

13,12

Исследование резистивного переключения вертикально ориентированной углеродной нанотрубки методами сканирующей зондовой микроскопии

© О.А. Агеев, Ю.Ф. Блинов, О.И. Ильин, Б.Г. Коноплев, М.В. Рубашкина,
В.А. Смирнов, А.А. Федотов

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета,
Таганрог, Россия

E-mail: ageev@sfedu.ru

(Поступила в Редакцию 10 сентября 2014 г.
В окончательной редакции 27 октября 2014 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований методами сканирующей зондовой микроскопии влияния внешнего электрического поля на электромеханические свойства и закономерности резистивного переключения вертикально ориентированной углеродной нанотрубки (ВОУНТ). Показано, что отношение сопротивлений ВОУНТ в высокоомном и низкоомном состояниях превышает 25 при расстоянии между зондом сканирующего туннельного микроскопа и ВОУНТ 1 nm и напряжении 8 V, и зависит от величины напряжения, прикладываемого между зондом и ВОУНТ. Предложен механизм резистивного переключения ВОУНТ, основанный на мгновенной деформации и возникновении внутреннего электрического поля ВОУНТ в результате резкого изменения производной напряженности внешнего электрического поля по времени. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании элементов резистивной энергоэффективной памяти с высокой плотностью ячеек на основе вертикально ориентированных углеродных нанотрубок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности (задание 16.1154.2014/К).

1. Введение

В настоящее время ведутся активные теоретические и экспериментальные исследования эффекта резистивного переключения в наноматериалах и наноструктурах, который проявляется в переключении сопротивления материала между низкоомным (R_{LR}) и высокоомным (R_{HR}) состояниями под действием внешнего электрического поля [1–3]. Перспективным применением этого эффекта является создание элементов энергоэффективной резистивной оперативной памяти (ReRAM) с высоким быстродействием и высокой плотностью записи информации [1,3].

Основная часть публикаций в области разработки ReRAM посвящена исследованию процессов резистивного переключения в структурах на основе тонких пленок оксидов металлов (TiO_2 , ZnO и др.) [3–5]. Однако большое внимание уделяется исследованию процессов резистивного переключения и в наноструктурированных материалах (наночастицах, наностержнях и нанотрубках), что связано с необходимостью уменьшения размеров ячеек памяти до 10 nm и менее [2,6–8].

Особый интерес для создания элементов резистивной оперативной памяти с высокой плотностью ячеек представляют вертикально ориентированные углеродные нанотрубки (ВОУНТ), поскольку вертикальная ориентация нанотрубок обеспечивает значительное уменьшение площади ячейки по сравнению со стандартными элементами ReRAM, а технология получения ВОУНТ

(VACNT) на основе метода плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) позволяет локализовано выращивать нанотрубки, в процессе, совместимом с кремневой технологией [9,10].

Возможность резистивного переключения в структуре на основе ВОУНТ была продемонстрирована в работе [11] при исследовании массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Отношение сопротивлений пучка ВОУНТ в высокоомном и низкоомном состояниях составляло 28 [11]. Аналогичный эффект резистивного переключения ВОУНТ был обнаружен при исследовании эмиссионных свойств массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом атомно-силовой микроскопии [12]. Эффект наблюдался при приложении напряжения около 200 V и расстоянии между зондом и образцом 350 nm и объяснялся деформацией ВОУНТ в процессе измерения вольтамперных характеристик. Деформация ориентированных углеродных нанотрубок под действием внешнего электрического поля экспериментально показана в работе [13]. Однако механизм резистивного переключения в структуре на основе ВОУНТ остается неизученным и требует проведения дальнейших исследований.

Целью работы является исследование влияния электрического поля на электромеханические свойства вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методами сканирующей зондовой микроскопии и изучение процесса резистивного переключения в структуре на ос-

нове ВОУНТ при приложении внешнего электрического поля.

2. Методика эксперимента

В качестве экспериментального образца использовался массив вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, выращенный методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) на многофункциональном нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 (НТ-МДТ, Россия). Рост вертикально ориентированных углеродных нанотрубок осуществлялся по вершинному механизму (рис. 1, *a*). В качестве подложки использовалась пластина кремния, на поверхности которой формировалась двухслойная структура, состоящая из пленки титана толщиной 20 нм и пленки никеля толщиной 10 нм.

Исследования массива ВОУНТ с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Nova NanoLab 600 (FEI, Нидерланды) позволили оценить

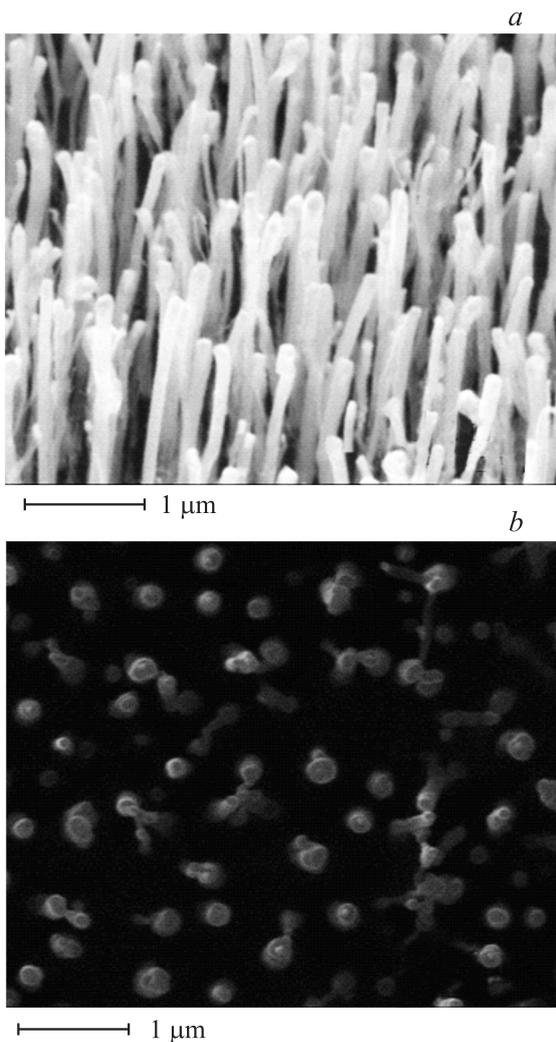


Рис. 1. РЭМ-изображение массива ВОУНТ: *a* — вид сбоку, *b* — вид сверху.

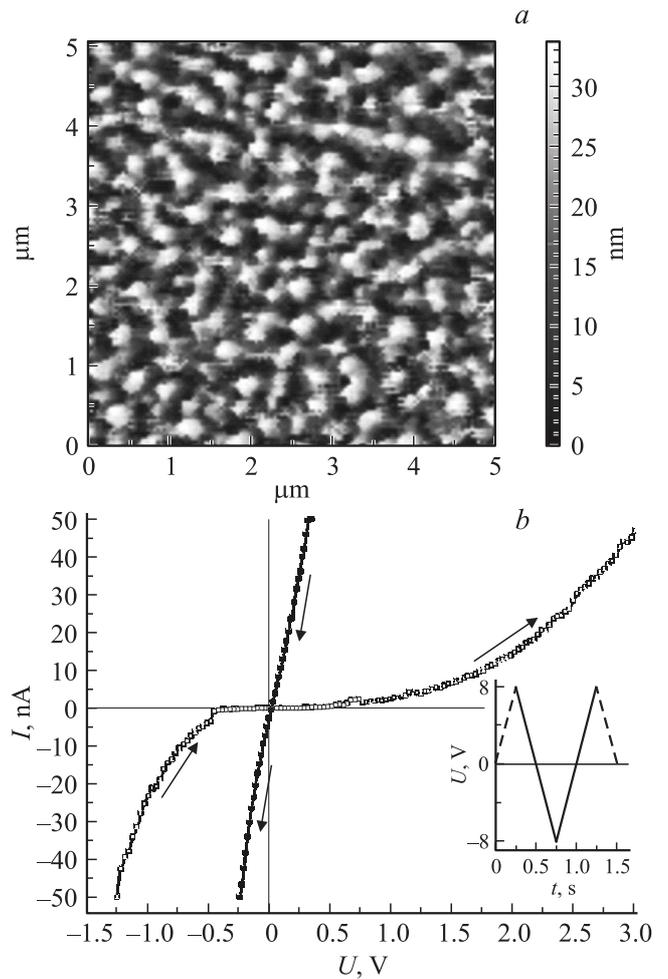


Рис. 2. Исследование массива ВОУНТ методом СТМ: *a* — СТМ-изображение, полученное при $U = 0.1$ В и расстоянии между зондом и ВОУНТ 1 нм; *b* — ВАХ индивидуальной нанотрубки, соответствующая импульсу напряжения, представленного на вставке.

диаметр, высоту и плотность ВОУНТ в массиве, значения которых составили около 95 нм, 2 μм и 8 μм⁻² соответственно (рис. 1).

Электрические и геометрические свойства массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок определялись методом сканирующей туннельной микроскопии с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro (НТ-МДТ, Россия). Вольфрамовый зонд СТМ радиусом 52 нм изготавливался методом электрохимического травления. Результаты исследования массива ВОУНТ методом СТМ представлены на рис. 2. Диаметр углеродных нанотрубок экспериментального образца определялся путем статистической обработки полученных СТМ-изображений с использованием функции Grain Analysis программного пакета Image Analysis 3.5. В процессе обработки СТМ-изображений проводилась секущая плоскость, параллельная вершинам ВОУНТ, для определения площади поперечного сечения и диаметра каждой нанотрубки, пересекае-

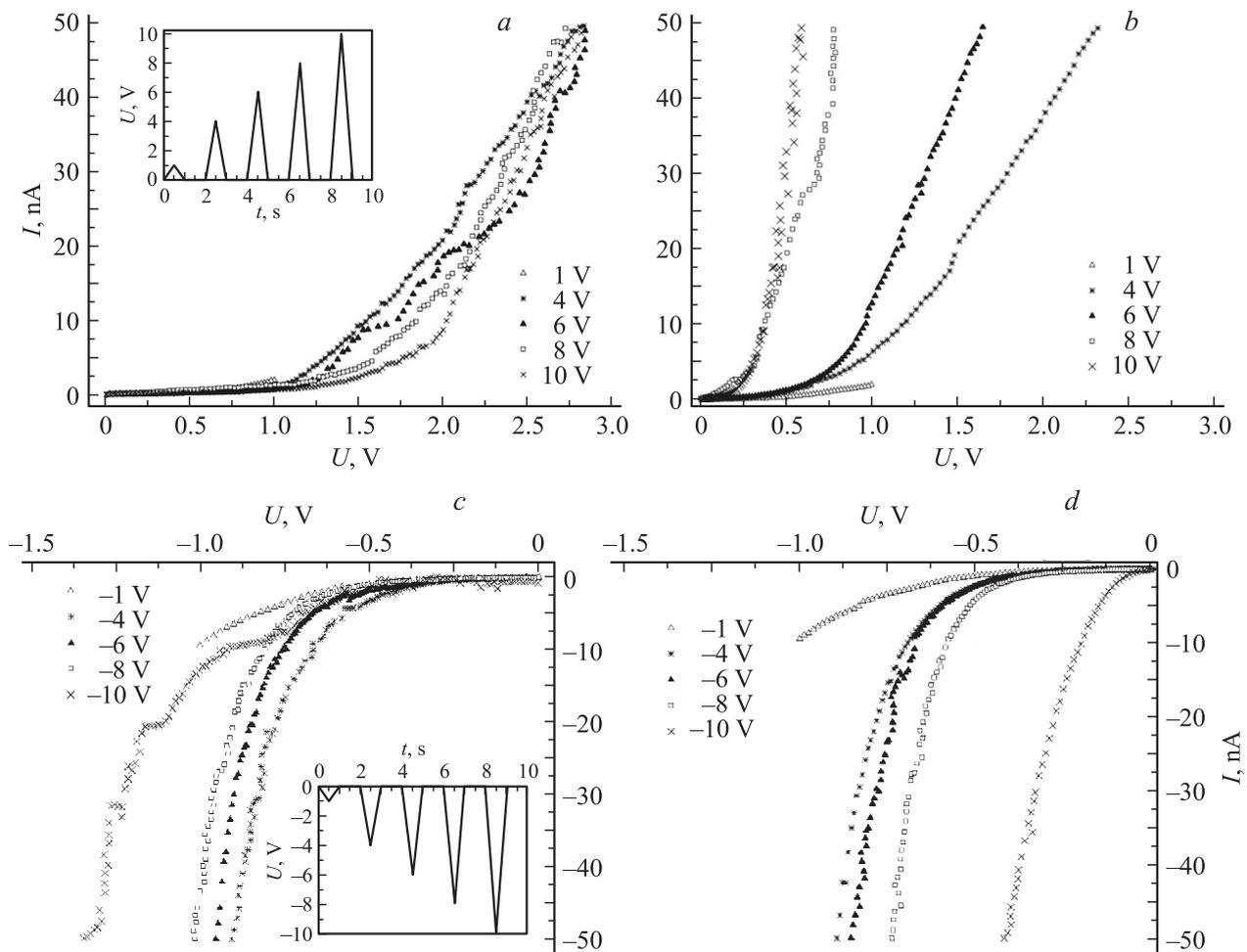


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики ВОУНТ, полученные методом СТМ: *a* — при нарастании dE/dt (на вставке — импульсы прикладываемого положительного напряжения); *b* — при убывании dE/dt ; *c* — при нарастании $-dE/dt$ (на вставке — импульсы прикладываемого отрицательного напряжения); *d* — при убывании $-dE/dt$.

мой этой плоскостью. Вольтамперные характеристики ВОУНТ измерялись в режиме СТМ-спектроскопии. Характерная ВАХ индивидуальной вертикально ориентированной углеродной нанотрубки, полученная при приложении к зонду импульса напряжения, представленного на вставке, и расстоянии между зондом СТМ и ВОУНТ 1 нм, показана на рис. 2, *b*.

С целью исследования влияния скорости изменения напряженности внешнего электрического поля (dE/dt) на электромеханические свойства вертикально ориентированной углеродной нанотрубки, методом СТМ-спектроскопии при расстоянии между зондом СТМ и ВОУНТ 1 нм измерялись вольтамперные характеристики ВОУНТ при приложении к зонду пилообразных импульсов напряжения (рис. 3) и токовременные характеристики ВОУНТ при приложении к зонду прямоугольных импульсов напряжения (рис. 4). Вольтамперные характеристики вертикально ориентированной углеродной нанотрубки, соответствующие нарастанию dE/dt ($0 < t < 0.5$ с и т.д.), представлены на рис. 3, *a, c*, убыванию dE/dt ($0.5 < t < 1$ с и т.д.) — на рис. 3, *b, d*.

С использованием экспериментальных ВАХ была получена зависимость отношения сопротивлений ВОУНТ в высокоомном и низкоомном состояниях R_{HR}/R_{LR} от величины положительного потенциала на зонде СТМ (рис. 5). Необходимо отметить, что токовые характеристики ВОУНТ представлены в диапазоне от 0 до 50 нА, что связано с особенностями измерительной системы сканирующего туннельного микроскопа.

3. Результаты и обсуждение

Анализ полученного СТМ-изображения массива ВОУНТ (рис. 2, *a*) с помощью функции Grain Analysis показал, что диаметр вертикально ориентированных углеродных нанотрубок составляет 108 ± 29 нм, плотность нанотрубок в массиве ВОУНТ равна $7 \pm 2 \mu\text{m}^{-2}$, что хорошо коррелирует с результатами оценки данных, полученных методом РЭМ. Это позволяет сделать вывод, что индивидуальные нанотрубки при исследовании методом СТМ не объединялись в пучки ВОУНТ

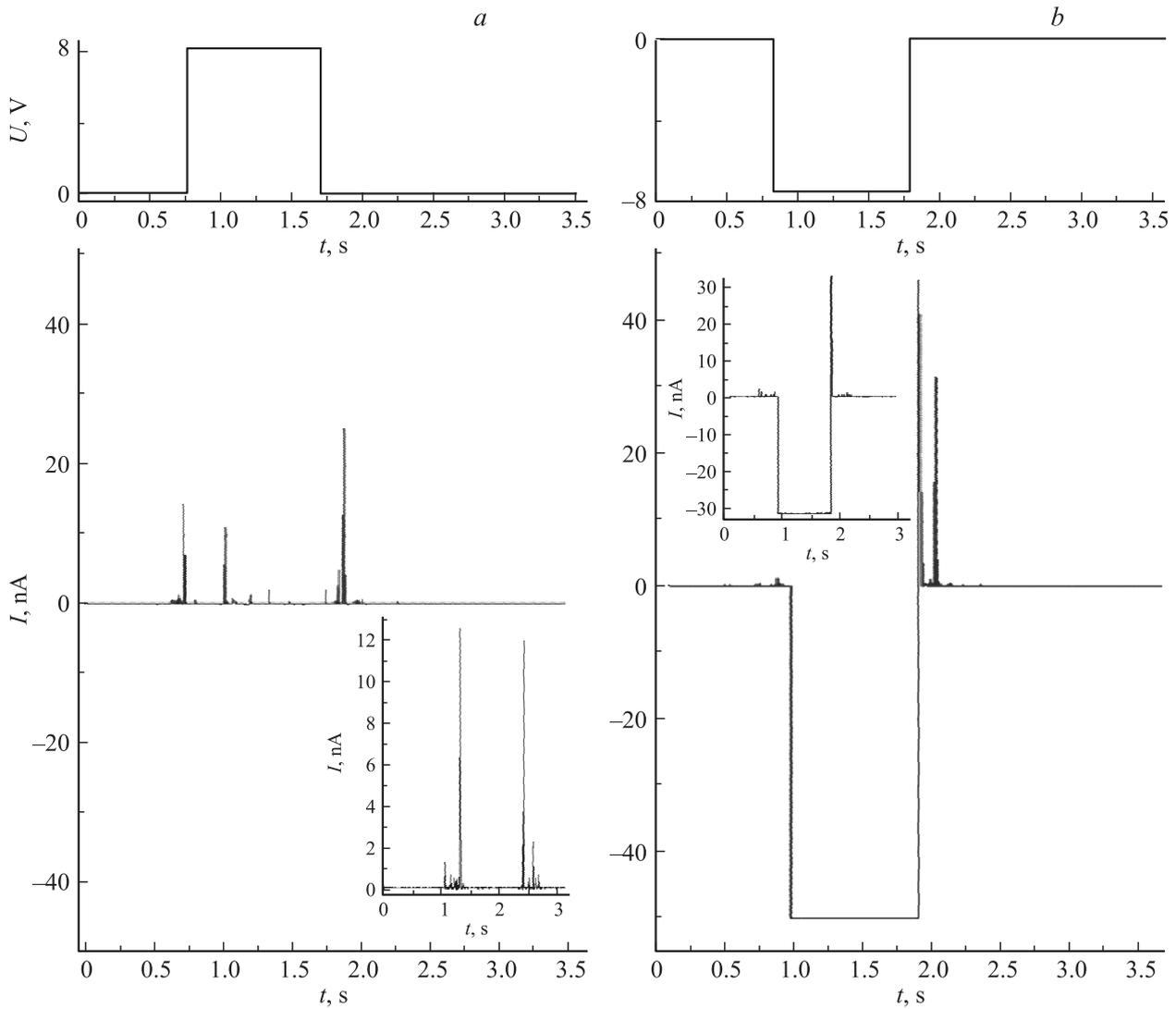


Рис. 4. Временная зависимость тока и напряжения в системе зонд СТМ/ВОУНТ: *a* — при потенциале на зонде +8 V (на вставке при +0.1 V); *b* — при потенциале на зонде -8 V (на вставке при -0.1 V).

благодаря малой плотности нанотрубок в массиве, в отличие от результатов, представленных в [11], что дает возможность исследовать электромеханические свойства индивидуальных ВОУНТ. Анализ ВАХ индивидуальной нанотрубки (рис. 2, *b*) показал, что сопротивление ВОУНТ под действием внешнего электрического поля изменяется из высокоомного состояния в низкоомное, т. е. наблюдается эффект резистивного переключения.

Экспериментальные исследования влияния на электрические свойства ВОУНТ величины и знака dE/dt при приложении между зондом СТМ и ВОУНТ положительного напряжения (вставка рис. 3, *a*) показали, что при $dE/dt > 0$, R_{HR} практически не зависит от величины производной и при $U = 1$ V составляет 540 MΩ (рис. 3, *a*). При $dE/dt < 0$ с ростом dE/dt наблюдается уменьшение R_{LR} (рис. 3, *b*). Так, при $U = 1$ V сопротивление ВОУНТ после приложения на зонд 4 V $R_{LR} = 156$ MΩ, после 8 V $R_{LR} < 20$ MΩ (рис. 3, *b*). Таким

образом, с ростом скорости убывания напряженности внешнего электрического поля наблюдается увеличение отношения R_{HR}/R_{LR} , которое при $U = 8$ V превышает 25 (рис. 5). Аналогичные зависимости наблюдались и при приложении к зонду пилообразных импульсов отрицательного напряжения (рис. 3, *c, d*).

Необходимо отметить, что эффект резистивного переключения в структурах на основе ВОУНТ наблюдается в моменты времени $t = 0.5; 2.5; 4.5$ и т. д., что соответствует резкому изменению dE/dt (рис. 3). Для исследования влияния скачка dE/dt на электрические свойства ВОУНТ измерялись временные зависимости тока, протекающего в системе зонд СТМ/ВОУНТ, при приложении прямоугольного импульса напряжения (рис. 4).

Анализ экспериментальных зависимостей, полученных при приложении к зонду прямоугольного импульса положительного напряжения длительностью 1 s (с амплитудой от 0.1 до 10 V), показал, что в системе

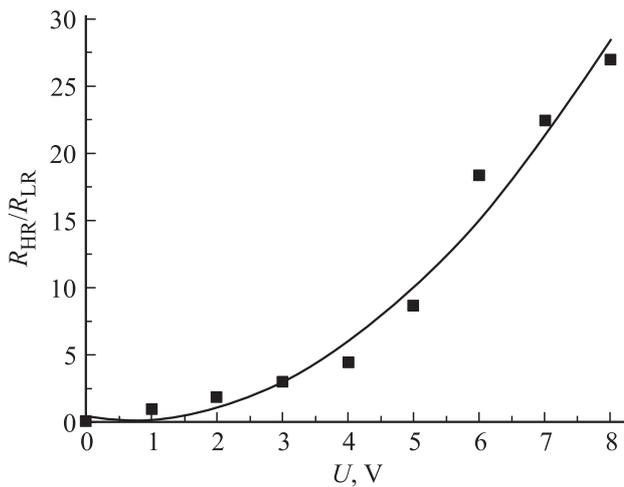


Рис. 5. Зависимость R_{HR}/R_{LR} от значения потенциала на зонде U .

зонд СТМ/ВОУНТ ток не протекал, наблюдались только скачки тока в моменты резкого изменения dE/dt (рис. 4, *a*). При приложении к зонду прямоугольного импульса отрицательного напряжения (с амплитудой от -0.1 до -10 В) в системе зонд СТМ/ВОУНТ протекал значительный ток (рис. 4, *b*), причем скачки тока, соответствующие переднему фронту импульса напряжения, были незначительными. Аналогичные зависимости были получены и для длительности импульса, равной 1 мс.

Кроме того, экспериментальное исследование влияния расстояния между зондом СТМ и ВОУНТ на полученные зависимости показало, что при расстояниях более 2 нм при приложении к зонду прямоугольного импульса положительного напряжения начинает протекать ток порядка единиц нА; при приложении к зонду отрицательного напряжения величина тока, так же как и на расстоянии 1 нм, составляет десятки нА. Таким образом, с увеличением расстояния между зондом СТМ и ВОУНТ при приложении к зонду положительного напряжения ток растет, что указывает на отсутствие связи наблюдаемого эффекта с автоэлектронной эмиссией в зазоре между зондом СТМ и ВОУНТ.

Для объяснения наблюдаемых зависимостей предложен механизм резистивного переключения ВОУНТ, согласно которому зависимость тока, протекающего в системе зонд СТМ/ВОУНТ, от напряженности внешнего электрического поля связана с деформацией ВОУНТ в результате поляризации нанотрубки [14] и возникновения поверхностной силы притяжения между зондом СТМ и нанотрубкой F_{at} [11]

$$F_{at} = \frac{1}{2} \varepsilon_{\parallel} \varepsilon_0 E^2 S, \quad (1)$$

где ε_{\parallel} — продольная диэлектрическая проницаемость ВОУНТ, величина которой определялась на основании работы [14] и составила ~ 87 , S — площадь поперечного сечения ВОУНТ. Напряженность внешнего электрического поля E при напряжении $U = 1$ В и расстоянии

между зондом СТМ и ВОУНТ 1 нм с учетом геометрии зонда составляет $\sim 1 \cdot 10^9$ В/м [15], а соответствующая сила $F_{at} \sim 3.5$ нН.

Продольное удлинение ВОУНТ под действием поверхностной силы притяжения F_{at} зависит от ее геометрических и механических свойств

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{F_{at}}{YS}, \quad (2)$$

где Y — модуль Юнга ВОУНТ. Модуль Юнга ВОУНТ был получен экспериментально, с использованием разработанной методики определения механических свойств ВОУНТ на основе метода наноиндентирования [16] и составлял $Y = 1.2$ ТПа. При напряжении $U = 1$ В и соответствующей силе $F_{at} \sim 3.5$ нН удлинение нанотрубки ΔL равно 0.63 нм. Относительное удлинение ВОУНТ при приложении напряжений в диапазоне от 1 до 10 В изменялось от 0.03 до 3% соответственно.

Так как связь между деформацией и напряженностью электрического поля является квадратичной, направление деформации ВОУНТ не зависит от знака потенциала на зонде СТМ. При этом поверхностная сила притяжения F_{at} всегда направлена в область наибольшей напряженности поля, т.е. на зонд СТМ, и ВОУНТ притягивается к зонду и при положительном, и при отрицательном потенциале, т.е. деформация ВОУНТ всегда положительна. Удлинение ВОУНТ при приложении потенциала на зонд также экспериментально наблюдалось в работе [13].

Так как при приложении прямоугольного импульса напряжения ток в системе зонд СТМ/ВОУНТ при положительном потенциале на зонде не протекает, а при отрицательном потенциале достигает достаточно высоких значений, можно предположить, что в момент резкого изменения dE/dt в нанотрубке в результате мгновенной деформации возникает внутренняя напряженность поля E_{def} , сонаправленная с этой деформацией

$$\frac{\Delta L}{L} \approx \beta E_{def}, \quad (3)$$

где β — коэффициент пропорциональности.

Кроме того, в нанотрубке также возникает напряженность поля E_p , связанная с поляризацией ВОУНТ и направленная противоположно внешнему полю E , т.е. в момент приложения прямоугольного импульса напряжения в вертикально ориентированной углеродной нанотрубке возникает внутренняя напряженность поля E_{CNT} , равная сумме напряженности поля E_{def} , вызванной мгновенной деформацией нанотрубки, и напряженности поля E_p , связанной с ее поляризацией. Причем величина внутренней напряженности поля E_{CNT} уменьшается с увеличением расстояния зонд СТМ/ВОУНТ, т.к. часть внешнего поля начинает падать в зазоре между зондом и ВОУНТ и, следовательно, деформация и поляризация нанотрубки под действием внешнего поля уменьшаются.

Таким образом, при приложении положительного потенциала на зонд СТМ внутреннее поле ВОУНТ E_{CNT}

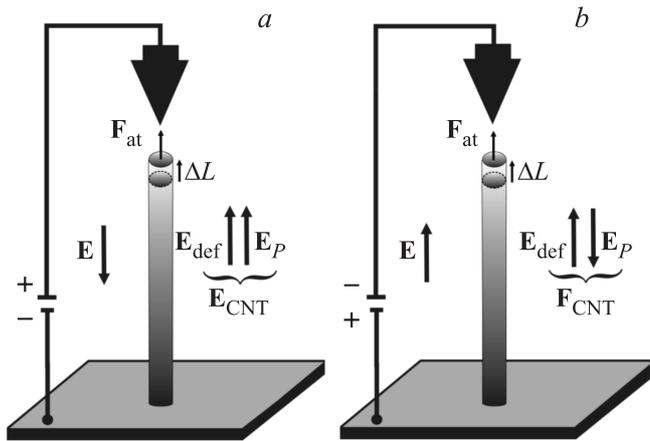


Рис. 6. Схематическое изображение распределения напряженностей поля при взаимодействии ВОУНТ с зондом STM: *a* — при положительном потенциале на зонде; *b* — при отрицательном потенциале на зонде.

компенсирует внешнее электрическое поле E (рис. 6, *a*), а при приложении отрицательного потенциала внутреннее поле ВОУНТ E_{CNT} незначительно, и в системе зонд STM/ВОУНТ под действием внешнего электрического поля E протекает ток (рис. 6, *b*). Данный эффект наиболее ярко проявляется на расстояниях между зондом STM и ВОУНТ менее 2 nm.

Если принять $E_{def} \sim 1/2E$, из (3) следует, что коэффициент $\beta > 30 \cdot 10^{-12}$ м/В. Эта величина сравнима со значениями пьезоэлектрического модуля нанопроводов ZnO и ряда других пьезоэлектрических материалов [17,18]. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что вертикально ориентированные углеродные нанотрубки проявляют пьезоэлектрические свойства. Согласно теории пьезоэффекта, под действием силы F_{at} возникает поверхностный заряд Q [18]

$$Q = \beta F_{at}. \quad (4)$$

Поверхностный заряд Q положительный, т.к. сила F_{at} всегда положительная, и с учетом (2) и (3)

$$Q = \beta YS \frac{\Delta L}{L} = \beta^2 YSE_{def}. \quad (5)$$

Поскольку заряд распределен по всей внешней поверхности ВОУНТ, в (5) под площадью S следует понимать площадь внешней поверхности ВОУНТ.

Возникновение поверхностного заряда Q объясняет наличие скачков положительного тока, соответствующих резкому изменению dE/dt (рис. 4). Скачки тока, соответствующие переднему фронту положительного импульса напряжения (рис. 4, *a*), связаны с небольшой инерционностью процесса деформации ВОУНТ и накоплением заряда Q . Скачки тока, соответствующие заднему фронту как положительного, так и отрицательного импульса напряжения (рис. 4, *a, b*), связаны с выбросом накопленного заряда ВОУНТ после снятия внешнего

электрического поля. Скачок тока, соответствующий переднему фронту отрицательного импульса напряжения, отсутствует (рис. 4, *b*), так как он компенсируется суммарным током, протекающим в системе зонд STM/ВОУНТ.

Аналогичные процессы протекают и в точках, соответствующих изменению знака dE/dt при приложении пилообразных импульсов напряжения (рис. 3). Возникновение внутренней напряженности поля ВОУНТ E_{def} также приводит к несимметричности ВАХ для положительного и отрицательного напряжений (рис. 2, *b, 3*).

Кроме того, приложение пилообразного импульса напряжения к системе зонд STM/ВОУНТ приводит к постепенной деформации ВОУНТ, в результате которой начинает протекать ток I_Q , связанный с изменением заряда Q во времени

$$I_Q = \frac{dQ}{dt} = \beta^2 YS \frac{dE_{def}}{dt}. \quad (6)$$

Суммарный ток I , протекающий в системе зонд STM/ВОУНТ при приложении пилообразного импульса напряжения, равен сумме тока проводимости свободных зарядов I_C и тока I_Q , связанного с изменением поверхностного заряда

$$I = I_C + I_Q. \quad (7)$$

При $dE/dt > 0$ деформация ВОУНТ растет ($0 < t < 0.5$ с и т.д.), ток I_Q направлен противоположно току проводимости свободных зарядов I_C , так как напряженность поля нанотрубки E_{def} сонаправлена с деформацией ВОУНТ, и уменьшает суммарный ток I в системе зонд STM/ВОУНТ. Причем вклад тока I_Q наиболее существенен именно в точке, соответствующей начальному моменту приложения внешнего поля, т.к. при дальнейшем возрастании напряженности внешнего поля E , ток I_Q увеличивается медленнее из-за возникающих упругих сил, препятствующих росту поля E_{def} , что приводит к появлению высокоомного состояния проводимости в системе зонд STM/ВОУНТ (рис. 3, *a, c*).

В моменты времени $0.5 < t < 1$ с и т.д. dE/dt становится отрицательной, деформация ВОУНТ начинает уменьшаться, ток I_Q изменяет направление на противоположное и суммируется с током проводимости свободных зарядов I_C , в результате чего суммарный ток I растет. Вклад тока I_Q также наиболее существенен в точке, соответствующей изменению знака dE/dt , что приводит к появлению низкоомного состояния проводимости в системе зонд STM/ВОУНТ (рис. 3, *b, d*).

Для прямоугольного импульса напряжения ток I_Q не влияет на проводимость системы, т.к. напряженность внешнего электрического поля, и как следствие, деформация ВОУНТ остаются постоянными во времени.

Также необходимо отметить, что при деформации ВОУНТ в ходе приложения пилообразного импульса внешнего электрического поля начинает проявляться пьезорезистивный эффект ВОУНТ, в результате которого изменяется внутреннее сопротивление нанотрубки [19], что приводит к уменьшению тока I в системе зонд STM/подложка при увеличении скорости нарастания напряженности внешнего поля (рис. 3).

4. Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования влияния внешнего электрического поля на электромеханические свойства вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методами сканирующей зондовой микроскопии с целью изучения механизма резистивного переключения в структуре на основе ВОУНТ. Показано, что отношение сопротивлений ВОУНТ в высокоомном и низкоомном состоянии R_{HR}/R_{LR} возрастает с увеличением прикладываемого к системе зонд СТМ/ВОУНТ напряжения и для $U = 8\text{ V}$ превышает 25.

Предложен механизм резистивного переключения ВОУНТ, связанный с внутренней напряженностью поля нанотрубки E_{def} , возникающей в результате мгновенной деформации ВОУНТ при резком изменении производной внешнего электрического поля по времени. При приложении прямоугольного импульса напряжения внутренняя напряженность ВОУНТ E_{def} приводит к проявлению двух стабильных состояний проводимости ВОУНТ: при положительном потенциале на зонде ток в системе зонд СТМ/ВОУНТ отсутствует, при отрицательном потенциале на зонде ток достигает достаточно высоких значений.

При приложении пилообразного импульса напряжения под действием производной внешнего электрического поля по времени в ВОУНТ возникает ток, связанный с изменением поверхностного заряда ВОУНТ. Изменение знака производной напряженности внешнего электрического поля приводит к изменению сопротивления структуры на основе вертикально ориентированной углеродной нанотрубки и возникновению гистерезиса на вольтамперных характеристиках ВОУНТ.

Таким образом, суммарный ток, протекающий в системе зонд СТМ/ВОУНТ, зависит от знака и величины производной напряженности внешнего электрического поля во времени, т.е. от формы сигнала прикладываемого напряжения.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании элементов резистивной энергоэффективной памяти с высокой плотностью ячеек на основе вертикально ориентированных углеродных нанотрубок.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Нанотехнологии“ и Научно-образовательного центра „Нанотехнологии“ Южного Федерального Университета.

Список литературы

- [1] L. Chua. Proc. IEEE **91**, 1830 (2003).
- [2] K.S. Vasu, S. Sampath, A.K. Sood. Solid State Commun. **151**, 1084 (2011).
- [3] A. Beck, J.G. Bednorz, Ch. Gerber, C. Rossel, D. Widmer. Appl. Phys. Lett. **77**, 1, 139 (2000).
- [4] S. Seo, M.J. Lee. Appl. Phys. Lett. **85**, 23, 5655 (2004).
- [5] В.И. Авиллов, О.А. Агеев, А.С. Коломийцев, Б.Г. Коноплев, В.А. Смирнов, О.Г. Цуканова. Изв. вузов. Электроника **2**, 106, 50 (2014).

- [6] T.H. Kim, E.Y. Jang, N.J. Lee, D.J. Choi, K.J. Lee, J. Jang, J.S. Choi. Nano Lett. **9**, 2229 (2009).
- [7] J. Yao, J. Zhong, L. Zhong, D. Natelson, J.M. Tour. Am. Chem. Soc. **3**, 12, 4122 (2009).
- [8] Y. Dong, G. Yu, M.C. McAlpine, W. Lu, C.M. Lieber. Nano Lett. **8**, 2, 386, (2008).
- [9] M. Meeyappan. J. Phys. D **42** 213 001 (2009).
- [10] О.А. Агеев, О.И. Ильин, В.С. Климин, Б.Г. Коноплев, А.А. Федотов. Хим. физика и мезоскопия **13**, 2, 226 (2011).
- [11] О.А. Агеев, Ю.Ф. Блинов, О.И. Ильин, А.С. Коломийцев, Б.Г. Коноплев, М.В. Рубашкина, В.А. Смирнов, А.А. Федотов. ЖТФ **83**, 12, 128 (2013).
- [12] A.D. Bartolomeo, A. Scarfato, F. Giubileo, F. Bobba, M. Biasiucci, A.M. Cucolo, S. Santucci, M. Passacantando. Carbon **45**, 2957 (2007).
- [13] J.-M. Bonard, Ch. Klink. Phys. Rev. B, **67**, 115 406, (2003).
- [14] B. Kozinsky, N. Marzari. Phys. Rev. Lett. **96**, 166 801 (2006).
- [15] S.L. Konsek, R.J.N. Coope, T.P. Pearsall, T. Tiedje. Appl. Phys. Lett. **70**, 1846 (1997).
- [16] О.А. Агеев, О.И. Ильин, А.С. Коломийцев, Б.Г. Коноплев, М.В. Рубашкина, В.А. Смирнов, А.А. Федотов. Рос. нанотехнологии **7**, 1–2, 54 (2012).
- [17] Y. Gao, Z.L. Wang. Nano Lett. **7**, 8, 2499 (2007).
- [18] В. Головин, И. Каплунов, О. Малышкина, Б. Педько, А. Мовчикова. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. Техносфера, М. (2013). С. 118.
- [19] B. Liu, H. Jiang, H.T. Johnson, Y. Huang. J. Mech. Phys. Solid **52**, 1 (2004).