

08

Определение удельного сопротивления вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методами сканирующей зондовой микроскопии

© О.А. Агеев, О.И. Ильин, М.В. Рубашкина, В.А. Смирнов, А.А. Федотов, О.Г. Цуканова

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения,
347900 Таганрог, Россия
e-mail: ageev@sfnu.ru

(Поступило в Редакцию 1 сентября 2014 г.)

Представлены результаты разработки методик определения удельного и погонного сопротивлений вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ) с использованием методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Представлены результаты экспериментальных исследований сопротивления ВОУНТ на основе разработанных методик. Показано, что значения сопротивления индивидуальной ВОУНТ, рассчитанные с использованием методики на основе метода АСМ, более чем в 200 раз превышают сопротивления ВОУНТ, полученные на основе метода СТМ, что связано с влиянием сопротивления контакта зонда АСМ к ВОУНТ. Погонное и удельное сопротивления индивидуальных ВОУНТ с диаметром 118 ± 39 nm и высотой 2.23 ± 0.37 μ m, определенные на основе разработанной методики с использованием метода СТМ, составили 19.28 ± 3.08 k Ω/μ m и $8.32 \pm 3.18 \cdot 10^{-4}$ Ω m соответственно. Разработанная методика определения удельного и погонного сопротивлений ВОУНТ на основе метода СТМ может быть использована для диагностики электрических параметров ВОУНТ, а также при создании элементов нанoeлектроники на основе ВОУНТ.

Введение

Вертикально ориентированные углеродные нанотрубки (ВОУНТ) благодаря сочетанию уникальных электрических, механических и геометрических свойств нашли широкое применение для создания перспективных приборов и устройств нанoeлектроники: автоэлектронных эмиттеров, транзисторов, элементов памяти, межсоединений и др. [1–3]. Основными свойствами ВОУНТ, определяющими параметры таких приборов, как правило, являются удельное и погонное сопротивления. Определение данных параметров ВОУНТ стандартными методами исследования наноструктур затруднено из-за вертикальной ориентации нанотрубок и высокого аспектного отношения. Так, двух- или четырехзондовые методы, получившие наибольшее распространение для исследования электрических свойств микроструктур, требуют формирования контактных площадок размером в несколько микрометров на вершинах массива ВОУНТ, что значительно ограничивает возможности применения данных методов для определения электрических параметров индивидуальных вертикально ориентированных нанотрубок ввиду их малых поперечных размеров [4]. В связи с необходимостью контроля и исследования электрических параметров индивидуальных вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, элементов конструкций и приборов, изготовленных на их основе, а также в связи с потребностями развития метрологического обеспечения нанотехнологий актуальность приобретают задачи, связанные с разработкой новых методик нанодиагностики, которые позволят определять

электрические параметры вертикально ориентированных нанотрубок.

Прецизионным методом исследования электрических свойств индивидуальных углеродных нанотрубок является метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), позволяющий измерять вольтамперные характеристики (ВАХ) нанотрубок [5,6]. Данный метод не требует дополнительной фиксации ВОУНТ и формирования контактных площадок на их вершинах. Однако, при исследовании ВОУНТ методами СЗМ возникают трудности, связанные с подвижностью нанотрубок при контакте с зондом и образованием пучков ВОУНТ под действием внешнего электрического поля [6]. Кроме того, определение сопротивления углеродной нанотрубки, на основе полученных методами СЗМ ВАХ требует проведения анализа процесса измерения ВАХ и разработки на его основе методики определения электрических параметров ВОУНТ с учетом особенностей метода СЗМ.

Целью работы является разработка методики определения удельного и погонного сопротивлений ВОУНТ на основе метода СЗМ.

Методика эксперимента

Экспериментальный образец с массивом ВОУНТ выращивался методом плазмохимического осаждения в газовой фазе (PECVD) с использованием многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (НТ-МДТ, Россия). Рост ВОУНТ осуществлялся на кремневой подложке со сформированными на ее поверхности каталитическими центрами никеля. В качестве нижнего проводящего и адгезионного слоя на

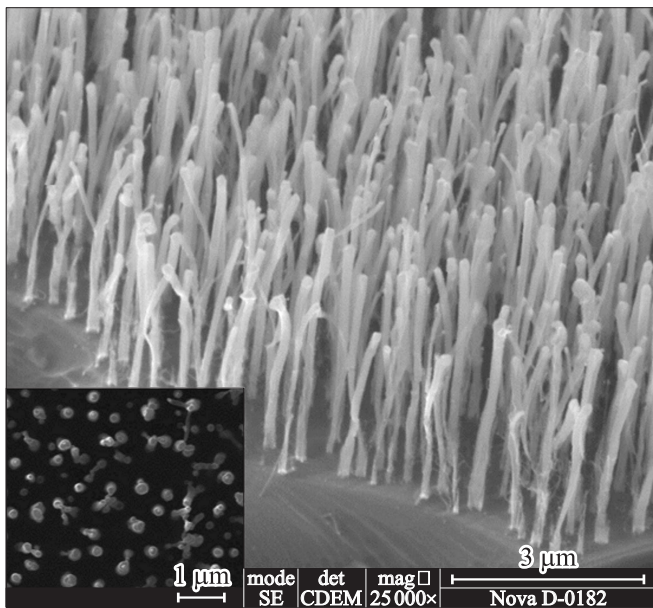


Рис. 1. РЭМ-изображение массива ВОУНТ; на вставке представлен вид сверху.

кремневой подложке использовалась пленка титана толщиной 20 нм.

Геометрические параметры исследуемого массива ВОУНТ определялись с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Nova NanoLab 600 (FEI, Нидерланды). Диаметр и высота ВОУНТ составили 98 нм и 2.2 μm соответственно, плотность нанотрубок в массиве 8 μm⁻² (рис. 1).

Исследования электрических свойств вертикально ориентированных углеродных нанотрубок проводились с использованием сканирующей зондовой лаборатории Ntegra (НТ-МДТ, Россия) методом контактной атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режиме токовой спектроскопии и методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) в режиме СТМ-спектроскопии при расстоянии между зондом СТМ и ВОУНТ 0.5 нм. В качестве зонда АСМ использовался коммерческий кантилевер с платиновым покрытием марки NSG11/Pt. В качестве зонда СТМ использовался вольфрамовый зонд с радиусом 52 нм, заточенный электрохимическим методом [7]. Для локализации зонда на вершине ВОУНТ проводилось предварительное сканирование поверхности массива методом АСМ в полуконтактном режиме и методом СТМ в режиме постоянного тока. Полученные АСМ- и СТМ-изображения массива ВОУНТ представлены на рис. 2, а и 3, а соответственно. Диаметр ВОУНТ определялся путем обработки полученных АСМ- и СТМ-изображений (рис. 2, б, 3, б) с использованием программного пакета Image Analysis (НТ-МДТ, Россия). В процессе статистической обработки СТМ-изображения функцией Grain Analysis проводилась секущая плоскость, параллельная вершинам ВОУНТ, для определения площади попереч-

ного сечения и диаметра каждой нанотрубки, пересекаемой этой плоскостью (рис. 3, б).

ВАХ ВОУНТ, полученные методом АСМ- и СТМ-спектроскопии, представлены на рис. 2, с и 3, с (сплошные линии) соответственно. Схема измерения ВАХ ВОУНТ методом контактной АСМ представлена на рис. 4, а, схема измерения методом СТМ аналогична, с учетом, что между зондом СТМ и ВОУНТ обеспечивается туннельный контакт.

С целью исключения сопротивления материалов зонда, проводящего слоя, контакта и массива нанотрубок, находящихся под ним, из общего сопротивления системы „зонд/ВОУНТ/проводящий слой/массив ВОУНТ/контакт“ дополнительно измерялось сопротивление системы „зонд/проводящий слой/массив ВОУНТ/контакт“ по схеме, представленной на рис. 4, с. Для измерения данного сопротивления предварительно проводилась силовая литография массива ВОУНТ методом АСМ по методике, представленной в [8]. АСМ- и РЭМ-изображения модифицированной области экспериментального образца представлены на рис. 5. Анализ АСМ-изображения позволил на основании методики, описанной в [8], определить среднюю высоту ВОУНТ, которая составила $2.23 \pm 0.37 \mu\text{m}$, что коррелирует с результатами анализа РЭМ-изображений (рис. 1). ВАХ модифицированной области, полученные методами АСМ- и СТМ-спектроскопии, представлены на рис. 2, с и 3, с (пунктирные линии) соответственно.

Результаты и обсуждения

Анализ АСМ-изображения массива ВОУНТ, полученного в полуконтактном режиме (рис. 2, а), показал, что индивидуальные нанотрубки при механическом взаимодействии с зондом АСМ объединяются в пучки диаметром от 320 до 650 нм, что затрудняет исследование электрических свойств индивидуальных нанотрубок. Механизм формирования пучков ВОУНТ и методики определения их геометрических параметров при исследовании массива ВОУНТ методом АСМ в полуконтактном режиме описаны в [8]. На рис. 2, с (сплошная линия) представлена ВАХ пучка ВОУНТ диаметром 612 нм, состоящего из 8 индивидуальных нанотрубок. Пучок ВОУНТ проявлял два состояния проводимости: высокоомное при изменении напряжения от 0 до 10 В и низкоомное при изменении напряжения от 10 до 0 В, что связано с особенностями резистивных свойств ВОУНТ [9]. Для определения сопротивления ВОУНТ использовалась ВАХ, соответствующая низкоомному состоянию пучка ВОУНТ, так как в данном случае в ВОУНТ не возникает дополнительного сопротивления, связанного с внутренней напряженностью поля в нанотрубках [9].

Анализ процесса измерения ВАХ пучка ВОУНТ показал, что систему „зонд АСМ/ВОУНТ/проводящий

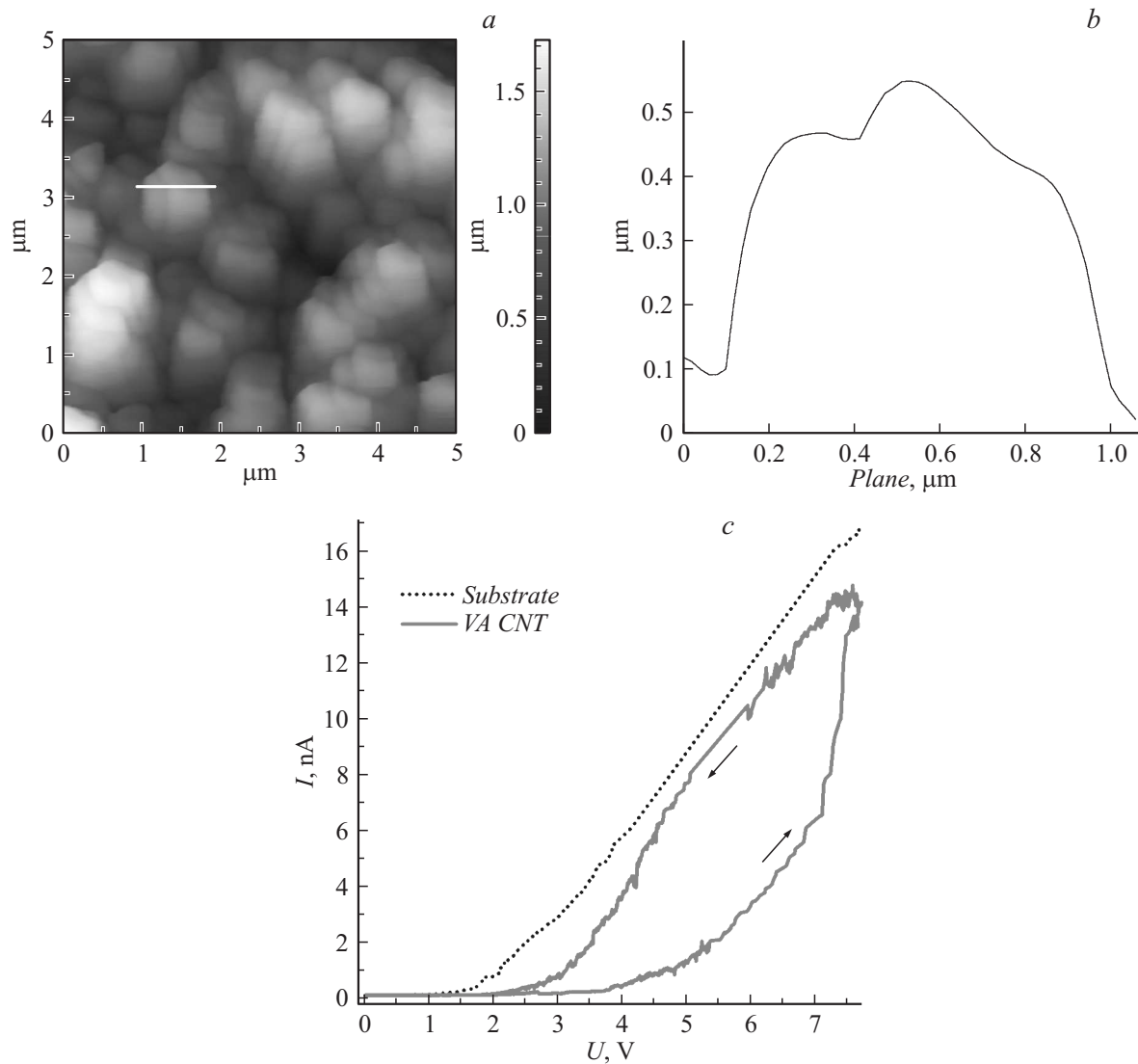


Рис. 2. Исследование массива ВОУНТ методом АСМ: *a* — АСМ-изображение массива ВОУНТ, *b* — профилограмма вдоль линии, *c* — ВАХ пучка нанотрубок (сплошная) и подложки (пунктир).

слой/массив ВОУНТ/контакт“ можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 4, *b*. Общее сопротивление данной системы $R_{\text{tot}}^{\text{AFM}}$ состоит из:

$$R_{\text{tot}}^{\text{AFM}} = R_0^{\text{AFM}} + R_{\text{bundle/sub}} + R_{\text{bundle}} + R_{p/\text{bundle}}, \quad (1)$$

$$R_0^{\text{AFM}} = R_{\text{Me}} + R_{\text{CNTs/Me}} + R_{\text{CNTs}} + R_{\text{CNTs/sub}} + R_{\text{sub}} + R_p^{\text{AFM}}, \quad (2)$$

где R_0^{AFM} — суммарное сопротивление проводящего слоя R_{sub} , материалов контакта R_{Me} и зонда АСМ R_p^{AFM} , а также массива нанотрубок, находящихся под контактом, и контактов к ним $R_{\text{CNTs/Me}} + R_{\text{CNTs}} + R_{\text{CNTs/sub}}$; $R_{\text{bundle/sub}} + R_{\text{bundle}} + R_{p/\text{bundle}}$ — сопротивление пучка ВОУНТ и контактов к нему.

Сопротивления $R_{\text{tot}}^{\text{AFM}}$ и R_0^{AFM} определяются на основании анализа линейных участков ВАХ, полученных

методом АСМ-спектроскопии на пучке ВОУНТ и на модифицированном методом силовой литографии участке массива ВОУНТ (рис. 2, *c*). Анализ процесса измерения ВАХ модифицированного участка массива ВОУНТ показал, что систему „зонд АСМ/проводящий слой/массив ВОУНТ/контакт“ можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 4, *d*. В предположении, что сопротивление контакта зонда АСМ с металлической пленкой проводящего слоя удовлетворяет соотношениям $R_{p/\text{sub}} \ll R_{p/\text{bundle}}$, $R_{p/\text{sub}} \ll R_{\text{bundle}}$, $R_{p/\text{sub}} \ll R_{\text{bundle/sub}}$, сопротивление R_0^{AFM} составляет 452 МΩ. Сопротивление $R_{\text{tot}}^{\text{AFM}}$ для низкоомного состояния пучка ВОУНТ (рис. 2, *c*) составляет 533 МΩ. Откуда сопротивление пучка ВОУНТ и контактов к нему определяется как

$$R_{\text{bundle/sub}} + R_{\text{bundle}} + R_{p/\text{bundle}} = R_{\text{tot}}^{\text{AFM}} - R_0^{\text{AFM}}. \quad (3)$$

Так как при исследовании методом АСМ ВОУНТ объединяются в пучки (рис. 2, *a*), то сопротивление

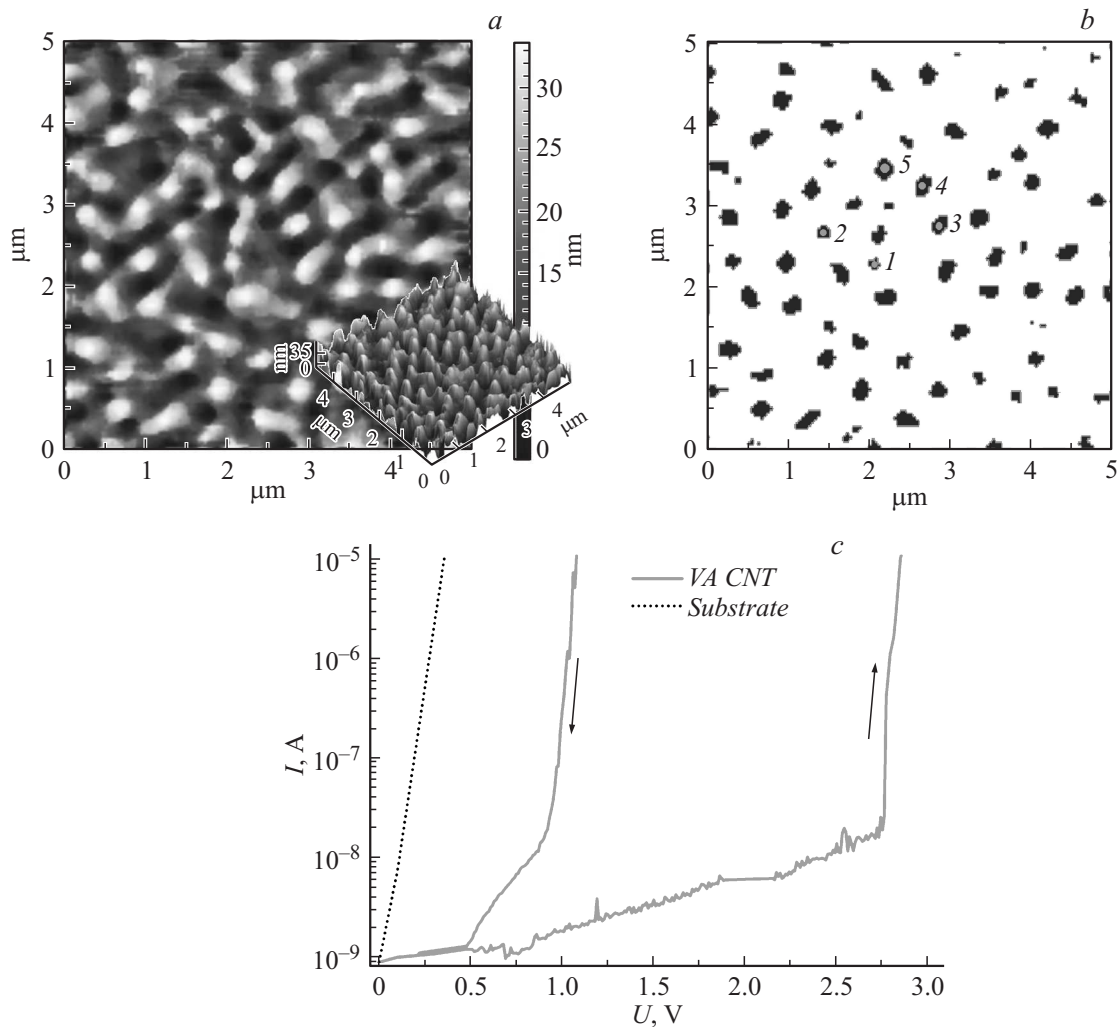


Рис. 3. Исследование массива ВОУНТ методом СТМ: *a* — СТМ-изображение массива ВОУНТ, *b* — профилограмма вдоль линии, *c* — ВАХ индивидуальной нанотрубки в точке 3 (сплошная) и подложки (пунктир).

одной нанотрубки и контактов к ней можно принять равным R_{CNT}^{AFM} :

$$R_{CNT}^{AFM} = \frac{R_{tot}^{AFM} - R_0^{AFM}}{N}, \quad (4)$$

где N — количество нанотрубок в пучке ВОУНТ. На основании (4) сопротивление R_{CNT}^{AFM} составляет около 10.1 МΩ. Полученное значение сопротивления ВОУНТ является завышенным, поскольку включает в себя не только сопротивление самой ВОУНТ, но и сопротивления контакта зонда АСМ к вершине пучка ВОУНТ $R_{p/bundle}$ и контакта пучка к проводящему слою $R_{bundle/sub}$. Как показано [10], сопротивление контакта зонда АСМ с платиновым покрытием к вершине ВОУНТ может достигать сотни кΩ. Необходимо также отметить, что сопротивление пучка ВОУНТ отличается от суммы сопротивлений образующих его индивидуальных нанотрубок за счет наличия ван-дер-ваальсового взаимодействия между УНТ [11], кроме того, нанотрубки в пучке отличаются друг от друга по своим геометрическим параметрам, что

также оказывает влияние на величину сопротивления ВОУНТ, определенное методом АСМ-спектроскопии.

Для исключения сопротивления контакта зонда к вершине пучка ВОУНТ $R_{p/bundle}$ проводились аналогичные измерения ВАХ ВОУНТ методом СТМ-спектроскопии (рис. 3). Анализ полученного СТМ-изображения массива ВОУНТ (рис. 3, *b*) показал, что в отличие от результатов, представленных на рис. 2, *a*, индивидуальные нанотрубки благодаря малой плотности УНТ в массиве не объединяются в пучки ВОУНТ, диаметр ВОУНТ составляет 118 ± 39 nm, что позволяет исследовать электрические свойства индивидуальных ВОУНТ. На основании ВАХ индивидуальной ВОУНТ (рис. 3, *c*) можно сделать вывод, что индивидуальная ВОУНТ также проявляет два состояния проводимости и для определения сопротивления ВОУНТ следует использовать ВАХ, соответствующую низкоомному состоянию ВОУНТ [9].

Анализ процесса измерения ВАХ индивидуальной ВОУНТ методом СТМ показал, что систему измерения можно представить эквивалентной схемой, представлен-

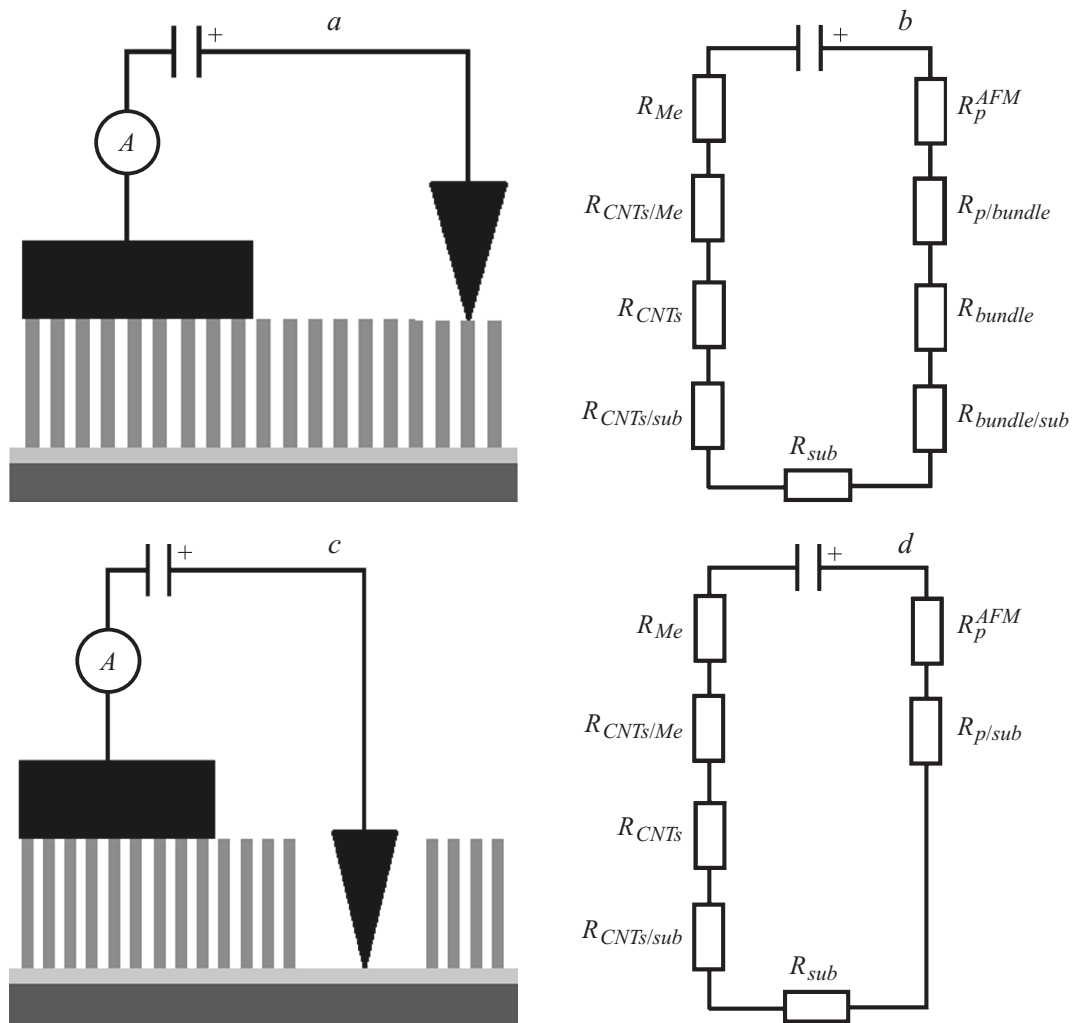


Рис. 4. Измерение электрических параметров ВОУНТ методом АСМ: *a* — схема измерения общего сопротивления; *b* — эквивалентная схема, соответствующая рис. 3, *a*; *c* — схема измерения без сопротивления пучка ВОУНТ и контактов к нему; *d* — эквивалентная схема, соответствующая рис. 3, *c*.

ной на рис. 6, *a*. Общее сопротивление системы $R_{\text{tot}}^{\text{STM}}$ равно

$$R_{\text{tot}}^{\text{STM}} = R_0^{\text{STM}} + R_{\text{CNT}/\text{sub}} + R_{\text{CNT}} + R_{\text{tun}}, \quad (5)$$

$$R_0^{\text{STM}} = R_{\text{Me}} + R_{\text{CNTs}/\text{Me}} + R_{\text{CNTs}} + R_{\text{CNTs}/\text{sub}} + R_{\text{sub}} + R_p^{\text{STM}}, \quad (6)$$

где R_0^{STM} — суммарное сопротивление проводящего слоя R_{sub} , материалов контакта R_{Me} и зонда СТМ R_p^{STM} , а также массива нанотрубок, находящихся под контактом, и контактов к ним $R_{\text{CNTs}/\text{Me}} + R_{\text{CNTs}} + R_{\text{CNTs}/\text{sub}}$, определяемое методом СТМ-спектроскопии модифицированного методом силовой литографии участка массива ВОУНТ; R_{tun} — сопротивление туннельного контакта между зондом СТМ и ВОУНТ; $R_{\text{CNT}} + R_{\text{CNT}/\text{sub}}$ — суммарное сопротивление индивидуальной ВОУНТ и контакта между ВОУНТ и проводящим слоем.

Ранее в работах по определению электрических параметров материалов методом СТМ было показано, что

вклад сопротивления туннельного контакта уменьшается с ростом напряженности электрического поля и при больших значениях напряженности можно принять $R_{\text{tun}} \sim 0$ [12]. Откуда суммарное сопротивление индивидуальной ВОУНТ и контакта к проводящему слою можно принять равным

$$R_{\text{CNT}}^{\text{STM}} = R_{\text{tot}}^{\text{STM}} - R_0^{\text{STM}}. \quad (7)$$

Сопротивление $R_{\text{tot}}^{\text{STM}}$ определялось на основании ВАХ, полученной методом СТМ-спектроскопии на индивидуальной ВОУНТ (рис. 3, *c*), и для низкоомного состояния ВОУНТ составило 108 кΩ. Сопротивление R_0^{STM} определялось на основании эквивалентной схемы измерения при $R_{\text{tun}} \sim 0$ (рис. 6, *b*) и ВАХ, полученной на модифицированном участке массива ВОУНТ (рис. 3, *c*), и составило 41 кΩ. Откуда суммарное сопротивление индивидуальной ВОУНТ (точка 1 на рис. 3, *b*) и контакта к проводящему слою $R_{\text{CNT}}^{\text{STM}}$ составило 67 кΩ.

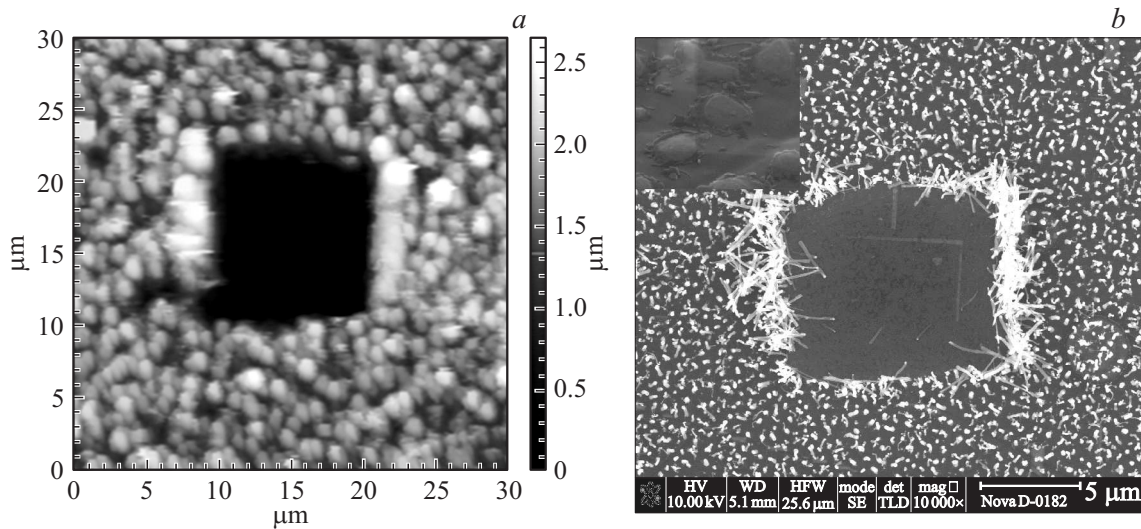


Рис. 5. Массив ВОУНТ после проведения силовой литографии: *a* — АСМ-изображение массива ВОУНТ, *b* — РЭМ-изображение; на вставке — область подложки без ВОУНТ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$.

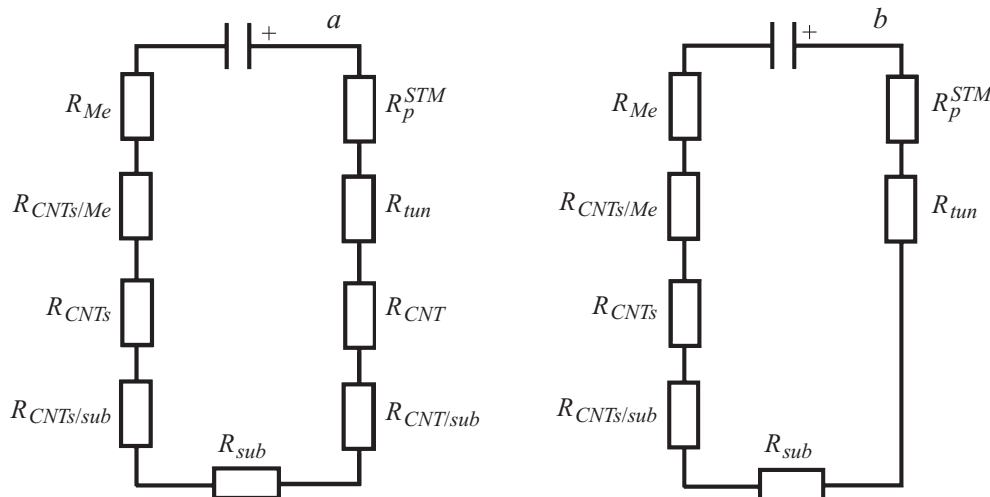


Рис. 6. Эквивалентные схемы измерения электрических параметров ВОУНТ методом СТМ: *a* — общее сопротивление, *b* — без учета сопротивлений индивидуальной ВОУНТ и ее контакта к проводящему слою.

Для определения величины переходного сопротивления контакта ВОУНТ с проводящим слоем $R_{CNT/sub}$ проводились измерения ВАХ ВОУНТ с диаметрами (D), равными 96, 118, 124, 132 и 157 нм (точки 1–5 на рис. 3, *b* соответственно). Сопротивления R_{CNT}^{STM} для данных ВОУНТ рассчитывались на основании (7) и составили 67, 63, 47, 22 и 14 кΩ соответственно. На рис. 7 представлена зависимость R_{CNT}^{STM} от $1/D$. Согласно методике [13], данную зависимость можно аппроксимировать как

$$Q = a_1 + a_2x, \quad (8)$$

где $Q = R_{CNT}^{STM}/D$; $a_1 = \rho B/2$, ρ — удельное сопротивление ВОУНТ, B — поправочный коэффициент, $a^2 = 4\rho_c/\pi$, ρ_c — удельное переходное сопротивление контакта ВОУНТ с проводящим слоем, $x = 1/D$.

Анализ зависимости R_{CNT}^{STM}/D от $(1/D)$ (рис. 7) с использованием методики [13] показал, что ρ_c составляет $118.6 \text{ k}\Omega\text{nm}^2$ ($1.186 \cdot 10^{-9} \Omega\text{cm}^2$). Следовательно, сопротивление контакта $R_{CNT/sub}$ для исследуемых ВОУНТ изменяется от 4.1 до 12.8 Ω. Таким образом, сопротивление $R_{CNT/sub} \ll R_{CNT}^{STM}$ и не вносит существенный вклад в значение сопротивления ВОУНТ, определенное с использованием методики, разработанной на основе метода СТМ.

С учетом геометрических параметров ВОУНТ, погонное r и удельное ρ сопротивления ВОУНТ составили $19.28 \pm 3.08 \text{ k}\Omega/\mu\text{m}$ и $8.32 \pm 3.18 \cdot 10^{-4} \Omega\text{m}$ соответственно. Полученные значения погонного и удельного сопротивлений многослойных ВОУНТ хорошо коррелируют с литературными данными [14, 15].

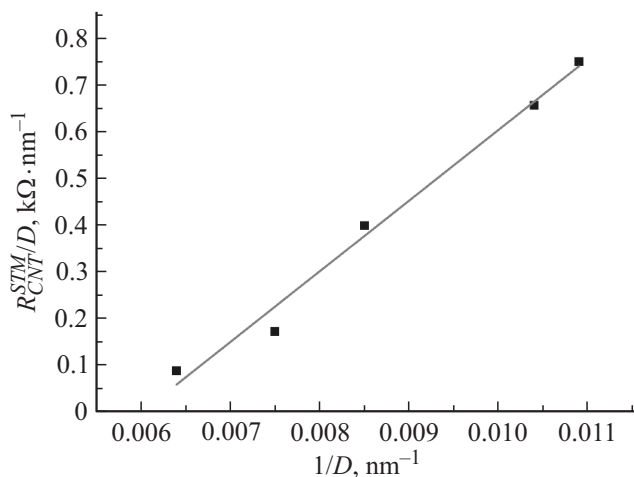


Рис. 7. Зависимость R_{CNT}^{STM}/D от $1/D$ для определения переходного сопротивления контакта ВОУНТ к проводящему слою.

Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования электрических свойств ВОУНТ методами АСМ и СТМ. На основе полученных результатов с использованием метода силовой литографии разработаны методики определения погонного и удельного сопротивлений индивидуальной ВОУНТ. Показано, что при определении сопротивления ВОУНТ методом АСМ значения погонного и удельного сопротивлений ВОУНТ выше, чем известные из литературы, что, возможно, связано с влиянием контакта зонда АСМ к вершине ВОУНТ и возникновением дополнительного сопротивления в измерительной системе. Кроме того, показано, что при проведении предварительного сканирования методом полуконтактной АСМ для позиционирования зонда АСМ на вершину ВОУНТ образуются пучки ВОУНТ, что затрудняет исследование электрических свойств индивидуальной нанотрубки.

Определение сопротивления индивидуальной ВОУНТ методом СТМ позволяет преодолеть эти трудности, поскольку сопротивление туннельного контакта зонда СТМ с вершиной ВОУНТ при напряжении более 1 В становится незначительным и не оказывает существенного влияния на общее сопротивление системы „СТМ зонд/ВОУНТ/проводящий слой/массив ВОУНТ/контакт“. Кроме того, при предварительном сканировании методом СТМ поверхности исследуемого массива ВОУНТ образования пучков ВОУНТ не происходит. Показано, что удельное переходное сопротивление контакта индивидуальной ВОУНТ к проводящему слою составляет $1.186 \cdot 10^{-9} \Omega \text{cm}^2$ и может не учитываться при определении сопротивления ВОУНТ. Рассчитанные значения погонного и удельного сопротивлений ВОУНТ с использованием разработанной методики на основе метода СТМ составили $19.28 \pm 3.08 \text{ k}\Omega/\mu\text{m}$ и $8.32 \pm 3.18 \cdot 10^{-4} \Omega\text{m}$ соответственно, что хорошо коррелирует с литературными данными.

Таким образом, разработанная методика определения удельного и погонного сопротивлений ВОУНТ на основе метода СТМ позволяет без дополнительной фиксации нанотрубки и предварительного формирования контактных площадок к ней определять электрические параметры индивидуальной ВОУНТ и может быть использована для диагностики электрических параметров ВОУНТ, а также создания элементов нанoeлектроники на их основе.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проекты № 1936, № 16.1154.2014/К), а также в рамках соглашения № 14.575.21.0045 (уникальный идентификатор RFMEFI57514X0045) и РФФИ (проекты №14-07-31322 мол_а, № 14-07-31162 мол_а).

Список литературы

- [1] Lan Y., Wang Y., Ren Z. // Adv. Phys. 2011. Vol. 60. N 4. P. 553–678.
- [2] Lu X.B., Dai J.Y. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 113–104.
- [3] Li H., Banerjee K. // IEEE T. Electron Dev. 2009. Vol. 56. N 10. P. 2202–2214.
- [4] Chiodarelli N., Masahito S., Kashiwagi Y., Li Y., Arstila K., Richard O., Cott D.J., Heyns M., Gendt St., Groeseneken G., Vereecken Ph.M. // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. P. 085–302.
- [5] Ichimura K., Osawa M., Nomura K., Kataura H., Maniwa Y., Suzuki S., Achiba Y. // Phys. B. 2002. Vol. 323. P. 230–232.
- [6] Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Ильин О.И., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 12. С. 128–133.
- [7] Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Коломийцев А.С., Смирнов В.А., Сербу Н.И. // Микроэлектроника. 2012. Т. 41. № 1. С. 47–56.
- [8] Агеев О.А., Ильин О.И., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А. // Микро-и наносистемная техника. 2012. № 3. С. 9–13.
- [9] Ageev O.A., Blinov Yu.F., Ilin O.I., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. // Proc. International Symposium „Physics and Mechanics of New Materials and Underwater Applications“. Thailand, 2014. P. 12.
- [10] Ngo Q., Petranovic D., Krishnan Sh., Cassell A.M., Ye Q., Li J., Meyyappan M., Yang C.Y. // IEEE T. Nanotechnol. 2004. Vol. 3. N 2. P. 311–317.
- [11] Kim G., Bernholc J., Kwon Y.-K. // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. P. 063–113.
- [12] Won H., Willis R.F. // Surf. Sci. 2010. Vol. 604. P. 491–495.
- [13] Чистяков Ю.Д., Баранов В.В., Достанко А.П. // Обзоры по электронной технике. Сер. полупроводниковые приборы. 1973. Вып. 7 (143). С. 364.
- [14] Vivo B., Lamberti P., Spinelli G., Tucci V. // Rom. J. Inf. Sci. Tech. 2010. Vol. 13. N 1. P. 33–48.
- [15] Fathi D., Forouzandeh B. Carbon Nanotubes / Ed. by J.M. Marulanda. InTech., 2010. P. 275–297.