

## ИЗУЧЕНИЕ НАНОТРУБОК С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННельНОГО МИКРОСКОПА

*С. В. Антоненко\**, *О. С. Малиновская*, *С. Н. Мальцев\*\**

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)  
115409, Москва, Россия*

Методом токового отжига в вакууме получены образцы графитовой бумаги, содержащие многостенные углеродные нанотрубки. С помощью сканирующего туннельного микроскопа исследованы структурные свойства модифицированной графитовой бумаги. Были обнаружены X-, Y- и V-образные нанотрубки.

PACS: 61.46.Fg, 68.37.Ef

Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) довольно прост, но кардинально отличается от иных методик, применяющихся в физике поверхности. Он основан на хорошо известном в квантовой механике принципе туннелирования электронов через диэлектрический барьер в системе металл–диэлектрик–металл (полупроводник). В данной работе использовался нанотехнологический комплекс (НТК) «Умка», предназначенный для изучения поверхностей материалов и проведения широкого класса исследовательских работ в области нанотехнологии. НТК «Умка» прост в освоении, имеет встроенную систему виброизоляции и специальную систему сохранения зондов, что позволяет получать данные с высокой достоверностью и использовать комплекс в реальных условиях учебного процесса или в исследовательской лаборатории без применения специальных мер по виброизоляции и электромагнитной совместимости. Высокие термостабильность и собственная резонансная частота конструкции, оригинальная схема входного каскада усилителя туннельного тока, работающая с пикоамперными токами в полосе частот до 100 кГц, позволяют исследовать биологические и слабо проводящие объекты без дополнительных технологических операций (запыление металлом и т. п.). Основные технические характеристики НТК «Умка» представлены в таблице.

Известен способ получения углеродных нанотрубок из графитовой бумаги в потоке этилена в хи-

Основные технические характеристики НТК «Умка»

Габариты блока сканирования, мм	210 × 210 × 120
Габариты блока электроники, мм	135 × 300 × 260
Вибрационная изоляция	встроенная
Размер образца, мм	7 × 7 × 10
Сканирование	зондом
Диаметр зонда, мм	0.5
Область сканирования, мкм	7 × 7
Максимальное число точек сканирования	65535 × 65535
Диапазон токов СТМ	10 пА–50 нА
Разрешение по $x, y$ , нм	0.02
Разрешение по $z$ , нм	0.01

мическом реакторе [1]. Суть метода заключается в нанесении на графитовую бумагу силикагеля, содержащего катализаторы (Ni–Co и Fe), помещении ее в реактор, где происходит нагрев образца в потоке смеси газов, содержащей этилен в химическом реакторе, что приводит к образованию нанотрубок.

Недостатком этого способа является использование химического реактора, так как водород и этилен, входящие в смесь рабочих газов, являются взрыво-

\*E-mail: SVAntonenko@email.mephi.ru

\*\*E-mail: snm\_work@mail.ru

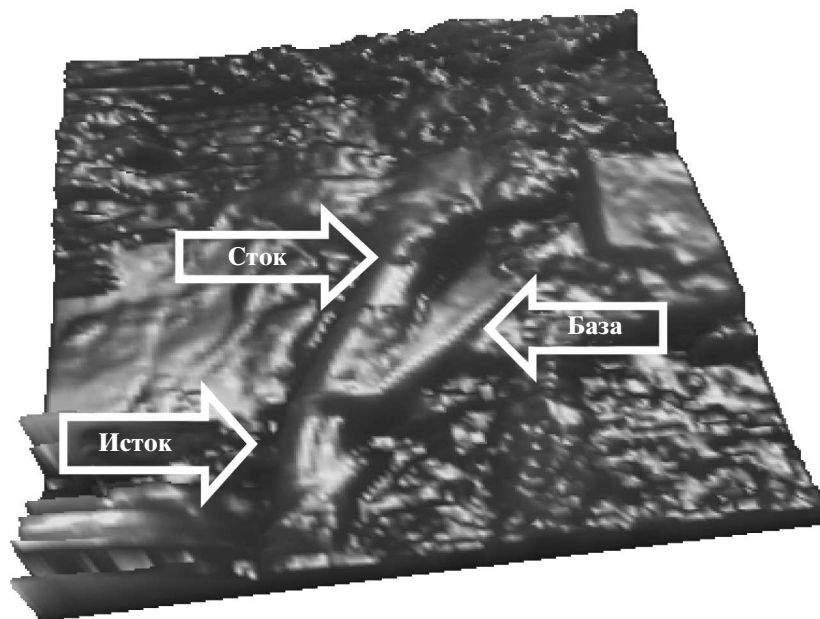


Рис. 1. Трехмерное СТМ-изображение поверхности графитовой бумаги с Y-образной нанотрубкой. Область сканирования:  $0.63 \text{ мкм} \times 0.63 \text{ мкм} \times 0.67 \text{ нм}$

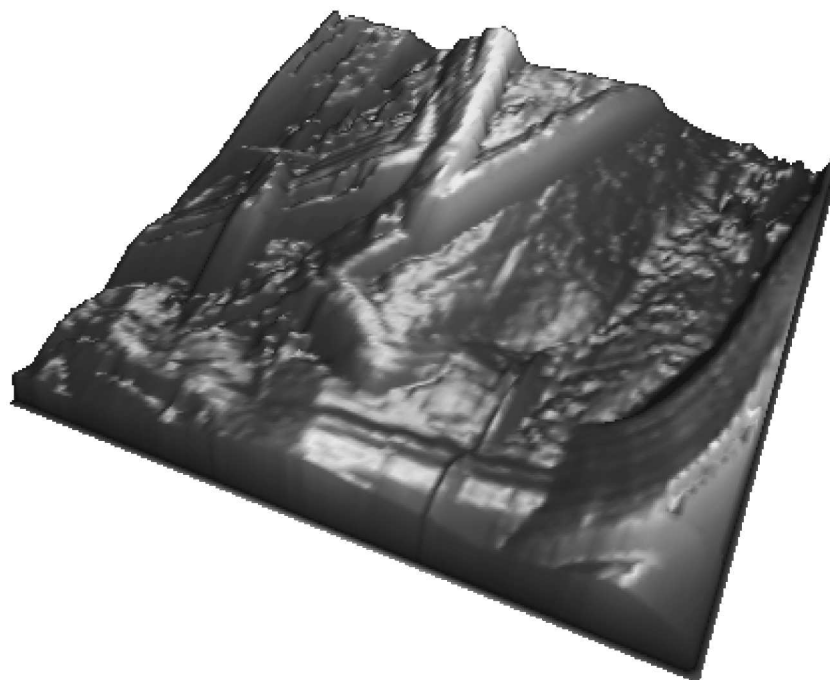


Рис. 2. Трехмерное СТМ-изображение поверхности графитовой бумаги с V-образной нанотрубкой. Область сканирования:  $2.00 \text{ мкм} \times 2.00 \text{ мкм} \times 0.80 \text{ нм}$

опасными. К тому же, углеродные нанотрубки, получаемые известным способом, содержат множество дефектов и ограничены диаметром 10–30 нм.

Нами был разработан новый метод, в котором модификация графитовой бумаги с помощью токового отжига с предварительным нанесением силикагеля проводится при температурах 650–750 °С и давлении  $(1-5) \cdot 10^{-5}$  Торр в остаточной атмосфере инертного газа.

Данный способ был реализован с помощью вакуумной установки УРМ-3М. Предварительно брали графитовую бумагу разных толщин и плотностей. На графитовую бумагу наносили силикагель, содержащий нитрат железа, и сушили при комнатной температуре. Таким образом, получали тонкий слой силиката с равномерным распределением нитрата железа на графитовой бумаге, которая затем помещалась в вакуумную установку, и создавалось давление  $10^{-5}$  Торр. Далее происходил последовательный отжиг графитовой бумаги в остаточной атмосфере инертного газа. При достижении температуры 650 °С начиналось образование углеродных нанотрубок. Через несколько минут происходило насыщение и рост нанотрубок прекращался.

На образцах, полученных с использованием Fe-катализатора, были обнаружены Y-, X- и V-образные нанотрубки, которые могут являться прототипами различных наноприборов (рис. 1, 2).

Принцип работы нанотранзистора из нанотрубок тот же, что и у самого первого трехэлектродного полупроводникового усилителя электрических сигналов (транзистора), созданного Дж. Бардином, У. Браттейном и У. Шокли в 1947 г. Поскольку сами нанотрубки могут обладать и полупроводниковой, и металлической проводимостью, это создает все необходимые условия для работы усилителя из нанотрубок. Управляющие электрические импульсы, подаваемые с базы, снижают сопротивление нанотрубки в области прохождения основного тока (исток–сток) и потому увеличивают силу этого тока.

X-образная многослойная нанотрубка может служить прототипом нанодиода. Диод — ключевой компонент электроники, поскольку он контролирует направление электрического тока в схеме. В случае традиционных полупроводниковых диодов на базе кремния тип проводимости задается с помощью примесей, создающих избыток или недостаток электронов в структуре вещества. Но если процесс допирования

примесью кремния давно отработан, то ввести примеси в углеродные нанотрубки оказалось очень трудной задачей. Например, сотрудники исследовательского подразделения General Electric пошли другим путем и решили создавать избыток или недостаток электронов в нанотрубках с помощью электрического поля. Для этого в нанодиод был введен миниатюрный электрод с разделенным на две части затвором. Два расположенных в одной плоскости затвора соединяются с двумя половинами нанотрубки. Таким образом получается устройство, похожее на обычный полевой транзистор, где затвор также разделен на две независимые части. Чтобы полученная система функционировала как нанодиод, необходимо подавать на один затвор положительное напряжение, на другой — отрицательное. В результате такой операции появится *p-n*-переход, необходимый для работы диода. Если же подавать на затворы одинаковое (только положительное или только отрицательное) напряжение, получится нанотранзистор, работающий по схеме *p-n-p* или *n-p-n* в зависимости от знака приложенного напряжения.

Подобная схема работы предполагается и при использовании X-образных нанотрубок. Но в нашем случае не требуется подвод электрода, разделенного на две части. X-образная нанотрубка представляет собой готовый компонент электроники.

Полученные нами результаты качественно совпадают с результатами американской исследовательской группы [2]. В отличие от авторов работы [2], на сегодняшний день нами были синтезированы Y-, V- и X-образные нанотрубки, причем синтез осуществлялся в один этап методом токового отжига графитовой бумаги с использованием Fe-катализатора и методом магнетронного напыления при постоянном токе [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. O. Smiljanic, T. Dellerio, A. Serventi, G. Lebrun, B. L. Stansfield, J. P. Dodelet, M. Trudeau, and S. Desilets, *Chem. Phys. Lett.* **342**, 503 (2001).
2. P. R. Bandaru, C. Daraio, S. Jin, and A. M. Rao, *Nature Mater.* **9**, 663 (2005).
3. С. В. Антоненко, С. Н. Мальцев, Патент РФ № RU 2218299 C1, 17.07.2002, Бюллетень изобретений № 34, с. 479.