

05;11;12

Некоторые аспекты использования углеродных материалов в автоэлектронных эмиссионных катодах

© А.Ф. Бобков, Е.В. Давыдов, С.В. Зайцев, А.В. Карпов, М.А. Козодаев, И.Н. Николаева, М.О. Попов, Е.Н. Скороходов, А.Л. Суворов, Ю.Н. Чеблуков

Институт теоретической и экспериментальной физики,
117259 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 23 июля 2000 г.)

Проведен детальный анализ преимуществ и недостатков использования углеродных волокон и плоских графитов с развитой поверхностью в качестве материалов катодов на основе автоэлектронной эмиссии. Приведены оригинальные результаты экспериментальных исследований элементного состава углеродных материалов, влияния термического отжига на их структуру и эмиссионные свойства, снижения работы выхода при имплантации в них цезия. Рассмотрены возможности радиационных технологий при создании плоских автоэмиссионных катодов с развитой поверхностью, оценена динамика изменения рельефа эмиттирующей поверхности в результате ее бомбардировки низкоэнергетичными ионами остаточных газов. Даны соображения о целесообразности реализации тех или иных конструктивных решений автоэмиссионных катодов для различных практических целей.

Введение

Идея использования углеродных материалов в качестве катодов на основе автоэлектронной эмиссии (АЭ катодов) была, по-видимому, впервые реализована в 1972 г. [1], причем в первых работах [2,3] в качестве углеродных материалов выступали волокна [4]. Этому предшествовало начало использования с 1957 г. в АЭ катодах углесодержащих материалов — карбидов некоторых тугоплавких металлов [5]. Позже появилось весьма значительное количество работ, рассматривающих параметры АЭ катодов из различных массивных углеродных материалов с развитой поверхностью (см., например, [6,7]). Обращение к углеродным материалам в эмиссионной электронике было вызвано прежде всего возможностью их использования в условиях технического вакуума. Идеология использования углеродных волокон в АЭ катодах базировалась на том, что они не требуют специального предварительного заострения (необходимые эмиттирующие центры содержат простой излом волокна); весьма устойчивы к бомбардировке ионами остаточных газов, имеющей место в приборах с высоковольтным питанием и работающих в условиях технического вакуума; характер распыления их поверхности обеспечивает динамически устойчивую конфигурацию с наличием значительного числа эмиттирующих центров (как было установлено, в указанных условиях эксплуатации одни эмиттирующие центры прекращали свое существование, другие же образовывались вновь); они являются вакуумным материалом, выпускаются промышленностью многих стран и имеют относительно невысокую стоимость. К преимуществам использования углеродных волокон относили и тот факт, что промышленность выпускает их в виде пучков (жгутов) из сотен и даже тысяч единичных волокон.

К настоящему времени в литературе (в первую очередь в патентной) описано немало конструкций автоэмиссионных катодов на основе углеродных волокон (ссылки на многие оригинальные и обзорные работы даны в [8]). Так, в патенте США № 4728851 описан автоэмиссионный катод в эмиттирующем устройстве с функцией памяти, состоящий из одного углеродного волокна диаметром порядка $2.0 \mu\text{m}$ с эмиттирующей вершиной, заостренной коронным разрядом до диаметра $0.2 \mu\text{m}$. Патент США № 4272699 описывает автоэмиссионный катод для импульсного электронного источника. Катод состоит из жгута углеродных волокон диаметром от 2.0 до $10.0 \mu\text{m}$ каждое с эмиттирующими поверхностями, полученными простым обрезанием волокон, а не заострением с помощью какой-либо специальной процедуры. Одним из последних патентов в этой области и, возможно, наиболее полным является, по-видимому, патент США № 5588893 [9], описывающий автоэмиссионный катод и метод его изготовления. Весьма обнадеживающие результаты были получены к настоящему времени при использовании радиационных технологий создания или обработки АЭ катодов из массивных углеродных пластин и пластин высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) [1].

Однако наиболее обещающими в плане использования углеродных материалов для АЭ катодов являются на сегодняшний день так называемые нанокластерные углеродные структуры, в частности нанотрубки — вытянутые образования, состоящие в основном из шестичленных колец углерода [11,12]. Авторы [13] впервые оценили эмиссионные свойства изготовленных ими нанотрубок, а в последующих работах [14] сделали указание на то, что величина работы выхода нанотрубок имеет порядок 1 eV . В случае подтверждения этого уникального факта АЭ катоды из нанокластерных углеродных структур в большинстве случаев практического использования не будут иметь себе равных.

Цель настоящей работы — рассмотрение некоторых преимуществ и недостатков АЭ катодов из углеродных волокон и углеродных пластин с развитой поверхностью, а также изложение некоторых последних экспериментальных результатов авторов по исследованию таких катодов. Многие рассмотренные здесь весьма концептуально результаты будут приведены полностью в подготавливаемой параллельно этой серии работ. В этом смысле настоящая работа носит в определенной степени характер обзора оригинальных результатов авторов.

Экспериментальная процедура

Для изучения геометрии АЭ катодов использовались традиционная сканирующая электронная микроскопия (анализ рабочих поверхностей волокон) и сканирующая туннельная микроскопия (анализ геометрии поверхностей массивных катодов с развитой поверхностью). Элементный состав материалов катодов определялся на серийных масс-спектрометрах с магнитной разверткой с использованием лазерных твердотельных ионных источников. Внутренняя структура углеродных волокон изучалась методом рентгеновского дифракционного анализа. Изучение эмиссионных свойств АЭ катодов проводилось на специально созданной, полностью автоматизированной установке [15]. Ее экспериментальная вакуумная камера выполнена из нержавеющей стали и оснащена высоковольтными электрическими вводами и просмотровым окном. Оригинальной частью камеры является универсальное устройство, позволяющее устанавливать элементы измерительной системы (АЭ катод, модулятор, анод) на определенном расстоянии друг от друга и варьировать их взаимное расположение во всех направлениях с высокой точностью. Диаметр анода варьируется от 10 до 40 мм в зависимости от вида и конструкции АЭ катода (одиночные углеродные волокна, пучки волокон, нанотрубки, кремниевые или вольфрамовые острия, одиночные вольфрамовые проволоочки и их пучки, плоские углеродные или графитовые пластины с развитой поверхностью), расстояния анод-катод и задач эксперимента. Измерение температуры модулятора и анода осуществляется с помощью термодатчиков. Для изучения равномерности эмиссионного тока используются различные типы анодов: цельные, сегментные (до 4 сегментов, набраны из кольцевых элементов). В качестве модуляторов используются сетки различной прозрачности, пластины с отверстиями, проволоочки и т.п. Электронный блок установки включает в себя программируемые источники питания, делитель, усилитель и плату L-264, соединенную с электронной вычислительной машиной, и является основой системы сбора и обработки информации. Для настройки и контроля основной системы в установке используется цифровой мультиметр DMM-VC-506 (Conrad Electronic GmbH, Germany). С его помощью цифровая информация о токах эмиссии и температурах элементов конструкции

поступает в ЭВМ, где обрабатывается и используется для построения вольт-амперных характеристик (в том числе и в координатах Фаулера–Нордгейма), зависимостей температуры рабочих элементов от величины токов эмиссии и т.п.

В экспериментах по изучению эмиссионных свойств материалов, работоспособности катодов и узлов в целом необходимая разность потенциалов обеспечивается источниками питания HCN 35-6500 и HCN 35-12500 (оба — F.u.G. Electronic GmbH, Germany), одной из особенностей которых является возможность работы в режиме источников тока. Этот режим использовался в экспериментах по изучению стойкости АЭ катодов к бомбардировке ионами остаточных газов в течение длительных промежутков времени. Полярность напряжения на источниках, подсоединенных к аноду и модулятору соответственно, выбрана положительной. Этот выбор вызван тем, что камера изготовлена из металла, оказывающего заметное влияние на распределение напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве. Оба источника питания оснащены цифровыми аналоговыми преобразователями и подключены к ЭВМ, с помощью которой задаются программы изменения напряжения и временные параметры. Показатели напряжения записываются в информационные файлы наряду с другими параметрами (сила тока, температура). Основным элементом создания файлов, содержащих в цифровом виде данные о различных параметрах изучаемых процессов, является аналого-цифровой преобразователь. Он представляет собой печатную плату L-264, размещенную внутри компьютера. Плата является устройством для ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации. На плате установлен сигнальный процессор ADSP-2105, который может обеспечивать ввод аналоговой информации и ее анализ в автономном режиме с последующим сообщением о результатах измерений. При настройке и калибровке основной системы сбора и обработки информации графики и зависимости, полученные с помощью ЭВМ, сравниваются с такими же графиками и зависимостями, полученными после обработки экспериментальных данных цифрового мультиметра DMM-VC-506. Текущие величины измеряемых параметров в обоих случаях отображаются на экране ЭВМ в реальном масштабе времени.

Экспериментальные результаты: элементный состав углеродных материалов

Анализы элементного состава углеродных материалов проводились на масс-спектрометре МИ-1201 и масс-спектрографе ЭМАЛ-2 (оба — АО "Selmi", Сумы, Украина). Были проанализированы углеродные волокна: на основе полиакрилонитрила (ПАН) марки УКН-П, УКН-400, УКН-5000, ВМН-РК, ВМН-4, ВЭН-280 и Кулон-П (все российского производства, ВНИИПВ [16])

и марки Т-50 и Т-300 (Thornel, USA); на основе нефтяного изотропного пека марки Р-25 и Р-75 (Thornel, USA [17]); на основе гидрата целлюлозы — опытный образец ВНИИПВ (Россия). Кроме того, анализу подверглись несколько марок отечественных реакторных графитов (марки МПГ-6, МПГ-8, КПГ, ГМР-1011, ГР-1, ГР-280, ВПГ) и ВОПГ также отечественного производства. Как выяснилось, все исследованные углеродные материалы содержат значительное количество примесей (до 3%). При этом порядка 2–2.3% составляет азот, по несколько сотых процента — F, Na, Mg, Al, Si, S, Cl, Ca, K, Ti, Fe, Cr, Mg, Ni, Co, Cu, Zn, Sr. Выявлен весьма существенный количественный разброс по примесям в зависимости от марки материала. Можно предположить, что в этом одна из основных причин различия механических и эмиссионных свойств углеродных материалов, а также их устойчивости к воздействию низкоэнергетичной ионной бомбардировки в режиме генерации автоэлектронного тока в условиях технического вакуума. Частично полученные результаты элементного состава углеродных материалов содержатся в Приложениях к квартальным отчетам по проекту № 467-97, финансируемому Международным научно-техническим центром. Полностью их предполагается опубликовать в ближайшее время в подготавливаемом Препринте ИТЭФ.

Экспериментальные результаты: отжиг углеродных волокон

Как указывалось в некоторых работах [18,19], для получения наиболее подходящих параметров автоэлектронной эмиссии углеродных волокон необходима их предварительная термообработка. При этом оптимальным режимом термообработки для волокон большинства типов назывался нагрев до температуры порядка 500°C и время выдержки 10 min. Высказывалось предположение, что при этом происходит "нормализация" внутренней структуры волокон, становящейся оптимальной с точки зрения формирования развитой, динамически устойчивой рабочей поверхности при ионной бомбардировке.

С целью прояснения этого вопроса в настоящей работе было проведено исследование фазового состояния углеродных волокон нескольких типов и его изменения в процессе отжига. Для исследований использовался рентгеновский дифрактометр HZG-4A (Carl Zeiss GmbH, Germany). Измерения проводились при параллельной, перпендикулярной и смешанной укладке волокон в кювету для съемки. Использовалась трубка с медным антикатодом ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) с никелевым фильтром. Изучались волокна после отжига в течение 10 min при 100, 300, 500 и 600°C. Отжиг волокон проводился на воздухе в печи LM 111.10 (Linn Elektro Therm GmbH, Germany). Типичные результаты, соответствующие отечественному полиакрилонитрильному волокну типа УКН-400, приведены на рис. 1. Видно, что волокна представляют

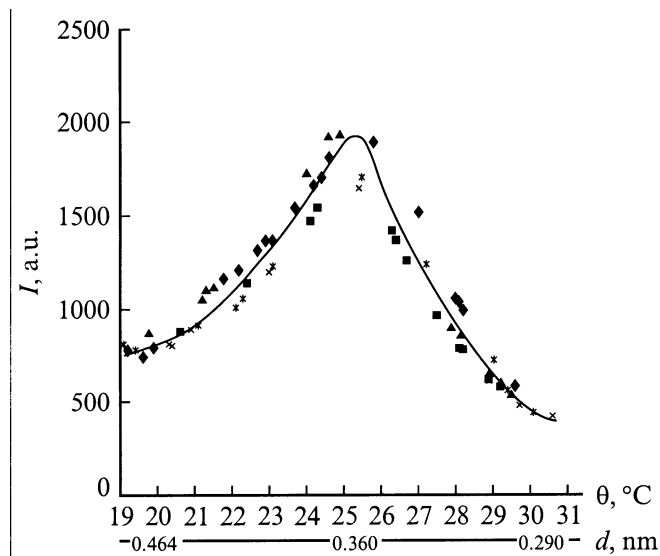


Рис. 1. Дифрактограммы эталонного образца и четырех образцов полиакрилонитрильных углеродных волокон УКН-400, подвергнутых отжигу в атмосфере при различных температурах в течение 10 min: \blacklozenge — не отожжен, \blacksquare — отжиг при 100, \blacktriangle — 300, \times — 500, $*$ — 600°C.

собой сильно аморфизированную структуру. В спектре присутствует один максимум, соответствующий межплоскостному расстоянию $d = 0.36 \text{ nm}$. Полуширина дифрактометрического пика составляет $\sim 0.15 \text{ nm}$, что свидетельствует о наличии упорядоченности на малом уровне. Полученная дифракционная картина не позволяет говорить о степени текстурированности образцов и влиянии отжига в температурном интервале 100–600°C на структурно-фазовое состояние волокон.

Проведенные электронно-микроскопические исследования (использовался сканирующий электронный микроскоп XL 30 TMP, Philips Electron Optics, The Netherlands) рельефа рабочей поверхности единичных углеродных волокон нескольких типов после их тренировки в течение одного и того же времени (порядка 1 h) при напряжении $\geq 5 \text{ kV}$ и давлении остаточных газов на уровне $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$ показали, что наиболее развитая поверхность образуется у волокон, отожженных при $T \leq 400^\circ\text{C}$ или вообще не подвергавшихся предварительной термообработке. Отсюда может быть сделан вывод, что термообработка в указанном температурном интервале приводит лишь к частичному или полному удалению органики, связующей волокна в пучках. При этом присутствие органики способствует формированию развитой рабочей поверхности волокна в процессе ионной бомбардировки в режиме генерации автоэлектронного тока. С другой стороны, даже частичное наличие органики отрицательно сказывается как на использовании в качестве автоэмиссионных катодов пучков волокон, так и на длительном поддержании необходимых вакуумных условий в отпаянных стеклянных приборах.

Ионная бомбардировка поверхности: компьютерное моделирование и экспериментальные результаты

Как известно, одним из важных эффектов, сопутствующих автоэлектронной эмиссии и весьма существенным образом влияющим на ее параметры, является непрерывная бомбардировка рабочей поверхности катодов ионами остаточных газов. Образование этих ионов происходит по механизму электронного удара в пространстве катод-анод. Особенно ошутимое влияние на автоэлектронную эмиссию указанная бомбардировка оказывает в тех случаях, когда катод работает в условиях технического вакуума (на уровне 10^{-4} Па), а напряжение в диодном промежутке составляет несколько кВ [20].

Для оценки этих эффектов авторы развили аппарат расчета и прогнозирования изменения рельефа рабочей поверхности автоэмиссионных катодов до и в процессе длительной эксплуатации. Основным этапом реализации этой цели явилось развитие количественного, научно обоснованного подхода к оценке радиационной нагрузки на автоэмиссионные катоды. При анализе формирования и эволюции рельефа рабочей поверхности автокатодов учитывались во взаимосвязи: исходная геометрия поверхности; структура материала катода и его химический состав, включая состав поверхностного слоя; парциальный состав и давление газа в рабочем объеме прибора; распределение ионов по энергиям; характеристики и параметры ионного распыления материала поверхности (значение коэффициента распыления, тип распыления — химическое или физическое, поатомное или кластерное, возможность перепыления) [21–23]. Для оценки радиационной нагрузки автоэмиссионных катодов использованы формулы работы [24], модифицированные для многоострийной, взаимноперекрывающей электронные потоки, поверхности. Оценки проведены по созданной компьютерной программе для чистого монокристаллического

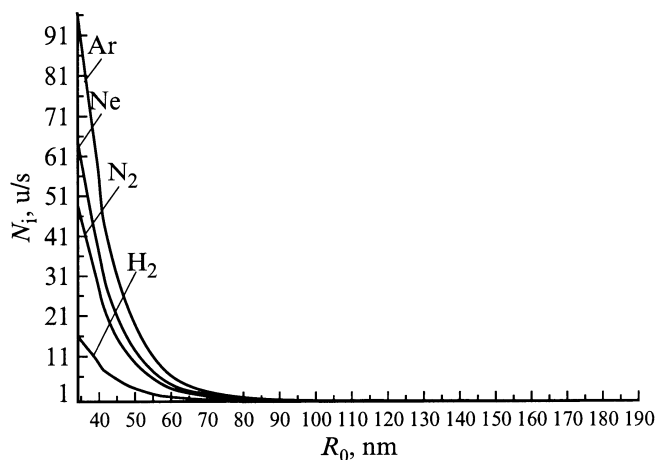


Рис. 2. Расчетные зависимости числа ударов N_i ионов в секунду о поверхность острия из углерода при давлении газа $P_0 = 10^{-4}$ Па и напряжении $V_0 = 5.0$ кВ.

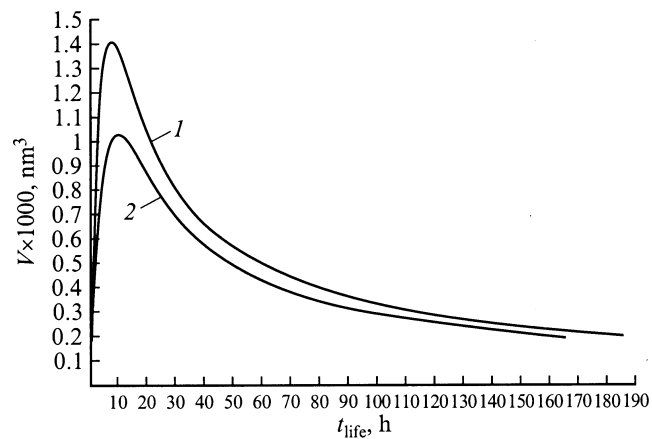


Рис. 3. Расчетные зависимости изменения распыляемого объема автоэмиссионных катодов из вольфрама (1) и углерода (2) ионами He^+ (идеальные острия). Давление газа $P_0 = 10^{-4}$ Па, напряжение $V_0 = 5.0$ кВ.

го углерода, пористого углерода, вольфрама, карбида вольфрама и окиси вольфрама, для нескольких чистых газов — H_2 , D_2 , He и Ar . В качестве примера на рис. 2 приведены расчетные зависимости числа ударов N_i ионов в секунду о поверхность единичного острия из углерода, а на рис. 3 — временные зависимости изменения распыляемого объема автоэмиссионных катодов из вольфрама и углерода ионами He . Расчеты показали, что в смысле радиационной стойкости и потерь материала катодов за счет распыления углеродные материалы не имеют каких-либо принципиальных преимуществ перед другими материалами (мы не имеем здесь в виду нанокластерные углеродные структуры [12], теоретическая оценка и экспериментальные исследования радиационных свойств которых еще впереди).

С помощью развитой в настоящей работе оригинальной экспериментальной методики (частично она изложена в [25,26]) были измерены коэффициенты распыления Y_s рассматриваемых углеродных материалов в широком энергетическом интервале. Показано, что в случае графита при максимальной энергии ионов остаточных газов $V \approx 8$ кэВ $Y_s \leq 0.5$ атом/ион, тогда как значение Y_s для случая углеродных волокон более чем на порядок выше — даже с учетом имеющего место "перепыления" атомов углерода на выступающие фрагменты рабочей поверхности. Таким образом, если в случае "массивных" графитовых катодов с развитой поверхностью распыление поверхностных атомов в течение длительного времени эксплуатации может приводить к существенному изменению рельефа поверхности и связанному с ним изменению параметров эмиссии, то в случае катодов из углеродных волокон их распыление (в том числе и кластерное) будет приводить к существенному массопереносу с катода на анод (или модулятор).

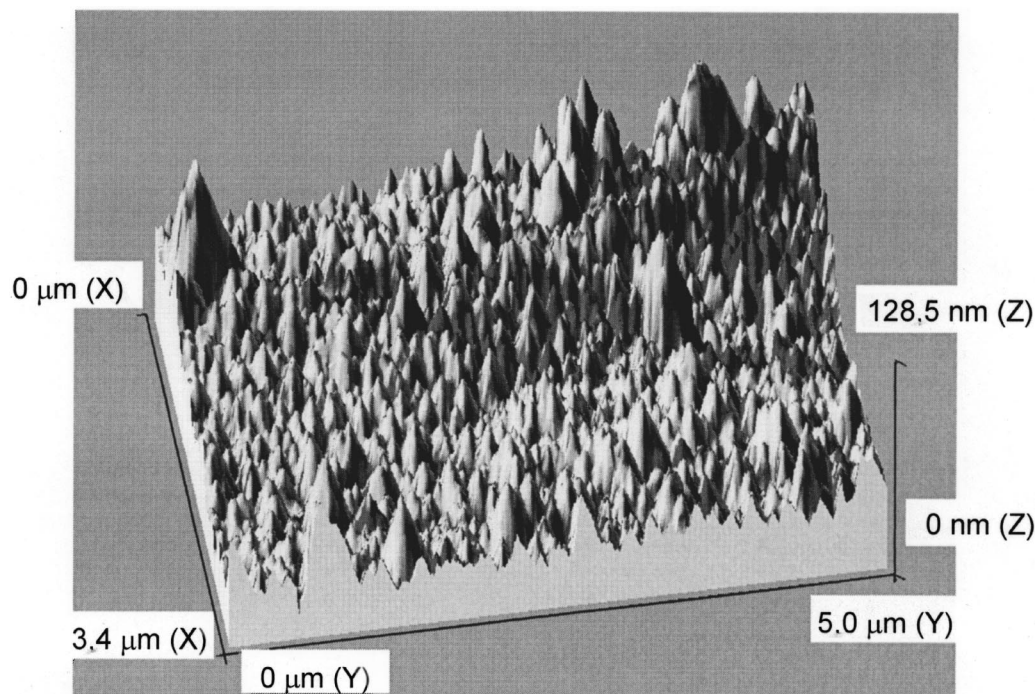


Рис. 4. СТМ изображение поверхности образца ВОПГ, подвергнутого воздействию высокоинтенсивной лазерной плазмы SiO₂.

Экспериментальные результаты: радиационные технологии при создании АЭ катодов

Как было показано в ряде недавних работ авторов [7,10], облучение массивных углеродных материалов различными частицами может быть с успехом использовано как технология создания плоских автоэмиссионных катодов с развитой поверхностью. Причем облучение может приводить как к беспорядочному развитию поверхности (см., например, рис. 4), так и к созданию периодического рельефа (рис. 5). Авторы провели детальные исследования полученного радиационным способом рельефа поверхности ВОПГ и высокопрочного реакторного графита МПГ-6 при их облучении протонами, лазерной плазмой, ионами цезия и осколками деления. В качестве метода исследования использовалась сканирующая туннельная микроскопия [27], дающая количественные оценки степени развитости поверхности на основе представлений о фрактальных размерностях [28,29]. Эксперименты проводились на работающем на воздухе сканирующем мультимикроскопе SMM-2000T (KPD Company limited, Russia). Один из результатов таких исследований, соответствующий облучению ВОПГ, приведен на рис. 6. Параллельно для каждого из облученных образцов измерялись вольт-амперные характеристики; для развитых поверхностей они качественно совпадали (типичные характеристики соответствуют приведенным в [7]). При этом токоотбор с единицы площади эмит-

тирующей поверхности возрастал с ростом величины фрактальной размерности, хотя зависимость эта не была линейной, а имела тенденцию к насыщению.

Экспериментальные результаты: снижение работы выхода

Как известно, по своим эмиссионным свойствам в первую очередь по величине работы выхода ($\varphi \approx 4.7$ eV) углеродные материалы уступают многим другим [30]. Однако характер их распыления при низкоэнергетической ионной бомбардировке, обеспечивающий динамическое поддержание развитой рабочей поверхности с набором необходимых центров эмиссии, обуславливает определенную привлекательность использования углеродных материалов в ряде автоэмиссионных катодов конкретного назначения. Кроме того, углерод — хороший вакуумный материал. Поэтому вполне логичной представляется идея снижения величины работы выхода углеродных материалов, например, за счет имплантации в него ионов другого материала, характеризующего существенно более низкой величиной φ . В настоящей работе авторы реализовали попытку снизить величину φ ВОПГ и углеродных волокон за счет имплантации в них ионов Cs ($\varphi \approx 1.80$ eV). Отметим, что в случае графита бомбардировка ионами цезия может выступать параллельно и как способ создания развитой поверхности (СТМ изображение на рис. 7). ВОПГ и углеродные волокна были облучены ионами Cs с энергией 25 eV. В первом случае облучение велось пер-

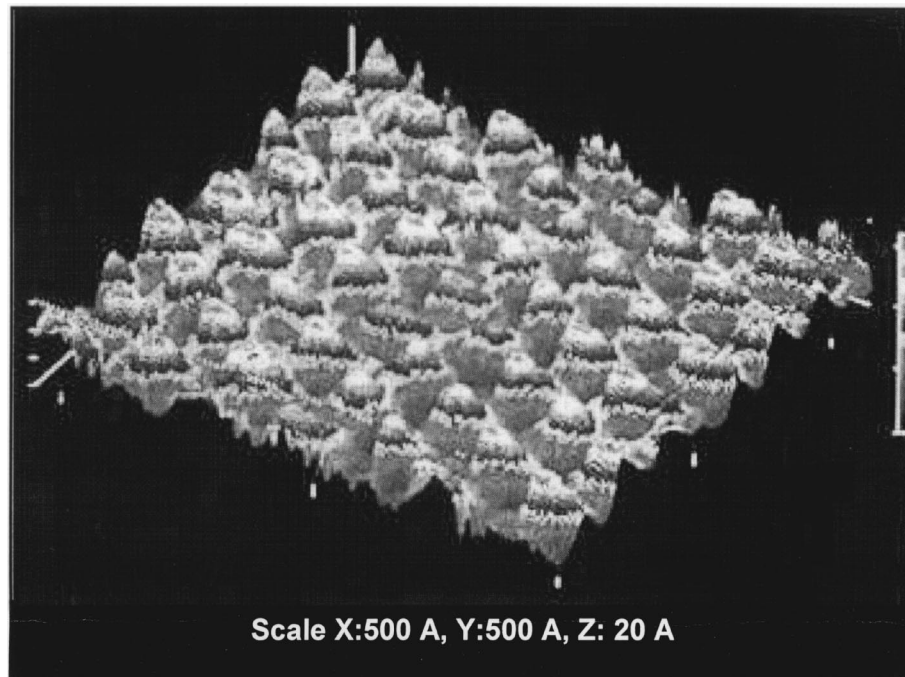


Рис. 5. СТМ изображение поверхности образца ВОПГ, облученного ионами Xe^+ с энергией 210 MeV. Образование наблюдаемого периодического рельефа зафиксировано лишь на отдельных участках поверхности образца.

пендикулярно поверхности, во втором — перпендикулярно или параллельно оси волокна. Для измерения φ была использована оригинальная методика, основанная на статистическом анализе получаемых в координатах Фаулера–Нордгейма многих вольт-амперных характеристик одного и того же образца и сравнении данных с подобными для необлученных катодов. Фактически же определялось относительное значение φ , или, что то же, уменьшение φ по отношению к исходному значению φ_0 для неимплантированного углерода. В результате проведенных измерений обнаружено снижение φ за счет имплантации Cs почти в 1.5 раза для углеродных волокон и в 2.0 раза для свежей поверхности ВОПГ. Однако в процессе генерации автоэлектронного тока эти значения, во-первых, уменьшались (величина φ возрастала) и, во-вторых, проявляли заметную нестабильность. Вполне очевидно предположить, что это связано с недостаточной энергией ионов Cs, с характером распределения ионов Cs по пробегам в углероде, а также с распылением последнего в процессе эксплуатации. По-видимому, наиболее благоприятные практические результаты можно ожидать от случая имплантации углеродных волокон ионами Cs с энергией, соответствующей среднему проективному пробегу $\bar{R} \approx d/2$, где d — диаметр волокна. В принципе же и для углеродных волокон, и для “массивных” плоских графитовых образцов возможно применение сложных многоступенчатых последовательностей имплантации, обеспечивающей относительно равномерное распределение Cs по объему материала.

Экспериментальные результаты: конструкции АЭ катодов и их эмиссионные параметры

Автоэмиссионные катоды как составную часть включают в себя и модуляторы, если таковые используются; в этих случаях говорят о катодно-модуляторных узлах в целом. Роль модуляторов и возможные конструкции катодно-модуляторных узлов обсуждались в [8]. В настоящей работе проведены детальные сравнительные анализы параметров катодно-модуляторных узлов следу-

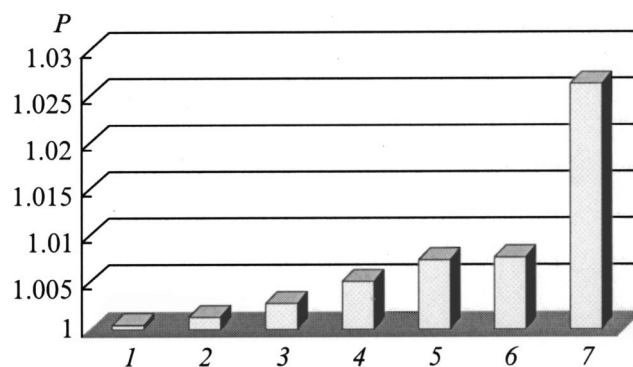


Рис. 6. Графическая иллюстрация степени развитости (величин профильной фрактальной размерности P) поверхности образцов ВОПГ, подвергнутых различным радиационным воздействиям: 1 — эталонный образец; 2 — p^+ , 3 MeV, под 90° ; 3 — p^+ , 90 keV, 45° ; 4 — осколки деления; 5 — ионы цезия, 25 keV; 6 — лазерная плазма SiO_2 ; 7 — p^+ , 90 keV, под 90° .

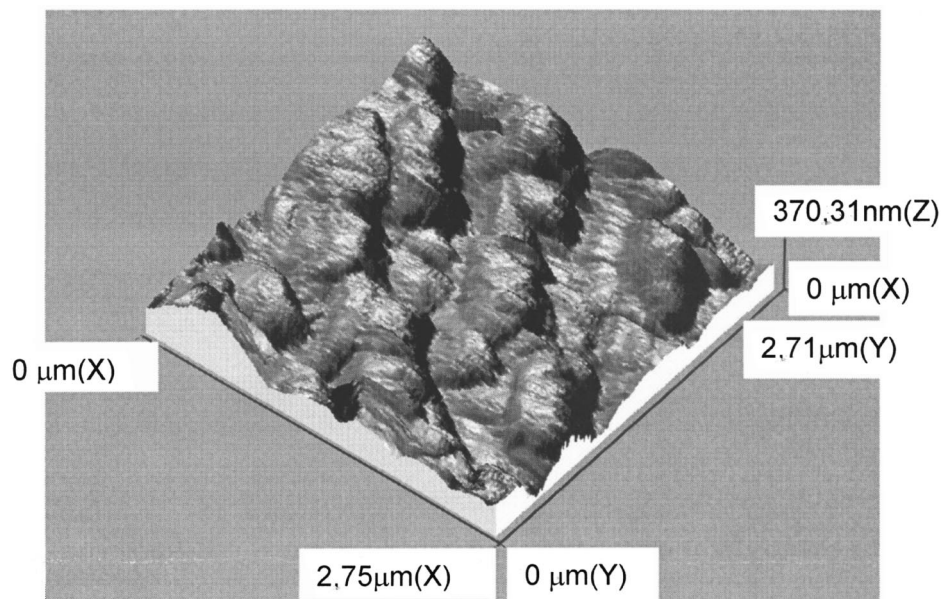


Рис. 7. СТМ изображение поверхности образца ВОПГ, подвергнутого имплантации ионами Cs^+ с энергией 25 keV.

ющих конструкций: катод — пучок углеродных волокон, модулятор — сетка (1); катод — одиночное углеродное волокно, модулятор — сетка (2); катод — одиночное углеродное волокно, модулятор — металлическая пластина с соосным волокну отверстием (3); катод — периодически закрепленные одиночные углеродные волокна, модулятор — сетка (4); катод — периодически закрепленные одиночные углеродные волокна, модулятор — металлическая пластина с отверстиями напротив каждого волокна (5); катод — одиночная вольфрамовая проволочка, модулятор — сетка (6); катод — одиночная вольфрамовая проволочка, модулятор — металлическая пластина с соосным проволочке отверстием (7); катод — периодически закрепленные одиночные вольфрамовые проволочки, модулятор — сетка (8); катод — периодически закрепленные одиночные вольфрамовые проволочки, модулятор — металлическая пластина с отверстиями напротив каждой проволочки (9); катод ВОПГ с развитой поверхностью, модулятор — сетка (10). Во всех случаях и углеродные волокна, и вольфрамовые проволочки обрезаются перпендикулярно оси и не подвергались какого-либо вида предварительного заострения.

Все измерения проводились в одних и тех же режимах, при одних и тех же потенциалах катода, модулятора и анода (разность потенциалов между катодом и анодом V_{k-a} во всех случаях составляла 6 kV). Для всех катодов был применен один и тот же режим предварительной тонировки. Давление остаточных газов во всех случаях составляло 10^{-4} Pa. Количественные результаты выполненных измерений будут обстоятельно рассмотрены в подготавливаемой сейчас отдельной работе. Здесь же мы ограничимся сообщением качественных результатов.

Прежде всего было установлено, что использование пучков углеродных волокон нецелесообразно ввиду силь-

ного разброса волокон по высоте и генерации автоэлектронного тока лишь единицами волокон в пучках, насчитывающих их десятки и сотни. Наилучшие результаты были получены для конструкции (5) катодно-модуляторного узла. Весьма неожиданным и отчасти удивительным оказалось то, что в пределах реализованных временных интервалов измерений (до 5 h) катодно-модуляторные узлы аналогичных конструкций, использующие одиночные углеродные волокна или одиночные вольфрамовые проволочки (пары узлов (2)–(6),

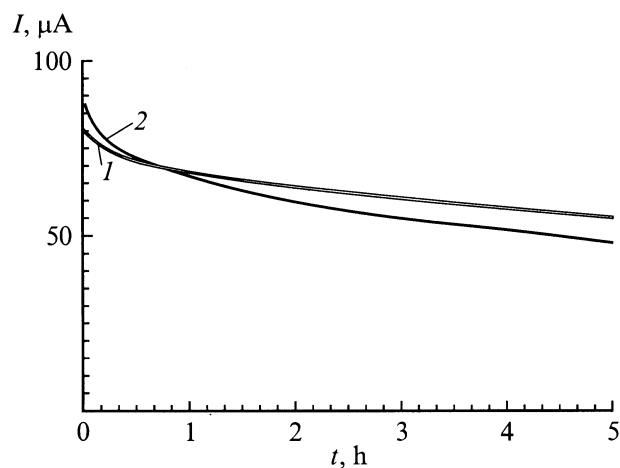


Рис. 8. Временные зависимости изменения автоэлектронного тока, эмиттируемого катодами на основе одиночного углеродного волокна (1) и одиночной вольфрамовой проволочки (2) с модуляторами — металлическими пластинами с соосными волокну и проволочке отверстиями. Специального заострения в обоих случаях не проводилось. Измерениям предшествовала тренировка катодов. Давление в вакуумной камере $P_0 = 10^{-4}$ Pa, напряжение $V_{k-a} = 6.0$ kV.

(3)–(7), (4)–(8) и (5)–(10)), показали весьма близкие характеристики. На рис. 8 приведен пример изменения автоэмиссионного тока во времени для двух конструкций катодно-модуляторных узлов — (2) и (5).

Выводы

1. Термообработка углеродных волокон при 500–600°C в атмосфере в течение времени $t \geq 10$ min обеспечивает очистку поверхности от связующих их в пучках органических веществ, не изменяя при этом структурно-фазового состояния. Наличие органических веществ на поверхности углеродных волокон способствует формированию исходной развитой рабочей поверхности за счет ионной бомбардировки, однако сильно ухудшает вакуумные условия в отпаянных стеклянных приборах.

2. Компьютерный анализ формирования и эволюции рельефа рабочей поверхности автоэмиссионных катодов с необходимостью должен учитывать во взаимосвязи исходную геометрию поверхности; структуру материала катода и его химический состав, включая состав поверхностного слоя; парциальный состав и давление газа в рабочем объеме прибора; распределение бомбардирующих ионов по энергиям; характеристики и параметры ионного распыления материала поверхности (значения коэффициентов распыления, тип распыления — физическое или химическое, поатомное или кластерное, возможность перепыления).

3. По данным компьютерных расчетов углеродные материалы не имеют каких-либо принципиальных преимуществ перед другими материалами в смысле устойчивости к низкоэнергетичной ионной бомбардировке и потерь материала катодов за счет распыления. Экспериментально установленный факт существенного возрастания коэффициента распыления при переходе от плоского графита к углеродным волокнам указывает на связанное со значительным массопереносом на анод или модулятор ограничение времени эксплуатации автоэмиссионных катодов из углеродных волокон по сравнению с катодами на основе графита с развитой поверхностью. Однако время эксплуатации последних ограничено возможным изменением рельефа и постепенным уничтожением (распылением) эмиссионных центров. Реализация же для графита кластерного распыления с неизбежностью приведет к возрастанию коэффициента распыления.

4. Для создания плоских автоэмиссионных катодов с развитой поверхностью с успехом может быть использовано радиационное воздействие. В случае применения пластин из высокоориентированного пиролитического графита радиационные технологии позволяют получить как бессистемную, так и периодически развитую поверхность. Для оценки эффективности радиационного воздействия целесообразно использовать сканирующую туннельную микроскопию с расчетом фрактальных размерностей формируемых поверхностей; как установлено,

величина этих размерностей пропорциональна достигнуемому удельному токоотбору.

5. Имплантация углеродных материалов автоэмиссионных катодов ионами Cs (или другого материала, характеризуемого существенно меньшей величиной работы выхода φ) — реализуемый путь снижения величины φ катодов. При этом выбор энергии ионов и их флюенса должен в максимальной степени обеспечивать равномерность распределения имплантируемого материала по объему катода. На практике такая имплантация может позволить снизить работу выхода углеродного материала до значений 2.5–3.0 eV.

6. Использование пучков углеродных волокон нецелесообразно ввиду значительного разброса волокон по высоте и генерации автоэлектронного тока лишь единицами волокон в пучка, насчитывающих их десятки и сотни. Наилучшие результаты дает, по-видимому, использование периодических структур одиночных волокон с модулятором — металлической пластиной с отверстиями, соосными каждому волокну.

7. По имеющейся на сегодняшний день информации, наиболее перспективным направлением создания высокоэффективных автоэмиссионных катодов является разработка технологий производства различных нанокластерных углеродных структур.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по проекту № 467-97 Международного научно-технического центра.

Список литературы

- [1] Baker F.S., Osnorn A.R., Williams J. // Nature. 1972. Vol. 239. P. 96.
- [2] Lea C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. Vol. 6. P. 1105.
- [3] Baker F.S., Osborn A.R., Williams J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. Vol. 7. P. 2105.
- [4] Углеродные волокна / Под ред. С. Симамурью. М.: Мир, 1987.
- [5] Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. // РиЭ. 1957. Т 2. № 3. С. 126.
- [6] Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Шешин Е.П. // Электронная техника, сер. 1. Электроника СВЧ. 1984. № 10. С. 44.
- [7] Суворов А.Л., Шешин Е.П., Протасенко В.В. и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 156.
- [8] Суворов А.Л., Бобков А.Ф., Зайцев С.В. и др. Препринт ИТЭФ. № 25-98. М.: ИТЭФ, 1998.
- [9] Kaftanov V.S., Suvorov A.L., Sheshin E.P. United States Patent N 5588893, December 31, 1996.
- [10] Куликов Д.В., Суворов А.Л., Суриц Р.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 14. С. 89.
- [11] Ebbesen T.W., Ajayan P.M. // Nature. 1992. Vol. 358. P. 220.
- [12] Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // УФН. 1995. Т. 165. № 9. С. 977.
- [13] Gulyaev Yu.V., Chermozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya. et al. // 7th Internat. Vacuum Microelectronics Conf. (IVMC'94). Grenoble, 1994. Revue "Le Vide, les Couches Minces". Supplement au N 271. Mars-Avril. 1994. P. 322.

- [14] *Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Gulaev Yu.V., Siniitsyn N.I.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. 1996. Vol. B14. N 3. P. 2080.
- [15] *Попов М.О., Бобков А.Ф., Зайев С.В., Карпов А.В., Скороходов Е.Н., Суворов А.Л.* // ПТЭ. 1999. В печати.
- [16] *Азарова М.Т.* // Химические волокна. 1991. № 3. С. 5.
- [17] *Pierson H.O.* Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes. Properties, Processing and Applications / Park Ridge (New Jersey): Noyes Pull, 1992.
- [18] *Бондаренко Б.В., Селиверстов В.А., Шешин Е.П.* // РиЭ. 1985. Т. 30. № 8. С. 1601.
- [19] *Шешин Е.П.* Докт. дис. М., 1996.
- [20] *Суворов А.Л.* Автоионная микроскопия радиационных дефектов в металлах. М.: Энергоиздат, 1982.
- [21] *Суворов А.Л.* Структура и свойства поверхностных атомных слоев металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [22] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. Т. 1, 2. М.: Мир, 1984, 1986.
- [23] *Беккерман А.Д., Джемилев Н.Х., Ротштейн В.М.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 6. С. 52.
- [24] *Березняк П.А., Слезов В.В.* // РиЭ. 1972. Т. 17. С. 354.
- [25] *Долин Д.Е., Сосунов А.А., Суворов А.Л., Шешин Е.П.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 115.
- [26] *Guseva M.I., Suvorov A.L., Korshunov S.N., Lazarev N.E.* // J. Nucl. Mater. 1999. Vol. 266–269. P. 222.
- [27] *Magonov S.S., Whangbo M.-H.* Surface Analysis with STM and AFM. Experimental and Theoretical Aspects of Image Analysis. West Sussex: Willey–VCH, 1995.
- [28] *Talibuddin S., Runt J.P.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. N 9. P. 5070.
- [29] *Cheblukov Yu.N., Fedotov A.S., Kozodaev M.A.* et al. // Mater. Sci. Eng. 1999. A270. P. 102–106.
- [30] *Фоменко В.С.* Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1981.