, более эффективна, т.к. в эмиссии участвует почти вся поверхность катода, напряженность поля на ней варьируется несильно, а разброс углов вылета и скоростей меньше. Это позволяет избежать сильного разогрева, снизить требуемое напряжение на сетке [2-3], а также существенно упрощает расчет пушки. Поскольку ширина потенциального барьера, при котором имеет место существенная эмиссия, не превышает 20 нм, нанесенная на катод пленка с диэлектрическими свойствами должна иметь меньшую толщину, достаточно высокую диэлектрическую проницаемость и обладать большим удельным сопротивлением. Этим условиям удовлетворяет наноалмазная пленка толщины порядка 10 нм. Эмиссия в основном обусловлена напряжением между сеткой и катодом. Поскольку толщина наноалмазной пленки и ширина барьера малы, соответствующее напряжение, обеспечивающее высокую эмиссию, не превышает сотен вольт и может иметь порядок 10–30 В. Наноалмазная пленка, обладающая свойством высокоомного полупроводника и имеющая высокую диэлектрическую проницаемость, приводит к существенному увеличению поверхностной плотности тока. Это объясняется уменьшением ширины и высоты потенциального барьера [2–3]. Такой катод изображен на рис. 2, а на рис. 3 дано АСМ изображение поверхности наноалмазной пленки (средний размер зерен – 6 нм). При толщине пленки 10 нм и зазоре между ней и сеткой 10 нм сеточное напряжение 30 В создает среднее поле чуть менее 3 В/нм, что почти в два раза выше, чем в отсутствии пленки. Пленка с диэлектрической проницаемостью ϵ порядка 10 почти полностью уменьшает поле внутри нее. Соответственно возрастает поле вакуумном зазоре. Это приводит к уменьшению ширины барьера примерно в два раза и небольшому уменьшению его высоты. Точный расчет барьера основан на строгом решении электростатической задачи [2-3]. Соответственно возрастает плотность тока: для рассмотренного случая она имеет порядок 10^6 А/м^2 . Большой продольный размер катода позволяет на порядок и более по сравнению с традиционным автокатодом с нормально расположенной эмитирующей поверхностью увеличить интегральный ток пучка, при этом работают обе поверхности клина. Подбором конфигураций фокусирующего электрода и клина можно обеспечить компрессию пучка.

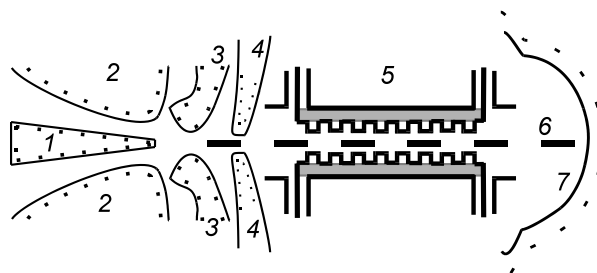


Рисунок 1. Схематическая конфигурация электродов пушки и замедляющей системы (точками обозначены координаты вспомогательных фиктивных источников – заряженных нитей)

Для начального расчета траекторий с хорошим приближением считаем, что электроны вылетают нормально к поверхности со скоростью Ферми $v_F \sim 10^6$ м/с. Для получения ленточного пучка с хорошим прохождением необходим синтез конфигураций поверхностей

фокусирующего и ускоряющего электродов, а также коллектора рис. 1. На рис. 1 изображены: 1 – катод, 2 – фокусирующий электрод, 3 – ускоряющий электрод (первый анод), 4 – второй анод, 5 – замедляющая система, 6 – ленточный электронный поток, 7 – коллектор. Можно ввести дополнительно второй фокусирующий электрод, что усложняет синтез. Наиболее простой метод расчета электростатического поля состоит в следующем. В силу симметрии расчет ведем в одной, например, верхней половине. Поскольку задача двумерная, используем метод вспомогательных (эффективных) источников в виде заряженных нитей, расположенных на поверхностях, подобных (конгруэнтных) искомым (положение нитей обозначено точками, расположенными конгруэнтно поверхностям). На нитях задаем неизвестные погонные заряды. Расстояния между соседними нитями примерно равно расстоянию от них до поверхности. В соответствующих точках задается потенциал и ищутся заряды нитей, что требует решения системы линейных алгебраических уравнений с порядком, равным числу нитей (в верхней области). Далее вычисляется электрическое поле, решаются уравнения движения и строятся траектории для серии точек вылета с катода. Для оптимизации пучка траекторий следует двигать точки расположения вспомогательных источников, т.е. производить оптимизацию поверхностей электродов. На каждом шаге оптимизации следует решать уравнения движения и определять траектории.

Для широкой ЗС удобно пренебречь зависимостью от y и использовать логарифмический потенциал. Потенциал нити с погонным линейным зарядом q_0 , расположенной в точке (x_0, z_0) , имеет вид

$$V_0(x, z) = -\frac{q_0}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2}\right). \quad (1)$$

Полный потенциал всех нитей и его электрическое поле есть:

$$V(x, z) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^N q_k \ln\left(\sqrt{(x-x_k)^2 + (z-z_k)^2}\right), \quad \mathbf{E}(x, z) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^N \frac{q_k [\mathbf{x}_0(x-x_k) + \mathbf{z}_0(z-z_k)]}{\left(\sqrt{(x-x_k)^2 + (z-z_k)^2}\right)^3}. \quad (2)$$

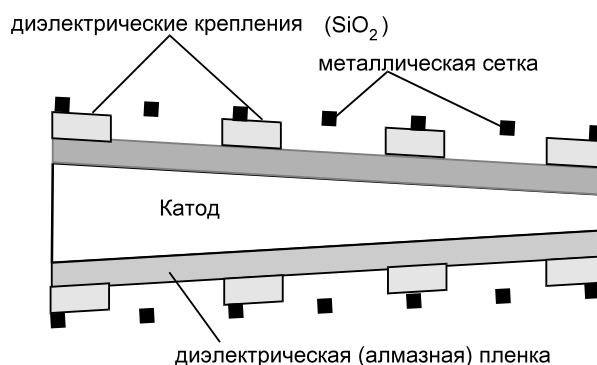


Рисунок 2. Катод с наноразмерными диэлектрической пленкой и сеткой

Здесь N – полное число нитей на всех электродах, \mathbf{x}_0 и \mathbf{z}_0 – орт-векторы. Задавая потенциалы электродов и налагая на них в симметричных точках граничные условия, получим систему линейных уравнений для определения q_k . Полученное электрическое поле вместе с постоянным продольным магнитным полем используем для расчета траекторий электронов, вылетающих с сетки. Заметим, что основной вклад в ток в случае холодного

катода дают электроны, имеющие максимальную энергию E_F на катоде. Однако для точного расчета вольт-амперных характеристик следует учитывать распределение электронов по энергиям, особенно при учете температуры. Поэтому определение потенциала и траекторий важно для уточнения формы потенциального барьера вдоль каждой траектории. Хотя максимальное влияние на туннелирование оказывает форма на участке катод-сетка, такое уточнение наряду с учетом распределения электронов по энергиям весьма точно рассчитать ток пучка с учетом усреднения по траекториям вылета. Возможно магнитное поле как с реверсом, так и без, причем на катоде оно желательно. Расчет тока в случае пушки рис. 1 требует вычисления потенциального барьера вдоль каждой траектории и усреднения по ним. Схематическое изображение траекторий электронов без учета продольного магнитного для двух и трех электродов поля приведен на рис. 4 (взят плоский анод). Такие конфигурации использованы для снятия ВАХ. Экспериментальные ВАХ для микроразмерного диода приведены на рис. 5. На рис. 6 даны расчетные ВАХ для наноразмерных структур.

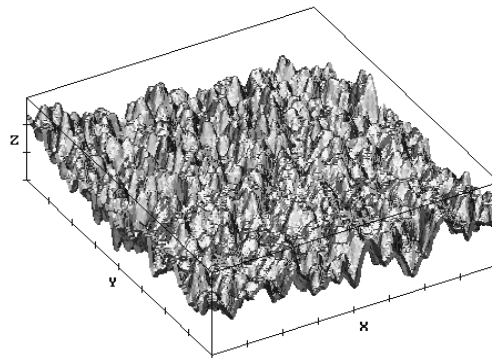


Рисунок 3. Поверхность наноалмазной пленки (изображение АСМ)

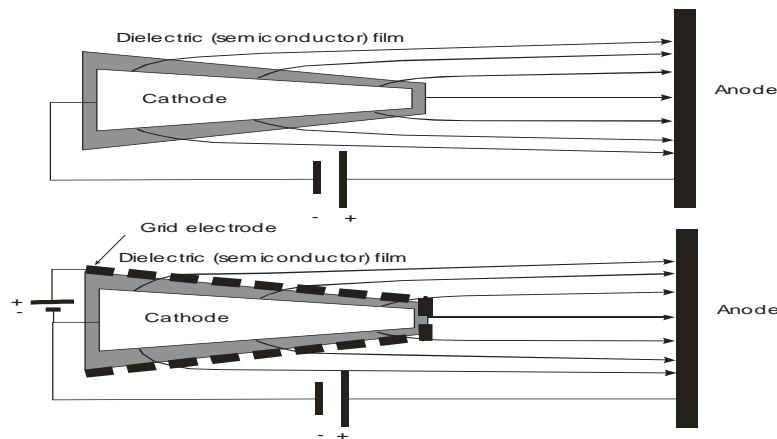


Рисунок 4. Схематическое изображение траекторий без учета магнитного поля в диодной и триодной структурах

Оценим ток пучка. Пусть поперечный размер пушки 2 мм, а продольный 5 мм. Параметры вполне достижимы, причем продольный размер ничем не ограничен. Площадь имитирующей поверхности в этом случае примерно 20 мм². Средняя плотность тока 10⁷ А/см² вполне достижима (рис. 6) теоретически и экспериментально. Ей соответствует ток

пучка порядка 10^6 А. Если считать, что эмитирует 1% поверхности и использовать на порядок меньшую плотность тока, получаем токи порядка килоампер.

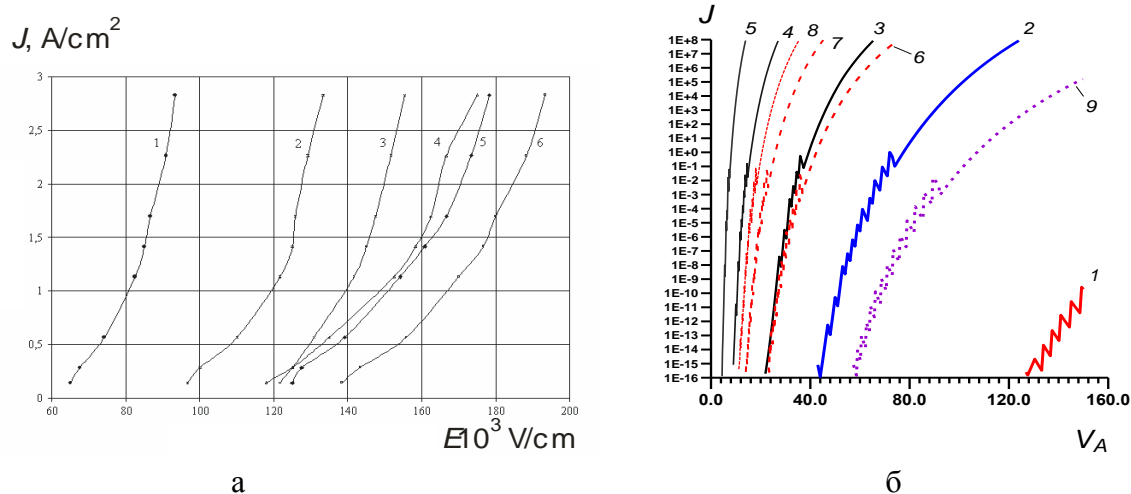


Рисунок 5. а - экспериментальные ВАХ вакуумного диода при разной толщине наноалмазной пленки на катоде: от 6 (кривая 1) до 16 (6) нм; б – Расчетные ВАХ диодных структур (1, 2, 3, 4, 5 с зазорами $d=300, 100, 50, 20, 10$ нм) и триодных структур (6, 7, 8, 9) с $d=100$ нм и отношением напряжения сетка/анод 0.5 (6, 9); 0.8 (7); 1.0 (8)

Оценим вычислительные затраты алгоритма. Минимальное число источников согласно рис. 1 порядка 40–50. В случае наличия второго анода число источников порядка 100. На каждом шаге решения уравнения движения для расчета траектории при вылете из заданной точки необходимо решать СЛАУ порядка 100. Необходимо рассмотреть несколько десятков траекторий с вылетом по нормали с постоянной скоростью. Необходимо решать уравнения движения численно явными или неявными методами, при этом число шагов может быть порядка нескольких тысяч. В магнитном поле траектория спиральная. Следует определить усредненную плоскую (осевую) траекторию. После определения этой траектории необходимо решать численно уравнение Шредингера для туннелирования вдоль этой траектории. Таким образом, при 50 траекториях и 1000 шагов интегрирования получаем порядка 10^{12} операций для расчета параметров пучка. Это расчет для анализа. Для выбора конфигурации электродов необходима оптимизация по 100–200 параметрам (координатам точек источников), что вполне достижимо на современных ЭВМ, включая ПК.

Библиографический список

1. Бушуев Н.А. Перспективные замедляющие системы терагерцового диапазона для ЛБВ / Бушуев Н.А., Давидович М.В., Шиловский П.А. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2012. – Т. 12. – Вып. 2. – С. 64-75.
2. Давидович М.В. Туннелирование электронов при наличии диэлектрической пленки на катоде / Давидович М.В., Яфаров Р.К., Доронин Д.М. // Труды 20-й Международной Крымской конференций (CriMiKo'2010). Севастополь, 2010. – pp. 733-734..
3. Davidovich M.V. Field Emission in Diode and Triode Vacuum Nanostructures / Davidovich M.V., Bushuev N.A. // 2014 Tenth International Vacuum electron Sources Conference and Second International Conference on Emission Electronics (June –July, 2014). Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University. – pp. 58-59.
4. Arxiv.org [Электронный ресурс]: Field emission in diode and triode vacuum nanostructures / Davidovich M.V., Buhuev N.A., Yafarov R.K. Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1411.3738>.