



ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРАКТАЛЬНЫХ УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР

Ю.В. Гуляев, Ю.А. Григорьев, В.Н. Король, Г.А. Рехен

Исследованы эмиссионные характеристики автоэммиттеров с различным рельефом поверхности. Экспериментально показано, что уменьшение зазора в микродиодных устройствах неизбежно приводит к значительному росту макроскопической напряженности электростатического поля при заданной величине автоэмиссионного тока. Проведены экспериментальные исследования и предложен приближенный подход на основе фрактальной геометрии к анализу автоэмиссионных характеристик многоуровневых углеродных острийных и лезвийных структур, дающий возможность сформулировать требования к конфигурации технологически воспроизводимых холодных источников электронов с заданными свойствами. Данные исследований позволяют утверждать, что перспективной конфигурацией автоэммиттерной структуры является углеродная фрактальная решетка лезвийного типа с протяженными границами. Предложен углеродный автоэммиттер лезвийного типа с развитой фрактальной поверхностью (фигура Пеано – Госпера).

Введение

Создание новых экономичных источников электронных потоков, продолжает оставаться актуальной задачей электровакуумного приборостроения. В последние годы все больший научный и практический интерес приобретают исследования автоэмиссионных свойств различных углеродных микро- и наноструктур [1-7]. Это связано с рядом неоспоримых преимуществ модификаций углеродных материалов по сравнению с тугоплавкими металлами. Отметим, следуя Б. Мандельброту [8], что реальная форма поверхности, на вершинах которой размещены центры автоэлектронной эмиссии, настолько неправильна и фрагментирована, что в сравнении с обычной евклидовой геометрией имеет место не просто более высокая степень сложности, но совершенно *иной уровень сложности*. Введенное в геометрии сложных систем понятие фрактала дает возможность описать многие реальные микроструктуры, представляющие практический интерес для современной электроники.

Фрактальные системы образуют многообразный мир явлений и объектов, которые в отличие от непрерывных систем имеют разреженную структуру и, как правило, дробную размерность. В конце XX века в физике возникло новое направление, связанное с исследованием фрактальных кластеров, образующихся при слипании движущихся по определенному закону твердых частиц [8, 9]. Привлечение принципов фрактальной геометрии [8] к изучению автоэмиссии углеродных структур позволяет более точно подойти к закономерности в распределении эмиссионных центров, оценить эффективную площадь эмиссии, непосредственно с которой совершается автоэмиссионный процесс, и достигаемую при этом плотность тока.

1. Объект исследования и методика эксперимента

В качестве объекта для экспериментального исследования процессов автоэмиссии рассматривались дисковые углеродные автоэммиттеры на основе стеклоглуглерода СУ-2000 и углеродные нанокластерные пленочные структуры, полученные методом вакуумного пиролиза углеводородов. Исследовались структуры с высокой степенью чистоты поверхности и регулярные углеродные решетки из стеклоглуглерода с плотностью упаковки $N = 10^5$ - 10^6 см⁻². Предполагалось, что все углеродные материалы имеют работу выхода 4.5 эВ. Предварительно, перед снятием вольт-амперных характеристик (ВАХ), микродиоды на основе указанных материалов подвергались высоковакуумному обезгаживанию путем прогрева в течение 3-х часов при температуре 700-800°К. Для технологического обезгаживания эмиттерных структур в процессе откачки использовался подогревательный узел термокатода лампы бегущей волны, обеспечивающий нагрев стеклоглуглеродной решетки до 800 °К. Максимальная мощность подогревателя составляла 30 Вт. Измерения ВАХ проводились в непрерывном и импульсном режимах при средних значениях электронной мощности на микродиоде не более 2-3 Вт и ее импульсных значениях до 500 Вт. Длительность импульса при этом составляла 10-80 мкс при скважности 500-1000 ед. Измерения проводились в режиме непрерывной откачки с помощью магниторазрядного насоса МД-250. Давление остаточных газов составляло $2 \cdot 10^{-7}$ Торр. В ходе экспериментов расстояние катод – анод $d_{к-а}$ изменялось с помощью подвижного высоковакуумного соединения, обеспечивающего изменение зазора от 3 мкм до $3 \cdot 10^3$ мкм и более. Диаметр плоского торца цилиндрического анода также из стеклоглуглерода СУ-2000 составлял 3 мм.

На рис. 1 представлено изображение фрагмента полированной поверхности стеклоглуглерода СУ-2000, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа.

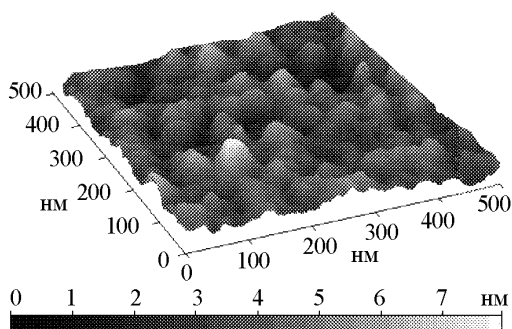


Рис. 1. STM-диаграмма фрагмента углеродной поверхности СУ-2000, класс обработки 12

Экспериментальные образцы (рис. 2) изготавливались по технологии [7] с применением фотолитографии и термохимического травления стеклоглуглеродных пластин в среде водорода при температуре 1200-1300°К. Размеры исследуемых образ-

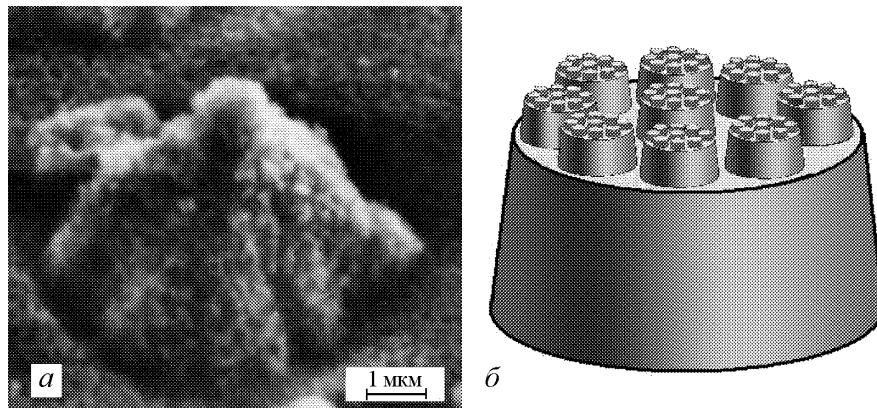


Рис. 2. *a* – микрофотография острой монолитной структуры из стеклоглерода СУ-2000, $N = 10^6 \text{ см}^{-2}$; *б* - схематичное изображение экспериментальной трехъярусной фрактальной эмиссионной структуры из стеклоглерода СУ-2000 [7]

цов многоостриных стеклоглеродных пластин $2 \times 20 \times 30 \text{ мм}^3$. Высота и радиус вершин острий структуры 6-10 и 0.5-1 мкм соответственно.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены ВАХ микродиодов в координатах Фаулера – Нордгейма [11] с автоэммиттером из стеклоглерода СУ-2000 с полированной поверхностью (см. рис. 1) при различных межэлектродных расстояниях. Из рис. 3 видно, что по мере роста зазора наблюдается сходимость последовательности ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма. Применение технологии [7] дает возможность получить регулярные многоостриные углеродные структуры (см. рис. 2). Последовательность ВАХ микродиодов на их основе (рис. 4) с увеличением зазора $d_{к-а}$ также имеет сходимость. Однако интересным является тот факт, что сходимость вольтамперных характеристик микродиодов, на основе полированной пластины СУ-2000, носит менее

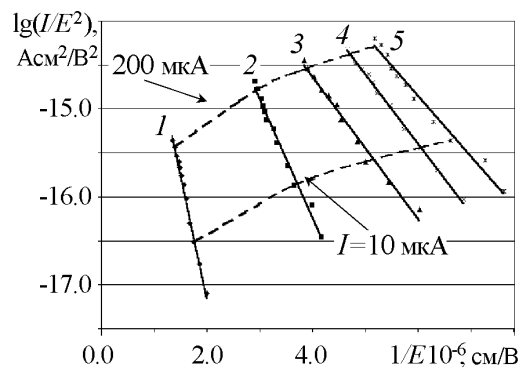


Рис. 3. ВАХ микродиодов на основе углеродной полированной пластины СУ-2000 при различных межэлектродных зазорах $d_{к-а}$: 1 – 5 мкм; 2 – 15 мкм; 3 – 25 мкм; 4 – 35 мкм; 5 – 45 мкм. Штрихами показаны линии равного тока

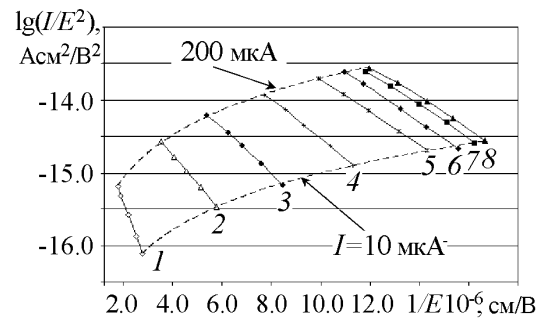


Рис. 4. ВАХ микродиодов на основе многоостриной углеродной решетки СУ-2000, $N = 10^6 \text{ см}^{-2}$ при различных межэлектродных зазорах $d_{к-а}$: 1 – 5 мкм; 2 – 15 мкм; 3 – 30 мкм; 4 – 60 мкм; 5 – 120 мкм; 6 – 150 мкм; 7 – 180 мкм; 8 – 210 мкм. Штрихами показаны линии равного тока

выраженный характер по сравнению с микродиодами на основе регулярной острой решетки и может быть объяснено конечностью макроразмеров и микрорельефом поверхности токоприемного анода. Сходимость вольтамперных характеристик в обоих случаях происходит асимптотически к некоторой предельной характеристике, соответствующей переходу в область диодных зазоров, при которых размер и рельеф анодной поверхности не влияют на распределение электростатического поля на поверхности автоэммитера. То есть мы переходим в зону действия закона подобия, который начинает выполняться при величинах зазора существенно превышающих характерные размеры рельефа поверхности автоэмиссионной структуры (см. рис. 1). Достичь предельную вольтамперную характеристику не удастся вследствие влияния краевых эффектов, обусловленных конечностью макроразмеров и микрорельефом поверхности токоприемного анода.

Из рис. 3 и 4 следует практически важный вывод о возможности получения равных значений тока в микродиодах с увеличенным зазором при существенно более низком значении макроскопической напряженности электрического поля.

В ходе большого числа опытов с вакуумными микродиодами на основе монокристаллических и пленочных углеродных структур был выявлен эффект существенного увеличения автоэмиссионного тока при неизменных значениях потенциала анода после инициирования единичного искрового разряда в микродиодном зазоре мощностью 20-30 Вт. Единственность разрядного процесса обеспечивалась подключением к источнику постоянного напряжения последовательно с микродиодом регулируемого балластного сопротивления $R_6 = 10-100$ кОм. Очевидно, что в течение времени прохождения разряда в диодном промежутке ток разряда при $R_6 = 100$ кОм и $U_a = 2 \cdot 10^3$ В не мог превысить значения 20 мА. При указанном напряжении мощность разряда составляла 40 Вт. После осуществления единичного вакуумного разряда ВАХ автоэмиссионного диода в координатах Фаулера – Нордгейма существенно сместилась «вправо», микродиод стал более низковольтным. После снятия ВАХ макет диода был разобран и проведен микроскопический анализ поверхности углеродной структуры. Анализ показал, что в результате осуществления единичного разряда двумерная сплошная непрерывная поверхность углеродной наноструктуры (см. рис. 1) претерпела значительные изменения (рис. 5). Преобразованная структура

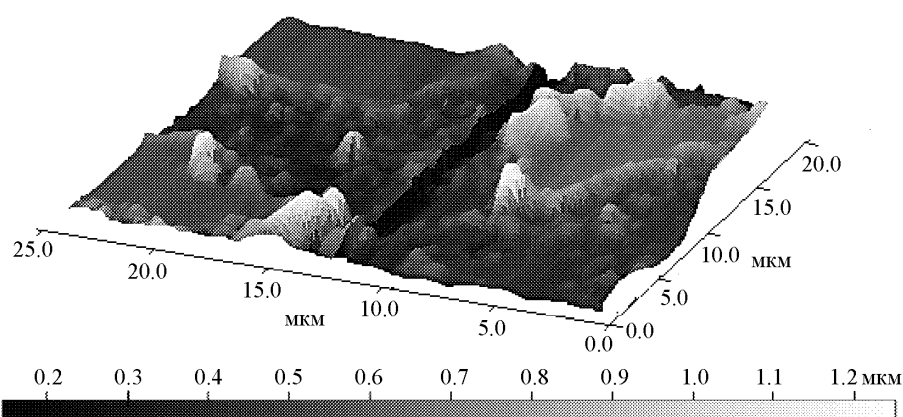


Рис. 5. STM-диаграмма фрагмента углеродной фрактальной структуры после единичного вакуумного разряда

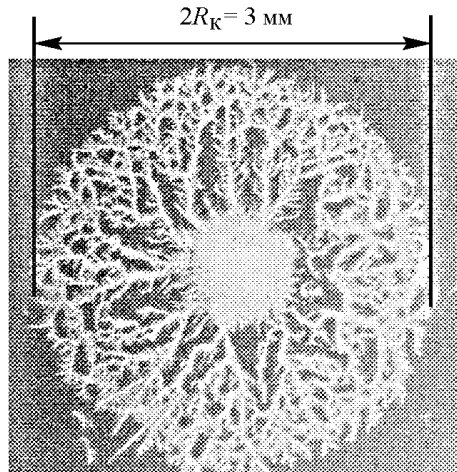


Рис. 6. Микрофотография углеродной фрактальной структуры типа «фигура Лихтенберга», полученная экспериментально в результате единичного вакуумного разряда микродиодного промежутка. $U_a = 2\text{кВ}$, $d_{к-а} = 50\text{мкм}$; R_k – радиус автоэммиттера

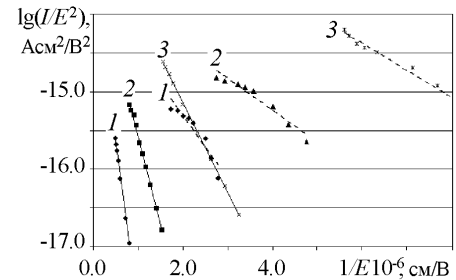


Рис. 7. ВАХ микродиодов в координатах Фаулера – Нордгейма для различных межэлектродных зазоров $d_{к-а}$: 1 - 5 мкм, 2 - 10 мкм, 3 - 30 мкм; сплошная линия - до инициирования единичного вакуумного разряда, штриховая линия - после прохождения единичного вакуумного разряда

имеет фрактальный тип (рис. 6), напоминающий форму фрактала «фигура Лихтенберга»*, приведенный в работе [18] и иллюстрирующий последствия искрового разряда диодного промежутка с диэлектрическим заполнением.

На рис. 7 представлена вольтамперная характеристика микродиодов до и после прохождения единичного вакуумного разряда.

Смещение ВАХ вправо объясняется более высокими коэффициентом усиления электростатического поля и плотностью размещения действующих эмиссионных центров по сравнению с непрерывными двумерными пленочными наноструктурами; при этом реализуются протяженные лезвийно-острийные «береговые» границы. Увеличение числа эмиссионных центров, возможно, связано с термохимической очисткой углеродной поверхности вместе с ее геометрическим преобразованием во время прохождения вакуумного искрового разряда. При этом обеспечивается постоянство работы выхода на вершинах полученного углеродного фрактального кластера.

Оценки величин коэффициентов усиления k электрического поля для рассматриваемых фрактальных углеродных поверхностей производились по экспериментальным зависимостям (см. рис. 3, 4, 7), свидетельствующим об автоэмиссионном характере процесса, подтверждающем его соответствие формуле Фаулера – Нордгейма [11] в логарифмическом масштабе. Результаты представлены на рис. 8. Расчет производился по формуле: $k = -B/\text{tg } \alpha$, где $B = 2.7 \cdot 10^8$, α – угол наклона ВАХ.

Максимальные значения коэффициента усиления электрического поля на уровне 1200-1300 были получены на макетах микродиодов с фрактальными структурами автоэммиттеров типа «фигуры Лихтенберга» и многоострийной стеклогуглеродной решетки ($N = 10^6 \text{ см}^{-2}$). Представляет значительный интерес оценка величин эффективной площади эмиссии для исследуемых углеродных структур. Под эффективной площадью эмиссии мы понимаем суммарную площадь $S_{\text{эфф}}$, складыва-

*Лихтенберг (Lichtenberg) Георг Кристоф (01.07.1742, Оберрамштадт – 24.02.1799, Гёттинген) – немецкий ученый, писатель и публицист. Окончил Гёттингенский университет, в котором с 1769 был профессором физики. Исследовал искровой разряд на границе раздела твердого диэлектрика и газа. Почетный член Петербургской Академии наук (1795).

ющуюся из малых отдельных площадей, расположенных на вершинах нанострий, что также можно интерпретировать как центры эмиссии. Очевидно, что $S_{\text{эфф}}$ зависит от распределения электростатического поля на поверхности автоэммитера, а также от величины электрического поля на аноде. На рис. 9 представлены зависимости эффективной площади автоэмиссии от величины межэлектродного зазора. Как видно из рис. 9, полученные экспериментальные зависимости $S_{\text{эфф}} = f(d_{\text{к-а}})$ не являются монотонными функциями, что соответствовало бы данным теоретических работ [12-15]. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов, по-видимому, связано с тем, что в расчетных моделях анод микродиода предполагается идеально плоским. Предположение об отсутствии рельефа на аноде соответствует монотонному росту $S_{\text{эфф}}$ при увеличении зазора до значений, в 20-100 раз превышающих характерные размеры рельефа поверхности автоэммитера (средний период решетки, радиус кривизны вершин и т.п.).

Наличие на графиках рис. 9 участков снижения при малых $d_{\text{к-а}}$ и увеличения значения $S_{\text{эфф}}$ при дальнейшем росте величины зазора микродиода можно качественно объяснить суперпозицией распределений электростатических полей в приближении точной геометрической идентичности рельефов катодной и анодной поверхностей при их произвольном взаимном смещении. Однако распределение электростатического поля на поверхности автоэммитера окончательно устанавливается при межэлектродных зазорах, существенно превышающих характерные значения размеров рельефов не только катодной, но и анодной поверхности. Оценка величин $S_{\text{эфф}}$ для различных катодных углеродных структур составила 10^{-10} - 10^{-7} см² при площади катода равной $7 \cdot 10^{-2}$ см².

Дальнейшее изложение связано с анализом и построением геометрических моделей микродиодов при значениях $d_{\text{к-а}} \gg l$, где l – период острых и лезвийных структур. Как известно, соотношение для автоэмиссионного тока имеет вид [11]:

$$I = AS_{\text{эфф}} \left[\frac{k^2 E_{\text{ср}}^2}{\phi} \right] \exp \left(- \frac{B\phi^{3/2}}{kE_{\text{ср}}} \right) \quad (1)$$

где $A = 1.46 \cdot 10^{-4}$ и $B = 6.53 \cdot 10^7$ – постоянные; $\phi = 4.5$ эВ – работа выхода электронов; $E_{\text{ср}} = V_a/d_{\text{к-а}}$ В/см – напряженность электрического поля; V_a – электрический потенциал анода.

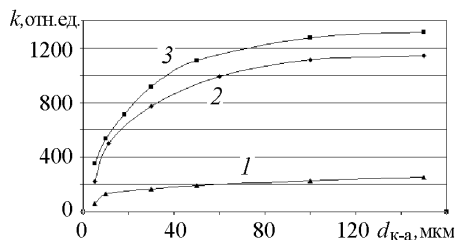


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления от межэлектродного зазора $d_{\text{к-а}}$: 1 – полированная поверхность СУ-2000, 2 – фрактал «фигура Лихтенберга», 3 – регулярная решетка СУ-2000 $N = 10^6$ см⁻²

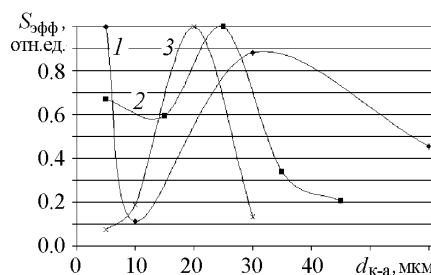


Рис. 9. Зависимость относительной величины эффективной площади от значения межэлектродного зазора: 1 – пленочная углеродная структура (фрактал «фигура Лихтенберга»); 2 – полированная пластина из стеклоуглерода СУ-2000; 3 – монолитная острая матрица из стеклоуглерода СУ-2000, $N = 10^6$ см⁻²

В соотношение (1) входит эффективная площадь эмиссии $S_{\text{эфф}}$, определение которой, как уже упоминалось, достаточно сложная задача. При изменении электрического потенциала анода с учетом реального микро- и нанорельефа структуры, эффективная площадь эмиссии изменяется и может достигать своего максимума, величина которого ограничена электрической прочностью вакуумного микродиодного промежутка. Анализ результатов проведенных экспериментов, относящихся к случаю $d_{\text{к-а}} \gg l$, дает возможность обратиться к приближенной многоярусной (рис. 10)

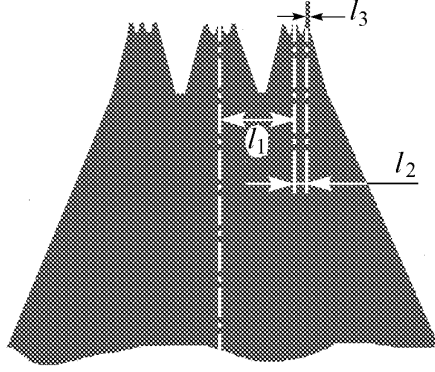


Рис. 10. Фрактальная модель микроострия (см. рис. 1). $l_1 = 1$ мкм, $l_2 = 0.1$ мкм, $l_3 = 0.01$ мкм, $N_1 = 10^8$ см⁻², $N_2 = 10^{10}$ см⁻², $N_3 = 10^{12}$ см⁻²

геометрической модели определения эффективной площади эмиссии и коэффициента усиления. Рассмотрим в качестве модели трехъярусную структуру как наиболее технологически обоснованную и практически реализуемую [5].

Острия структуры первого и второго ярусов имеют форму усеченных конусов, а вершины конусов верхнего (третьего) уровня являются частью сферических поверхностей, при этом полагаем, что эмитирующая часть поверхности составляет телесный угол $\leq 90^\circ$. Тогда эффективная площадь эмиссии для трехуровневой периодической структуры может быть представлена произведением площади одного эмиссионного центра на их количество

$$S_{\text{эфф}} = S_{\text{к}} \pi^3 \left(\frac{r_1}{l_1} \right)^2 \left(\frac{r_2}{l_2} \right)^2 \left(\frac{r_3}{l_3} \right)^2, \quad (2)$$

где $S_{\text{к}}$ – площадь катодной подложки; r_1, r_2, r_3 – радиусы вершин острий первого, второго и третьего уровней; l_1, l_2, l_3 – периоды острийных решеток. В случае, если структуры первого, второго и третьего уровней самоподобны, соотношение (2) принимает вид

$$S_{\text{эфф}} = S_{\text{к}} \pi^3 \left(\frac{r}{l} \right)^6. \quad (3)$$

Таким образом, для фрактальных структур подобного типа получаем формулу (3) для вычисления эффективной площади эмиссии, имеющую простой вид и позволяющую осуществить численную оценку $S_{\text{эфф}}$ по введенным нами параметрам. Отметим, что выбор числа уровней реальных автоэмиссионных структур определяется многими факторами и в том числе конструкторскими решениями и технологическими процессами, создающими наноразмерные и атомарные вершины острийных эмиссионных центров.

Следуя [12, 13] и ограничиваясь трехуровневым представлением структуры, для коэффициента усиления электрического поля получим

$$k = \left(1 + \frac{h}{r} \right)^3, \quad (4)$$

где h/r – отношение высот и радиусов кривизны для трехуровневой фрактальной структуры. С учетом (3), (4) формула (1) для автоэмиссионного тока фрактальных

острийных решеток примет вид

$$I = 1.46 \cdot 10^{-4} \pi^3 \left(\frac{r}{l} + \frac{h}{l} \right)^6 \frac{S_k E_{cp}^2}{\Phi} \exp \left(-6.53 \cdot 10^7 \Phi^{3/2} \left(1 + \frac{h}{r} \right)^{-3} E_{cp}^{-1} \right). \quad (5)$$

Используя известные геометрические размеры рельефа структуры, по формуле (5) несложно произвести расчет вольтамперных характеристик.

Представляет интерес построение модели и для пленочных углеродных фрактальных структур. В работе [4] сообщается о технологии получения двумерных углеродных пленок на изолирующих подложках. Геометрическая площадь двумерной пленочной структуры велика; однако изучение ее автоэмиссионных свойств показало, что получить с нее значительный автоэмиссионный ток не удастся. Необходимо отметить, что у сплошных пленочных структур относительно низкий коэффициент усиления (менее 200). Автоэмиссия происходит с поверхности нановыступов (см. рис. 1). Для повышения коэффициента усиления таких пленочных структур необходим переход к прерывистым фрактальным структурам с дробной размерностью с протяженной планарно-торцевой конфигурацией границ, аналогичной фракталу «фигура Лихтенберга».

Как было отмечено ранее, на поверхности углеродной пленки в ходе искрового разряда возникли протяженные углубления, на границе которых образовался выступ высотой до 1200 нанометров (см. рис. 5). В этом случае коэффициент усиления пленки возрос, приблизительно, на порядок и достиг значений 1350 ед.

Фрактальный характер структуры (см. рис. 5, 6), полученной с помощью искрового разряда в вакуумном промежутке, указывает на целесообразность построения искусственных фрактальных структур с лучшими автоэмиссионными свойствами, применяя для этого относительно простые технологические процессы.

Используя современные технологические методы [7] можно получить трехуровневую поверхностную структуру, представляющую собой симбиоз протяженной лезвийной структуры и двух уровней многоострийных наноструктур с упаковкой 10^9 - 10^{10} см⁻² (аналогичных представленным на рис. 1), расположенных на ее гребне.

Коэффициент усиления электрического поля на вершинах наноострийных и лезвийных структур можно представить произведением коэффициента усиления собственно лезвия (первый уровень) на коэффициент усиления наноострий, расположенных на гребне лезвия (второй и третий уровни). Используя как приближение для каждой из конфигураций аналитическое решение уравнения Лапласа для цилиндрического и сферического диодов, при $d \gg l$ [13] получим

$$k = \frac{d_{к-а}}{r_l} \left[\ln \left(\frac{d_{к-а}}{r_l} \right) \right]^{-1} \left(1 + \frac{h}{r} \right)^2, \quad (6)$$

где r_l – радиус лезвия (первый уровень); $\left(\frac{h}{r} \right)$ – отношение высот наноострий второго и третьего уровней к радиусам кривизны. Соотношение (6) по аналогии с соотношением (4) должно обеспечивать удовлетворительное соответствие экспериментальным данным при выполнении условий: $d_{к-а}/r_l \leq 100$, $h/r \leq 10$.

Для реальных трехуровневых структур коэффициент усиления может достигать $1.2 \cdot 10^3$ и более, что соответствует его значениям, определенным по экспериментальным диодным ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма [12-14]. Однако

плоские фрактальные эмиттеры на основе структур типа «фигуры Лихтенберга» не обеспечивают одинакового межлезвийного расстояния в периферийной и центральной частях поверхности катодной подложки.

С целью повышения однородности автоэмиссии и увеличения эффективной площади, а также с целью исключения «экстремальных» технологических процессов при изготовлении автоэммиттеров, представляется целесообразным обратиться к фрактальным структурам Пеано – Госпера [8], протяженность которых может неограниченно возрастать. Для указанной структуры протяженность лезвий L , период решетки $l_{\text{л}}$ и площадь $S_{\text{эфф}}^{\text{П-Г}}$, образующая катодную структуру на дисковом основании площадью $S_{\text{к}}$ определяются простыми соотношениями, полученными нами для семизвенной геометрической структуры Пеано – Госпера:

$$L = \frac{2\sqrt{\pi}}{3} \cdot 7^{n/2} S_{\text{к}}^{1/2}; \quad l_{\text{л}} = \frac{3}{2\sqrt{\pi}} \cdot 7^{-n/2} S_{\text{к}}^{1/2}; \quad S_{\text{эфф}}^{\text{П-Г}} = \frac{\pi^{7/2}}{3} 7^{n/2} \left(\frac{r}{l}\right)^4 r_{\text{л}} S_{\text{к}}^{1/2}, \quad (7)$$

где $S_{\text{к}}$ – площадь катодного основания, см²; n – число итераций кривой Пеано – Госпера; $L, l_{\text{л}}$ – длина и период лезвийной структуры, см; $r_{\text{л}}$ – радиус лезвия (первый уровень), см.

На рис. 11 для наглядности представлена автоэммиттерная структура типа фрактала Пеано – Госпера для $n = 3$. При $n = 6$ имеем непересекающуюся лезвийную структуру протяженностью 1.07 м на дисковой катодной подложке диаметром 3 мм. При этом для реальной трехуровневой наноструктуры $S_{\text{эфф}}^{\text{П-Г}}$ составляет величину $1.6 \cdot 10^{-6}$ см² ($r/l = 0.1$; $r_{\text{л}} = 10^{-4}$ см; $n = 6$). Технология получения такого монолитного углеродного автокатаода включает следующие технологические процессы: фотолитографию, формирующую топологию структуры Пеано – Госпера на поверхности подложки; термохимическое травление автоэммиттера в среде водорода при $t^{\circ} = 900-1000^{\circ}$ С [7] с образованием лезвийной структуры. «Период» такой автоэмиссионной решетки составляет порядка 7 мкм, что можно считать достаточным для усиления электрического поля на вершинах nanoострий, расположенных на гребне извилистой непересекающейся лезвийной структуры указанной протяженности.

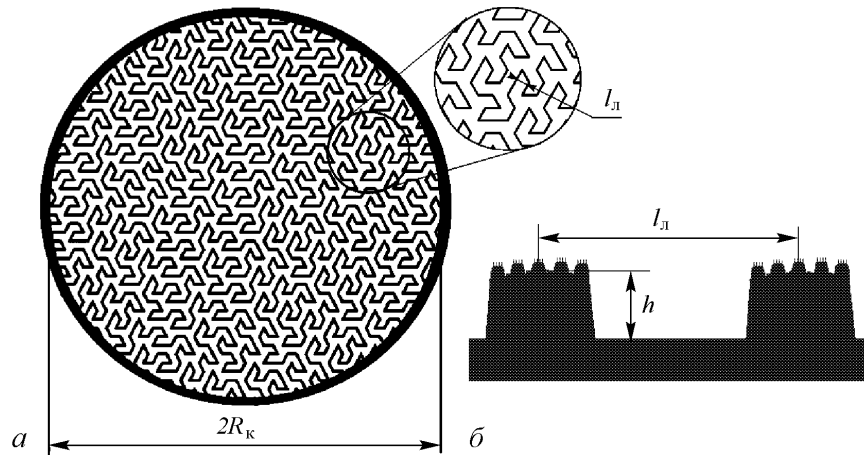


Рис. 11. *а* – структура автоэммиттера с протяженной фрактальной лезвийной границей на основе кривых Пеано – Госпера [1] (третья итерация); *б* – ее фрагмент с учетом микро- и nanoострий на гребне лезвия

На рис. 12. представлены расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики микродиодов на основе фрактальных углеродных лезвийных структур большой протяженности. Как видно из рисунка, фрактальный автоэмиттер на основе кривой Пеано – Госпера может обеспечить более низковольтный режим автоэмиссии за счет увеличения числа действующих дискретных эмиссионных центров, распределенных по всей длине протяженной лезвийной структуры и находящихся под воздействием электростатических полей с идентичным распределением. В экспериментах и расчетах рассматривался дисковый углеродный автокатод диаметром $2R_k = 3$ мм с межэлектродным зазором $d_{к-а} = 100$ мкм.

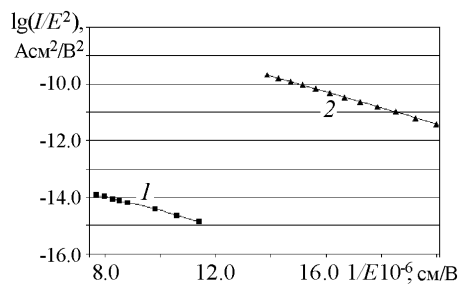


Рис. 12. ВАХ микродиодов на основе фрактальных структур типа «фигура Лихтенберга» и фрактала Пеано – Госпера, $d_{к-а} = 100$ мкм, $r_n = 1$ мкм, $S_k = 7 \cdot 10^{-2}$ см², $r/l = 0.05$, $h/l = 8$, $S_{эфф}^{\Pi-\Gamma} = 1.6 \cdot 10^{-6}$ см²: 1 – фрактал «фигура Лихтенберга», эксперимент; 2 – кривая Пеано – Госпера, расчет по формулам (1), (6), (7)

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования и предложенный приближенный подход на основе фрактальной геометрии к рассмотрению автоэмиссионных характеристик многоуровневых углеродных острых и лезвийных структур дает возможность сформулировать требования к конфигурации технологически воспроизводимых холодных источников электронов с заданными свойствами.

Результаты дают основание утверждать, что перспективной конфигурацией автоэмиттерной решетки является монолитная углеродная структура, реализующая фрактал типа «кривая Пеано – Госпера». На основе этой структуры можно проектировать современные источники интенсивных электронных потоков со средней плотностью отбираемого тока по матрице до 10 А/см². Подчеркнем, что наиболее эффективными низковольтными автоэмиттерами с высоким значением эффективной площади эмиссии оказались именно фрактальные лезвийные структуры большой протяженности.

Библиографический список

1. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 4. С. 401.
2. Синицин Н.И. и др. Углеродные нанокластерные структуры – один из материалов эмиссионной электроники будущего // Радиотехника. 2000. № 2. С. 9.
3. Бондаренко Б.В., Кириченко Л.А. Некоторые вопросы разработки автоэлектронных катодов // Электронная техника. 1992. Сер. 1. Вып. 9-10 (453-454). С. 3.
4. Апин М.П., Бушуев Н.А, Поздняков Л.В., Григорьев Ю.А., Винник В.В. Углеродные материалы в приборах вакуумной электроники и микроэлектроники // Высокие технологии – путь к прогрессу. Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во «Научная книга», 2003.

5. Grigoriev Y.A., Petrosyan A.I., Penzyakov V.V., Pimenov V.G., Rogovin V.I., Shesterkin V.I., Kudryashov V.P. and Semyonov V.C. Experimental study of matrix carbon field-emission cathodes and computer aided design of electron guns for microwave power devices, exploiting these cathodes // J. Vac. Sci. Technol. B 15(2), Mar/Apr 1997. С. 503.
6. Гуляев Ю.В., Григорьев Ю.А., Король В.Н., Рехен Г.А. Автоэмиссионные свойства фрактальных углеродных наноструктур // Перспективные направления развития электронного приборостроения. Саратов: Изд-во Саратовского Университета, 2003. С. 209.
7. Пат. 1738013 Россия, МКИН01j1/30 Способ формирования топологии преимущественно многоострийного автокатода. Ю.А. Григорьев, С.В. Васильковский, В.И. Шестеркин, З.А. Ярцева (Россия) № 481/937/24-21; Заявлено 09.04.90; Оpubл. 06.04.93.
8. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований. 2002.
9. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991.
10. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001.
11. Ненакаливаемые катоды / Под ред. М.И. Елинсона. М.: Сов. Радио, 1974.
12. Солнцев В.А. Нелинейные явления в вакуумных микроэлектронных структурах // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6, № 1. С. 54.
13. Marcus R.B., Chin K.K., Yuan Y., Wang H., Carr W.N. Simulation and design of field emitters // IEEE Transactions on ED. 1990. Т. 37, № 6. С. 1545.
14. Исаева О.Б., Елисеев М.В., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М. Моделирование автоэлектронной эмиссии с фрактальной поверхности // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7. № 5. С. 33.
15. Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1996.
16. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд-во МФТИ; Физматкнига, 2001.
17. Murata H., Shimoyama H. and Ohye T. Computer simulation of electric field analysis for vertically aligned carbon nanotubes (1) – simulation method and computing model // Proc. SPIE. 2001. Vol. 1510. С. 156.
18. Радиофизическая электроника / Под ред. Н.А. Капцова. М.: Изд-во Московского ун-та. 1960.

*Саратовский филиал Института
радиотехники и электроники РАН*

*Поступила в редакцию 05.10.2004
После доработки 17.04.2005*

RESEARCH OF THE FIELD EMISSION OF FRACTAL CARBON STRUCTURES

Yu.V. Gulyaev, Yu.A. Grigoriev, V.N. Korol, G.A. Rehen

Emission characteristics of autoemitters with a various relief of a Surface are investigated. It is experimentally shown, that reduction of a backlash in microdiode devices inevitably leads to significant growth of macroscopical intensity of an electrostatic field at the set size of an autoemission current. Experimental researches are lead and the approximate approach on the base of fractal geometry is offered to the analysis of autoemission

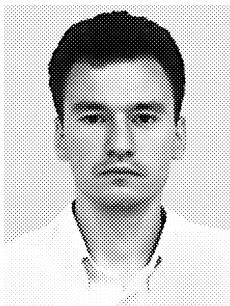
characteristics of multilevel carbon both tips and patterns structures, enabling to formulate requirements to a configuration of technologically reproduced cold katods with the set properties. The results allow to approve, that the carbon fraktals lattice of pattern type with large borders is a perspective configuration of autoemitters structures is. The carbon autoemitter pattern type with developed fraktal a surface (a figure Peano -Gosper) is offered.



Гуляев Юрий Васильевич – окончил Московский физико-технический институт (1958). С 1971 года – профессор, заведующий кафедрой полупроводниковой электроники Московского физико-технического института, академик Российской Академии наук (1984), с 1988 года – директор Института радиотехники и электроники Российской Академии наук, с 1992 года – член Президиума Российской Академии наук. Область научных интересов: физика твердого тела, радиопизика, электроника, информатика. Один из основателей новых научных направлений: акустоэлектроники, акустооптики, спин-волновой электроники. Основные научные результаты опубликованы в более чем 200 научных статьях, 50 патентах и 3 монографиях. Удостоен премии Европейского физического общества (1979), награжден Государственными премиями СССР (1974, 1984), в 1993 году удостоен Государственной премии Российской Федерации.



Григорьев Юрий Алексеевич – окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1960), ученый секретарь Саратовского филиала Института радиотехники и электроники РАН, доктор физико-математических наук. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника, электронная оптика интенсивных электронных пучков. Имеет 90 научных публикаций.



Король Владимир Николаевич – окончил с отличием физический факультет Саратовского государственного университета (2002), магистр техники и технологии по направлению «Электроника и микроэлектроника», в настоящее время – аспирант Института радиотехники и электроники РАН, автор 4 научных работ. Область научных интересов: вакуумная микроэлектроника, микроструктуры, физика поверхности, автоэмиссия.



Рехен Григорий Абрамович – окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1969), старший научный сотрудник федерального государственного унитарного предприятия НПП «Алмаз». Область научных интересов: экспериментальные исследования интенсивных электронных потоков в электровакуумных приборах СВЧ. Автор 50 научных работ.