

УДК 538.975, 537.533.2

# Автоэмиссионные свойства углеродных нанотрубок и SiC вискерев, синтезированных с использованием частиц Ni, осажденных в ионных треках SiO<sub>2</sub>

А.В. Окотруб<sup>1</sup>, А.Г. Куреня<sup>1</sup>, А.В. Гусельников<sup>1</sup>, А.Г. Кудашов<sup>1,2</sup>, Л.Г. Булушева<sup>1</sup>, А.С. Бердинский<sup>2</sup>, Ю.А. Иванова<sup>3</sup>, Д.К. Иванов<sup>3</sup>, Е.А. Стрельцов<sup>3</sup>, Д. Финк<sup>4</sup>, А.В. Петров<sup>5</sup>, Е.К. Белоногов<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Россия, Новосибирск, 630090, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, просп. Карла Маркса 20, 630092 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Беларусь, Минск, 220050, Белорусский государственный университет, ул. Ленинградская, 14

<sup>4</sup>Germany, Berlin D-14109, Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy, str. Glienicker100

<sup>5</sup>Беларусь, Минск, 220072, Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси, ул. П. Бровки, 19

<sup>6</sup>Россия, Воронеж, 394026, Воронежский государственный технический университет, просп. Московский, 14

E-mail: spectrum@che.nsk.su

Поступила в редакцию: 05.04.2009

Принята в печать: 03.07.2009

Углеродные нанотрубки (УНТ) и SiC вискеры синтезированы в результате пиролиза паров ацетонитрила на наночастицах никеля, осажденных в порах, полученных при протравливании треков ионов тяжелых металлов в диэлектрических слоях SiO<sub>2</sub> на монокристаллических подложках кремния. Полученные структуры исследованы методами растровой электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света, измерены их автоэмиссионные характеристики. Обнаружено, что формирование УНТ или SiC вискерев в результате каталитического пиролиза углеводорода определяется степенью заполнения ионных треков кластерами никеля. Показано, что порог появления электронной эмиссии составляет 1 В/мкм для обоих типов образцов, различия в форме вольт-амперных характеристик объясняются различиями в электронной структуре УНТ и SiC вискерев.

## FIELD EMISSION PROPERTIES OF CARBON NANOTUBES AND SiC RODS SYNTHESIZED OVER Ni PARTICLES DEPOSITED IN THE ION TRACKS OF SiO<sub>2</sub>

Carbon nanotubes (CNTs) and SiC rods have been synthesized in the result of pyrolysis of acetonitrile vapor over Ni nanoparticles deposited in pores obtained by etching of heavy metal ion tracks in dielectric SiO<sub>2</sub> layers on the single-crystal silicon substrate. The obtained structures were studied by means of scanning electron microscopy and Raman spectroscopy and their field emission characteristics were measured. Formation of CNTs or SiC rods in the result of catalytic pyrolysis of hydrocarbon was found to be determined by the degree of ion tracks filling by nickel clusters. It was shown that threshold of electron emission appearance constitutes 1 V/μm for both types of the samples and distinguishes in the shape of current-voltage characteristics are explained by differences in the electronic structure of CNTs and SiC rods.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуально создание электронных элементов на базе наноуглеродных материалов, которые будут обладать рядом функциональных преимуществ по сравнению с традиционными полупроводниковыми материалами, в частности, будут способны работать в широком интервале температур, магнитных полей и при радиационных воздействиях [1–3]. В связи с этим возникает необходимость в разработке способов синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) и проведения исследований возможности создания на их

основе наноэлектронных приборов (полевых электронных эмиттеров, транзисторов, газовых сенсоров и т.д.). Большую привлекательность для создания таких устройств представляют гибридные системы на основе кремния и наноуглерода, объединяющие традиционную полупроводниковую технологию и новые углеродные наноматериалы, обладающие уникальным сочетанием ряда свойств (высокая прочность, электропроводность, химическая стабильность, развитая поверхность, высокое аспектное отношение) [2–4]. Одной из задач при создании подобных систем является обеспечение

селективного роста УНТ на поверхности кремниевых пластин с необходимой плотностью нанотрубок. Невысокая плотность нанотрубок в образце обеспечивает уменьшение эффекта экранирования поля и, как следствие, повышение эффективности полевых катодов в различных устройствах, таких как панельные дисплеи и рентгеновские трубки. Решение проблемы может быть достигнуто при формировании УНТ в ионных треках оксида кремния на кремниевых подложках, в местах проникновения в оксидированную поверхность кремния тяжелых ионов. Свойства такой структуры, как было показано в работах [4–6], определяются не только типом подложки и толщиной диэлектрического слоя, но и диаметром, глубиной, формой и пространственным распределением ионных треков на ее поверхности. Подобная методика позволяет создавать нанопоры, которые при определенных условиях осаждения в них катализатора могут стать точками роста УНТ.

Целью настоящей работы является изучение возможности роста УНТ в ионных треках на поверхности оксидированного кремния для разной степени заполнения пор металлом-катализатором роста УНТ и изучение автоэмиссионных характеристик полученных структур.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Основные сведения о методике приготовления исходных структур Si/SiO<sub>2</sub> с ионными треками представлены в работах [4–6]. Пластины монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5, имеющие [100] ориентацию, окислялись в атмосфере очищенного кислорода при 1100 °С в течение 10 ч, в результате чего на поверхности пластин образовывался слой оксида SiO<sub>2</sub> толщиной 0.7 ± 0.1 мкм. Облучение быстрыми тяжелыми ионами <sup>197</sup>Au<sup>26+</sup> с энергией 350 МэВ на установке VIBER (Berlin Ion Beam Exposure and Research Facility) в центре ISL (Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy, г. Берлин) с флюенсом 5·10<sup>8</sup> см<sup>-2</sup> позволило создать области локальных нарушений оксидного слоя (области повышенной дефектности), называемые латентными треками. Латентные треки в слое оксида кремния после травления в 1.35 масс. % растворе плавиковой кислоты при температуре 20 ± 1 °С в течение 40 мин принимали форму усеченных конусов со средним диаметром 150 ÷ 200 нм и глубиной 200 нм, которая, достигая поверхности кремния, соответствовала толщине слоя SiO<sub>2</sub> вследствие его пропорционального уменьшения в процессе одновременного травления с треками.

В качестве катализатора роста УНТ использовался никель, осаждаемый в нанопоры электрохимическим способом. Структура Si/SiO<sub>2</sub> с протравленными ионными треками помещалась в электрохимическую ячейку с электролитом состава 0.5 м/л Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub> + 0.5 м/л NiSO<sub>4</sub>, в которой заполнение нанопор металлом осуществлялось при потенциале рабочего электрода, равном – 1.2 В (относительно насыщенного хлорсеребряного

электрода сравнения). Отличительная особенность метода электрохимического осаждения заключается в том, что он обладает высокой селективностью, приводя к заполнению металлом лишь области пор [7, 8].

В настоящей работе представлены результаты исследования двух наиболее характерных структур, принципиально отличающихся лишь степенью заполнения ионных треков металлом. В одной серии образцов поры полностью заполнены никелем, а во второй – на 30–50 % их глубины, что достигалось варьированием времени осаждения.

Синтез азотсодержащих УНТ осуществлялся методом химического осаждения из газовой фазы (CVD метод) при температуре 800 °С и атмосферном давлении. В качестве источника углерода и азота использовался ацетонитрил (СН<sub>3</sub>СN), пары которого вводились в рабочую область реактора с потоком аргона со скоростью 150 мл/мин. Использование таких параметров синтеза позволяет получать УНТ, содержащие 1–4 % азота [9, 10].

Исследование поверхности подложек до и после проведения CVD синтеза проводилось методами растровой электронной микроскопии на микроскопе JEOL JSM-6700F и атомно-силовой микроскопии на приборе Solver P47. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) были получены на спектрометре «Tripletmate» (модель SPEX) с многоканальным детектором при возбуждении фотонами с длиной волны λ = 488 нм.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) полевой эмиссии синтезированных образцов проводилось с использованием установки, описанной в работе [11]. Регистрация ВАХ осуществлялась в диодном режиме в вакууме ~5·10<sup>-4</sup> Па при комнатной температуре. Размер образцов, тестируемых в качестве полевых катодов, составлял 5 × 5 мм<sup>2</sup>. Образцы со стороны кремниевой подложки приклеивались токопроводящей двухсторонней углеродной лентой к катоду. Измерения проводились при двух расстояниях от подложки до плоского молибденового анода 500 и 1000 мкм. Зависимость величины туннельного тока от электрического поля измерялась при приложении пилообразного напряжения до 1200 В с частотой 0.1 Гц.

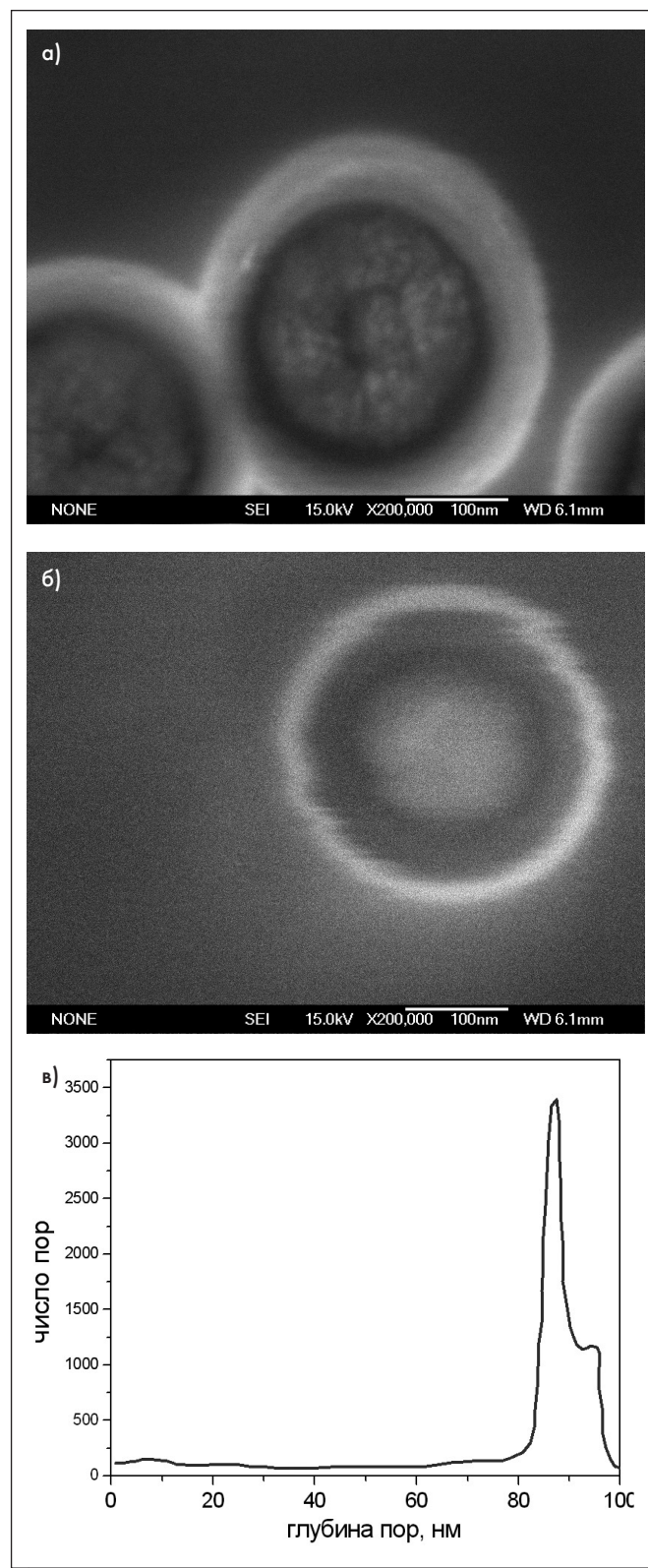
#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

До проведения CVD синтеза поверхность подложек с треками, частично или полностью заполненных никелем, была исследована методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии (рис. 1). После травления ионных треков поры на поверхности SiO<sub>2</sub> имели форму правильных окружностей диаметром 150–200 нм, характерное расстояние между порами составило ~1 мкм. Изображение на рис. 1а показывает, что электрохимическое осаждение никеля при частичном заполнении поры происходит с образованием кристаллитов размером ~50 нм, имеющих сравнительно слабый контакт между собой. При полном заполнении поры особенности в структуре поверхности частицы никеля не выявлены (рис. 1б). Контроль осаждения

никеля в порах осуществляется с высокой степенью контроля степени заполнения. На *рис. 1в* представлена гистограмма, построенная по результатам обработки данных атомно-силовой микроскопии, подтверждающая, что расстояние от частицы никеля до поверхности  $\text{SiO}_2$  имеет узкое распределение для заполненных пор. Следовательно, при электрохимическом процессе поры заполняются никелем примерно на одну и ту же глубину.

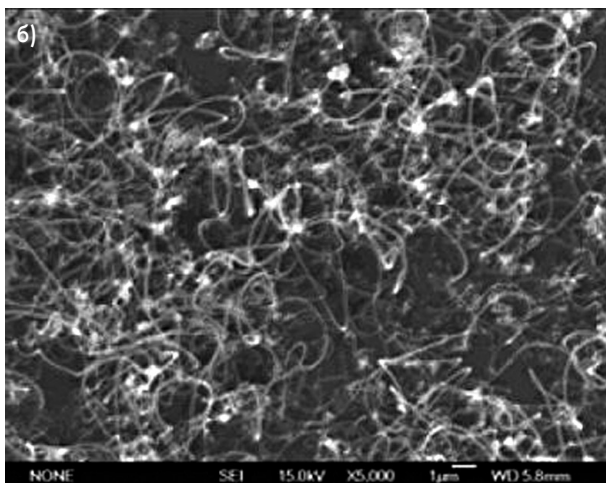
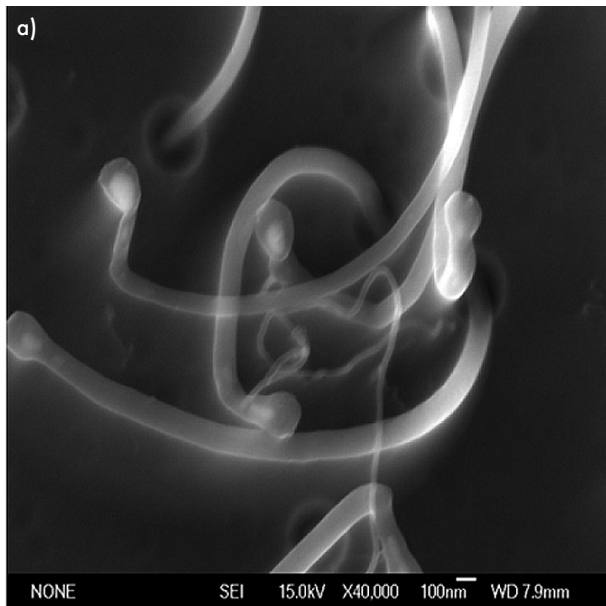
Исследование образцов, синтезированных на поверхности подложек методом CVD, показало, что процесс формирования углеродсодержащих структур на частицах никеля осуществляется по-разному для образцов с различной степенью заполнения пор металлом. На подложках с частично заполненными никелем порами образовался слой нанотрубок длиной  $\sim 10$  мкм и диаметром  $\sim 50$  нм (*рис. 2а*). Электронно-микроскопическое исследование поверхности точки роста показало, что, как правило, каждая пора инициирует рост одной нанотрубки, однако, примерно в 20 % случаев из одной поры вырастает 2 или 3 нанотрубки. Кроме того, около 10 % пор остались неактивными в синтезе. Полученные УНТ не являются прямыми, а представляют изогнутые, переплетенные друг с другом структуры. Такой результат свидетельствует о вершинном механизме роста нанотрубки, когда металлическая наночастица-катализатор отрывается от поверхности образца. При этом рост нанотрубок происходит в газовой фазе, что приводит к их изгибу в ту или иную сторону по отношению к поверхности  $\text{SiO}_2$ . Ранее использование нами в качестве катализатора наночастиц железа, осажденных на окисленных кремниевых подложках, приводило к корневому росту УНТ и, как следствие, взаимному ориентированию нанотрубок перпендикулярно поверхности подложки [12]. Для того чтобы убедиться в реализации вершинного роста УНТ, был проведен CVD синтез образца в течение 15 мин. В результате синтеза на поверхности подложки сформировались короткие УНТ длиной  $\sim 2$  мкм и диаметром  $\sim 50$  нм (*рис. 2б*). Малая длина УНТ позволили зафиксировать изображение от поры до кончика нанотрубки, на котором видны округлые образования. Эти образования на конце УНТ являются с наночастицами никеля, поскольку, при энергии электронного пучка микроскопа 15 кэВ, металлические частицы под тонким слоем углерода проявляются в виде ярких светлых пятен. Характерный размер наночастиц металла-катализатора составляет  $\sim 50$  нм и соответствует размеру отдельных кристаллитов никеля внутри поры. В результате термолитиза ацетонитрила одна из частиц никеля, возможно, центральная, не имеющая контакта с оксидом кремния, отрывается от подложки, что и приводит к росту УНТ. Отрыв двух металлических кластеров обеспечивает одновременный рост двух нанотрубок из одной поры.

Иная картина наблюдается при использовании в CVD процессе  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  подложек, поры которых полностью заполнены никелем. Проведение синтеза



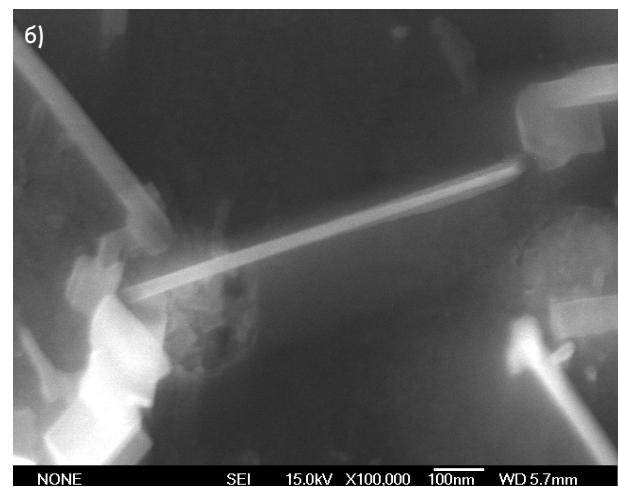
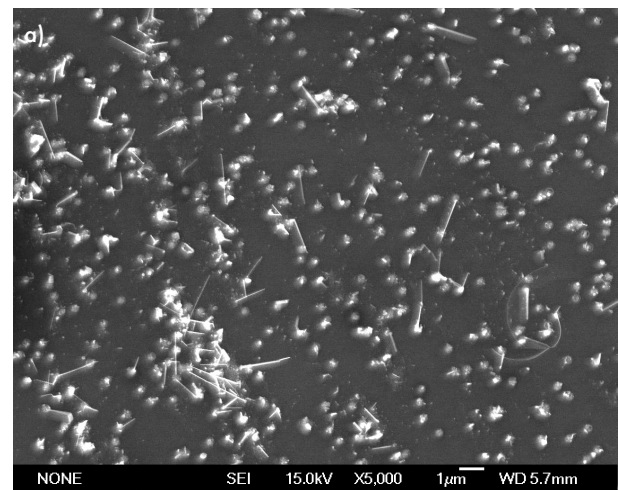
**РИСУНОК 1** | Сканирующие электронно-микроскопические изображения пор на поверхности  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ , частично (а) и полностью (б) заполненных никелем. Гистограмма распределения глубины заполнения пор никелем (в), построенная по данным атомно-силовой микроскопии

в течение 1 ч привело к образованию на поверхности подложек прямых и коротких наноструктур (*рис. 3а*), сильно отличающихся от полученных при тех же условиях синтеза УНТ (*рис. 2а*). При большем увеличении



**РИСУНОК 2** | Сканирующее электронно-микроскопическое изображение УНТ, сформировавшихся на подложке Si/SiO<sub>2</sub> с порами, частично заполненными никелем, в результате CVD синтеза в течение 1 ч (а) и 15 мин (б)

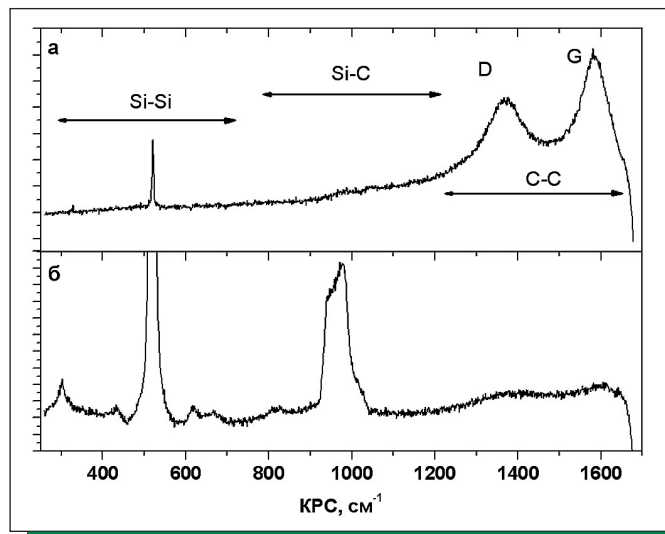
видно, что полученные наноструктуры являются монокристаллическими вискерами субмикронной длины и с характерным поперечным размером 10 нм (рис. 3б). Известно, что при определенных условиях наночастицы никеля могут катализировать синтез SiC вискером [13]. Можно предположить, частица никеля, прочно связанная с поверхностью поры и имеющая однородную кристаллическую структуру, не может служить катализатором вершинного роста УНТ. Образование вискером может быть связано как с насыщением частиц никеля углеродом в результате термолитиза ацетонитрила, так и с частичным растворением кремния в частице никеля. Неравномерный процесс поступления кремния в никелевую частицу может являться причиной образования тонких и относительно коротких SiC вискером. Преимущественное формирование вискером на грани-



**РИСУНОК 3** | Сканирующие электронно-микроскопические изображения SiC вискером, сформировавшихся на подложке Si/SiO<sub>2</sub> с порами, полностью заполненными никелем, в результате CVD синтеза в течение 1 ч: (а) меньшее увеличение, (б) большее увеличение

це поры (рис. 3б) предполагает, что лимитирующей стадией их роста является диффузия кремния по границе никелевой частицы.

Продукты синтеза, образовавшиеся на поверхности Si/SiO<sub>2</sub>/Ni подложек с разной степенью заполнения пор, были исследованы методом КРС-спектроскопии. Для системы кремний-углерод характерны три области частот в исследуемом диапазоне. Частоты в интервалах 100–700 см<sup>-1</sup> и 700–1100 см<sup>-1</sup> традиционно относятся к колебаниям Si-Si и Si-C связей соответственно, а в области 1200–1700 см<sup>-1</sup> проявляются колебания атомов углерода. В спектре образца с неполным заполнением никелем линия при 520 см<sup>-1</sup>, относящаяся к колебаниям кремния, является слабой (рис. 4). Наиболее интенсивными являются линии при 1367 см<sup>-1</sup> (D мода) и 1582 см<sup>-1</sup> (G мода), соответствующие колебаниям углерода, образующего слои УНТ [14]. Этот спектр является типичным для многослойных нанотрубок, получаемых CVD методом, а относительная интенсивность D и G мод используется как параметр, характери-



**РИСУНОК 4** | КРС спектры синтезированных образцов: (а) УНТ, (б) Si-C висеры

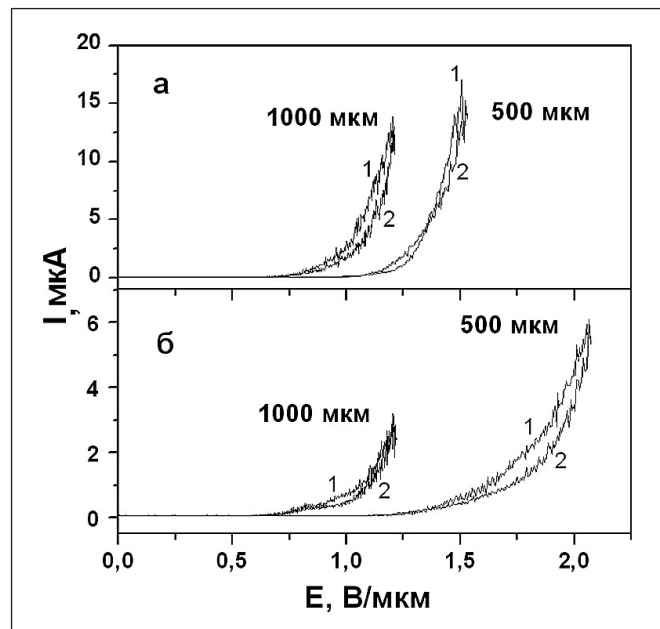
зующий дефектность графитовой сетки [14]. В спектре образца с полностью заполненными никелем порами линия, относящаяся к колебаниям кремния, доминирует, что связано с низкой концентрацией вискеро́в на поверхности подложки. Формирование SiC наноструктур подтверждает наличием в КРС спектре образца фононных мод при  $815$  и  $966 \text{ см}^{-1}$  [15, 16].

ВАХ полевой эмиссии обоих типов образцов представлены на *рис. 5*. Несмотря на то, что в образце, содержащем УНТ, трубки не являются ориентированными перпендикулярно поверхности, катод показал довольно низкие значения напряженности поля, при котором возникает эмиссионный ток (*рис. 5а*). Низкие пороговые поля обеспечиваются двумя параметрами, а именно, довольно большими расстояниями между нанотрубками, уменьшающими эффект экранирования [17], и наличием азота в структуре УНТ [18]. Очень неплохие автоэмиссионные свойства продемонстрировал и образец, состоящий, главным образом, из вискеро́в SiC (*рис. 5б*). Карбид кремния является полупроводником, однако в случае вискеро́в может обладать достаточно хорошей поверхностной проводимостью. Действительно, величина эмиссионного тока, зафиксированного в этом случае, всего в 4 раза меньше, чем для образца, состоящего из УНТ. Сравнение ВАХ образцов при межэлектродных расстояниях 500 и 1000 мкм выявило, что при меньшем расстоянии величина порогового поля увеличивается. Причиной зависимости порогового поля от межэлектродного расстояния является изменение фактора усиления поля [19]. Максимальная величина коэффициента усиления определяется аспектным отношением длины нанотрубки к ее диаметру для одиночных УНТ или имеет более сложную зависимость для массива нанотрубок из-за их взаимного экранирования [20]. Наиболее адекватными для описания автоэмиссионных процессов являются характеристики, полученные при больших расстояниях, когда зависимость порогового поля от межэлек-

тродного расстояния достигает максимума и выходит на насыщение. Для обоих образцов полученные значения порогового поля являются приблизительно одинаковыми. Можно предположить, что малая величина аспектного отношения для SiC вискеро́в по сравнению с нанотрубками компенсируется несколько меньшей работой выхода электронов из карбида кремния.

Зависимости ВАХ автоэмиссионного тока, измеренные на возрастающей и спадающей ветвях пилообразного напряжения, продемонстрировали наличие гистерезиса даже при частоте 0.1 Гц. Появление гистерезиса может быть обусловлено процессами десорбции остаточных газов с поверхности УНТ [21]; наиболее часто к таким молекулам относят молекулы, обладающие дипольным моментом  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  и др. [22]. Наличие гистерезиса в виде восьмерки, который наблюдается для образца с УНТ при расстоянии 500 мкм, свидетельствует о наличии как минимум двух механизмов десорбции молекул. Действительно, появления автоэмиссионного тока сопровождается термоионными процессами. Вблизи порога появления тока электроны имеют возможность туннелирования с конца нанотрубки на адсорбированную молекулу, что приводит к появлению тока отрицательных ионов [23]. При более высоком значении приложенного напряжения в результате протекания тока через нанотрубку происходит ее омический разогрев, что вызывает десорбцию газов с поверхности нанотрубки. Каждая молекула, адсорбированная на поверхности УНТ или вискера SiC, обеспечивает модификацию их электронной структуры, сопровождающейся перераспределением электронной плотности, что изменяет работу выхода наночастиц.

Следует отметить различия в зависимостях ВАХ



**РИСУНОК 5** | Вольтамперные характеристики автоэмиссионного тока образцов (а) УНТ и (б) SiC вискеро́в, измеренные при межэлектродных расстояниях 500 и 1000 мкм. Кривые 1 и 2 соответствуют измерениям при увеличении и уменьшении пилообразного напряжения

исследованных образцов, которые могут быть связаны с особенностями электронного строения SiC вискеро́в и УНТ. В частности, ВАХ вискеро́в начинается с экспоненциального роста, затем имеет слабый перегиб в полях 0.8 В/мкм и снова переходит в экспоненциальный рост, что может быть связано с неоднородным распределением вискеро́в по размеру в образце. Гистерезис эмиссии на вискерах значительно меньше, чем на нанотрубках, что может свидетельствовать о различии химического взаимодействия молекул адсорбата с наноструктурами, а также о различной степени влияния этих взаимодействий на электронные свойства исследуемых объектов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что структуры Si/SiO<sub>2</sub> с ионными треками в диэлектрике, заполненными никелем, могут быть использованы для синтеза УНТ и монокристаллических вискеро́в SiC с контролируемой плотностью наноструктур в образце. Установлено, что для осуществле-

ния синтеза УНТ необходимы условия реализации вершинного механизма роста. При этом каталитический синтез нанотрубок из пор возможен при неполном их заполнении металлом-катализатором. В противном случае осуществляется рост вискеро́в SiC по корневому механизму роста. Продемонстрирована высокая эффективность полевой эмиссии полученных образцов, порог эмиссии для которых составил менее 1 В/мкм. Различия в форме ВАХ образцов могут быть обусловлены разной работой выхода УНТ и SiC вискеро́в, а также различной степенью влияния адсорбированных газов на электронное состояние этих наноструктур. ■

*Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н.*

*С.Е. Демьянову за обсуждение полученных результатов и к.х.н. В.С. Даниловичу за проведение электронно-микроскопических исследований.*

*Работа поддержана РФФИ (грант № 08-03-90027-Бел), Программой «Развитие потенциала высшей школы» (проект № 2.1.2/5257) и БРФФИ (грант № Ф08Р-077).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonard J.-M., Kind H., Stöckli T., Nilsson L.-O. // Solid-State Electron. 2001. V. 45. P. 893.
2. Lin Y.-M., Appenzeller J., Knoch J., Avouris P. // IEEE Trans. Nanotechnology. 2005. V. 4. P. 481.
3. Jang Y.-T., Choi C.-H., Ju B.-K. et al. // Thin Solid Films. 2003. V. 436. P. 298–302.
4. Berdinsky A.S., Alegaonkar P.S., Lee H.C. et al. // NANO: Brief Rep. Rev. 2007. V. 2. № 1. P. 59.
5. Fink D., Petrov A.V., Hoppe K. et al. // Nuclear Instr. Meth. B. 2004. V. 218. P. 355.
6. Hoppe K., Fahrner W.R., Fink D. et al. // Nuclear Instr. Meth. B. 2008. V. 266. № 8. P. 1642.
7. Ivanov D.K., Streltsov E.A., Fedotov A.K. et al. // Thin Solid Films. 2005. V. 490. P. 154.
8. Ivanova Yu.A., Ivanou D.K., Fedotov A.K. et al. // J. Mat. Sci. 2007. V. 42. P. 9163.
9. Ewels C.P., Glerup M. // J. Nanosci. Nanotechnol. 2005. V. 5. P. 1.
10. Bulusheva L.G., Okotrub A.V., Kinloch I.A. et al. // Phys. Stat. Sol. (b) 2008. V. 245. № 10. P. 1971.
11. Okotrub A.V., Булушева Л.Г., Гусельников А.В. // Журн. эксп. теорет. физики. 2004. Т. 126. Вып. 6. С. 1425.
12. Okotrub A.V., Булушева Л.Г., Кудашов А.Г. и др. // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 3–4. С. 28.
13. Kuznetsov V.L., Usoltseva A.N., Mazov I.N. // Fullerenes, Nanotubes, Carbon Nanostruct. 2005. V. 13. P. 121.
14. Afre R.A., Soga T., Jimbo T. // Chem. Phys. Lett. 2005. V. 414. P. 6.
15. Makowska-Janusik M., Kassiba A., Bouclé J. // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. V. 17. P. 5101.
16. Shi W., Zheng Y., Peng H. et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2000. V. 83. № 12. P. 3228.
17. Milne W.I., Teo K.B.K., Amaratunga G.A.J. et al. // J. Mater. Chem. 2004. V. 14. P. 933.
18. Okotrub A.V., Bulusheva L.G., Belavin V.V. et al. // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2006. V. 14. P. 151.
19. Smith R.C., Cox D.C., Silva S.R.P. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 103112.
20. Kim D., Bourée J.E., Kim S.Y. // Appl. Phys. A. 2006. V. 83. P. 111.
21. Liu C., Cutshaw C., Tzeng Y. // in Proceed. Sixth Appl. Diam. Conference/Second Frontier Carbon Technol. Conference (ADC/FCT 2001) P. 742.
22. Milne W.I., Teo K.B.K., Lansley S.B. et al. // Molecular Nanostructures, Eds. H. Kuzmany, J. Fink, M. Mehring, S. Roth, AIP Conference Proceedings. Melville, New York. 2003. V. 685. P. 605.
23. Okotrub A.V., Guseľ'nikov A.V., Kudashov A.G. et al. // Phys. Stat. Sol. (b). 2006. V. 243. № 13. P. 3510.