

вод, что наблюдаемые общие закономерности в свойствах исследованных образцов свидетельствуют о едином механизме низкополевой электронной эмиссии из нанокристаллических пленок. Было предположено, что электроны переносятся из пленки в вакуум через специфическую область, расположенную на конце узкого проводящего канала между непроводящими кристаллитами. Электронные свойства этой области, вследствие проявления в ней квантово-размерного эффекта, отличаются от свойств объема материала. При этом роль основного вещества (непроводящей фазы) сводится к удержанию проводящих каналов в теле эмиттера, а также отводу тепла из области ЭЦ.

Разработанная измерительная процедура исследований центров полевой электронной эмиссии из наноструктурированных материалов с помощью специального СТМ-прибора — сканирующего туннельного-полевого эмиссионного микроскопа позволяет получить комплексные данные о микроскопических свойствах материала эмиттера: рельефе поверхности, распределении ПЭЭ (положении и интенсивности ЭЦ), поверхностном потенциальном барьере электронов, локальной электропроводности. Как показано на примере нанокристаллических алмазных пленок, сравнение этих данных с данными макроскопических исследований ПЭЭ позволяет выявить ряд общих закономерностей ПЭЭ их наноструктурированных материалов.

Список литературы

1. Frolov V. D., Karabutov A. V., Konov V. I., Pimenov S. M., Prokhorov A. M. Scanning tunneling microscopy: application to field electron emission studies // *J. of Physics D: Applied Physics*. 32 (1999). P. 815—819.
2. Karabutov A. V., Frolov V. D., Pimenov S. M., Konov V. I. Grain boundary field electron emission from CVD films // *Diamond and Related Materials*, 8 (1999). P. 763—767.
3. Frolov V. D., Karabutov A. V., Pimenov S. M., Obratsova E. D., Konov V. I. Application of scanning tunneling microscopy for investigations of field electron emission from nanoscale diamond films // *Ultramicroscopy*. 79 (1999). P. 209—215.
4. Frolov V. D., Karabutov A. V., Pimenov S. M., Konov V. I. Electronic properties of the emission sites of low-field emitting diamond films // *Diamond and Related Materials*. 9 (2000). P. 1196—1200.

УДК 621.385.833

В. В. Минаев, канд. физ.-мат. наук, ОАО "Ангстрем";
В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, Московский государственный институт электронной техники (технический университет);
В. И. Петрик, академик РАЕН, ЗАО НИИ Физики фуллеренов и новых материалов

НАНОТРУБКИ ИЗ УГЛЕРОДНОЙ СМЕСИ ВЫСОКОЙ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ

Нанотрубки из углерода вызывают несомненный интерес для создания элементной базы нанoeлектроники. Одним из источников нанотрубок может являться углеродная смесь высокой реакционной способности.

В технологии создания элементной базы нанoeлектроники наметился существенный прогресс, связанный с использованием нанотрубок как достаточно совершенных квантовых проводов. Синтезированные нанотрубки переносят на поверхность матричного кристалла и далее размещают и закрепляют между выбранными проводящими электродами, как правило, с помощью зонда атомно-силового микроскопа. В результате созданы действующие макеты нанодиодов, нанотранзисторов и даже логической компьютерной схемы [1, 2].

Успех в создании элементной базы нанoeлектроники с углеродными нанотрубками зависит от владения технологией изготовления нанотрубок, их осаждения на поверхность подложки и перемещения по поверхности к заданной паре электродов, умения создать электрический контакт между электродами и нанотрубкой. Необходимо еще овладеть технологией разрезания нанотрубок, их выпрямления и изгиба на поверхности подложек.

Физика нанотрубок сама по себе чрезвычайно интересна. Для целей электроники важно то, что нанотрубки могут быть изготовлены не только из углеродных материалов, но и, в частности, из кремния. Это, в конечном счете, может привести к замене объемного монокристаллического кремния. В связи с этим актуальным остается вопрос изготовления нанотрубок или поиск материалов, являющихся носителями нанотрубок. Заметим, что углеродные волокна с поперечными размерами 6—10 мкм широко используются в промышленности, в частности, для армирования различных материалов.

В этой статье мы представляем результаты исследования материала, который может являться источником углеродных нанотрубок. Нас привлек-

ла своим видом "вата" из углеродной смеси высокой реакционной способности (УСВР) [3, 4]. Она изготавливается методом холодной деструкции из природного графита и представляет собой наноконструкции с содержанием углерода 99,4 %, насыпной плотностью 0,01 г/см³ и чрезвычайно развинутой поверхностью.

Были проведены исследования спектров комбинационного рассеяния света (КРС) образцов материалов УСВР на спектрометре U-1000 Jobin Yvon (г. Троицк, Институт спектроскопии РАН). Для возбуждения использовалось излучение 514,5 нм аргонового лазера, которое фокусировалось в пятно диаметром до 20 мкм, что давало возможность наводить это пятно на однородный участок исследуемой фазы и контролировать отсутствие влияния теплового воздействия лазерного луча на образец. При исследовании спектров КРС, являющихся, по сути, спектрами собственных частот колебаний исследуемой фазы, были идентифицированы микрокристаллы монокристаллического графита после сравнения с наиболее известными спектрами модификаций углерода. Однако совершенство микрокристаллов было различно у разных образцов. Это обнадежило, поскольку пики монокристаллов и нанотрубок слабо различаются, а пик фуллеренов заметно отстоит от них.

Далее проводились топографические исследования образцов УСВР на атомно-силовом микроскопе Solver P-47 компании НТ-МДТ. В качестве подложек выбирались стандартные кремниевые пластинки, на которых находилась аморфная пленка титана толщиной 10 нм и подложки из полупроводящего арсенида галлия. УСВР на подложку высаживалась из сильно разбавленной вод-

ной взвеси, далее после высушивания проводилось топографирование поверхности образцов. На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) показана топография углеродных нанотрубок на поверхности титановой пленки. Трубки имеют высоту на подложке не более 4 нм. Ширина трубок превышает высоту в несколько раз, даже с учетом поправок, вызванных несовершенством топографирования вертикальных стенок обычным кантилевером. Такое возможно, если трубки при адсорбции на подложке деформируются. На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) представлен фрагмент углеродной нанотрубки при более высоком разрешении. Можно видеть неоднородную структуру трубки, что по литературным данным свидетельствует о химическом воздействии, возможно, в процессе синтеза трубок при производстве УСВР. Топография, представленная на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), интересна тем, что, наряду с нанотрубками, наблюдаются кольцевые структуры, как на титановых пленках, так и на полупроводящем арсениде галлия.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что после решения проблем отделения нанотрубок от сопутствующих углеродных фрагментов УСВР может явиться одним из источников нанотрубок.

Список литературы

1. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors / R. Matrel, T. Schmit, H. R. Shea, Ph. Avoris // Applied Physics Letters. 1998. Vol. 73. P. 2447–2452.
2. <http://www.research.ibm.com/resources/press/logic/circuit>.
3. Патент RU 2128624S1, автор Петрик В. И., приоритет от 17.10.97. Способ получения углеродной смеси высокорекреационной способности и устройство для его осуществления
4. <http://www.xweb.ru/npk/index.htm>.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Подсчет отдельных электронов в углеродной нанотрубке

Зондируя одностеночные углеродные трубки атомно-силовым микроскопом, исследователи Cornell University нашли новые возможности разрезания и изгибания нанотрубок. Они также научились определять силу действия одного электрона, когда он влетает и вылетает из трубки. Это исследование обещает миниатюризацию электронных схем.

Углеродные нанотрубки — крошечные цилиндры, которые представляют собой атомы углерода,

организованные в гексагональную структуру. Каждый атом углерода связан со своими соседями тремя валентными электронами, оставляя один электрон свободным. Валентный электрон позволяет нанотрубкам проводить электричество. Типичная нанотрубка составляет несколько нанометров в диаметре и несколько микрометров в длину.

Углеродные нанотрубки могут быть очень хорошими проводниками электричества, которые не нагреваются, когда по ним протекает электрический ток. Электроны могут проходить только прямо по всей трубке, причем в направлении параллельно трубке, а не под различными углами как, например, в медном проводе. Иными словами, они