

НАНОТЕХНОЛОГИЯ NANOTECHNOLOGY

УДК 621.38-022.532

Исследование методов модификации зондов для атомно-силовой микроскопии критических размеров осаждением углеродных нанотрубок

*О.А. Агеев¹, Ал.В. Быков², А.С. Коломийцев¹, Б.Г. Коноплев¹,
М.В. Рубашкина¹, В.А. Смирнов¹, О.Г. Цуканова¹*

¹*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
Южного федерального университета (г. Таганрог)*

²*ЗАО «НТ-МДТ» (г. Москва)*

Investigation of Modification Methods of Probes for Atomic-Force Critical Dimension Microscopy by Deposition of Nanocarbon Nanotubes

*O.A. Ageev¹, Al.V. Bykov², A.S. Kolomiitsev¹, B.G. Konoplev¹,
M.V. Rubashkina¹, V.A. Smirnov¹, O.G. Tsukanova¹*

¹*Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics and
Electronic Equipment Engineering, Taganrog*

²*NT-MDT, Moscow*

Представлены результаты экспериментальных исследований модификации зондов для атомно-силовой микроскопии критических размеров (Critical Dimension Atomic Force Microscopy – CD-AFM) осаждением углеродных нанотрубок (УНТ) для повышения точности определения шероховатости поверхности вертикальных стенок субмикронных структур. Исследованы методы осаждения индивидуальной УНТ на острие зонда атомно-силового микроскопа (АСМ), основанные на механическом и электростатическом взаимодействиях между зондом и массивом вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ). Показано, что при расстоянии между острием АСМ-зонда и массивом ВОУНТ 1 нм и приложении напряжения в диапазоне 20–30 В, на острие осаждается индивидуальная углеродная нанотрубка. На основании полученных результатов сформирован зонд с углеродной нанотрубкой на острие (УНТ-зонд) радиусом 7 нм и аспектным отношением 1:15. Исследования УНТ-зонда показали, что его применение повышает разрешающую способность и достоверность измерений АСМ-методом по сравнению с коммерческим зондом, а также позволяет определять шероховатость вертикальных стенок высокоаспектных структур методом CD-AFM. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов

© О.А. Агеев, Ал.В. Быков, А.С. Коломийцев, Б.Г. Коноплев, М.В. Рубашкина, В.А. Смирнов, О.Г. Цуканова, 2015

изготовления и восстановления специальных АСМ-зондов, в том числе зондов для CD-AFM, а также при разработке методик межоперационного экспресс-контроля параметров технологического процесса производства элементов микро- и нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.

Ключевые слова: нанотехнологии; атомно-силовая микроскопия; углеродные нанотрубки; атомно-силовая микроскопия критических размеров (Critical Dimension Atomic Force Microscopy – CD-AFM); фокусированные ионные пучки.

The experimental study results of modification of the probes for Critical Dimension Atomic Force Microscopy (CD-AFM) by deposition of carbon nanotubes (CNT) have been presented. This permits to improve the accuracy of determining the roughness of the submicron structures vertical walls surface. The deposition methods of individual CNT on the tip of the AFM probe, based on mechanical and electrostatic interactions between the probe and an array of the vertically aligned carbon nanotubes (VACNT), have been studied. It has been shown that when the distance between the AFM tip and an array VACNT is 1 nm and the applied voltage is in the range of 20-30 V, an individual carbon nanotube is deposited on the tip. On the basis of the obtained results a probe with the carbon nanotube on the tip (CNT probe) with the 7nm radius and an aspect ratio 1:15 the probe has been formed. The CNT probe studies have demonstrated that its use improves the resolution and accuracy of the AFM measurements as compared to the commercial probe, and, also, allows determining the roughness of the vertical walls of the high aspect structures by CD-AFM. The results obtained can be used to develop the manufacturing processes and to repair special probes for AFM, including the probes for CD-AFM, as well as to develop the techniques and the inter-operation diagnostics of the process parameters in manufacturing the elements of micro-and nanoelectronics, micro- and nanosystem structures.

Keywords: nanotechnology, atomic force microscopy, carbon nanotubes, CD-AFM, focused ion beams

Введение. Повышение степени интеграции СБИС приводит к топологическим нормам ниже 90 нм, при этом резко возрастает влияние отклонения размеров элементов от заданных на параметры и работоспособность СБИС. В частности, шероховатость вертикальной стенки затвора существенно влияет на пороговое напряжение МОП-транзисторов СБИС [1]. При этом важной задачей является разработка методик и технических средств определения геометрических параметров и шероховатости вертикальных стенок высокоаспектных наноструктур.

Атомно-силовая микроскопия критических размеров (Critical Dimension Atomic Microscopy – CD-AFM) является перспективным методом, позволяющим эффективно решать проблемы межоперационного экспресс-контроля качества технологического процесса при производстве СБИС путем проведения исследования морфологии и локальных свойств поверхности высокоаспектных структур с высоким пространственным разрешением [1].

Разрешающая способность атомно-силового микроскопа (АСМ) определяется радиусом закругления и аспектным соотношением сторон острия зонда [2–6]. Поэтому разработка методов формирования зондов, параметры которых позволят минимизировать искажения морфологии поверхности образца при исследовании методом атомно-силовой микроскопии (АСМ-метод), является актуальной. Существует несколько тех-

нологических методов получения зондов для АСМ. Коммерчески доступные зонды изготавливаются из кремния методами микроэлектронной технологии, в результате чего на кантилере формируется пирамидальное острие радиусом 10–100 нм [2]. Для исследования АСМ-методом поверхностей, содержащих высокоаспектные структуры, применяются кантилеверы с зондами, острие которых модифицировано методом фокусированных ионных пучков (ФИП), при этом радиус острия зонда составляет около 9 нм [6–8]. Малый радиус закругления и высокое аспектное соотношение сторон острия зондов получают в результате модификации методами локального электронно-лучевого и ионно-стимулированного осаждения [2, 9].

Перспективным методом формирования высокоаспектных зондов АСМ является позиционирование углеродной нанотрубки (УНТ) на острие зонда [10–14]. Благодаря малому диаметру, высокой жесткости и упругим свойствам УНТ такие зонды отличаются от кремниевых высоким аспектным соотношением (более 1:10) и малым радиусом острия (менее 10 нм), а от зондов, модифицированных методом ФИП, – повышенной износостойкостью. УНТ-зонды могут быть использованы при определении шероховатости вертикальных стенок высокоаспектных структур методом CD-AFM [15].

Среди методов формирования УНТ-зондов наибольшее распространение получили локальный рост УНТ на острие зонда с использованием метода осаждения из газовой фазы, осаждение УНТ на острие зонда под действием переменного электрического поля путем диэлектрофореза и под действием постоянного напряжения (около 60 В) [10–14]. Однако данные технологии не подходят для массового производства из-за сложности технологического процесса получения и, как следствие, высокой себестоимости. Кроме того, результат осаждения УНТ на острие зонда под действием электрического поля сильно зависит от радиуса зонда, на который происходит осаждение [16], что связано с зависимостью размеров области с максимальным значением напряженности электрического поля от радиуса острия зонда. Так, при радиусе острия зонда меньше 50 нм вероятность осаждения УНТ составляет 5%, при увеличении радиуса острия до 150–250 нм вероятность осаждения увеличивается до 70% [16]. При этом увеличение радиуса острия АСМ-зонда приводит одновременно и к росту числа УНТ, осаждающихся на зонд за один импульс прикладываемого напряжения. Использование данной закономерности требует предварительного формирования зонда определенного радиуса, что дополнительно усложняет технологию получения УНТ-зондов.

Необходимо отметить, что российская компания ЗАО «НТ-МДТ» производит коммерчески доступные АСМ-зонды с углеродными нанотрубками на острие [17]. Однако изготавливаемые НТ-МДТ зонды имеют высокую стоимость, что ограничивает их применение.

В настоящей работе предлагается использовать АСМ-зонды, изношенные после интенсивных исследований поверхности образцов. При этом осаждение УНТ на острие таких зондов позволяет восстановить их для дальнейшего использования при прецизионном исследовании поверхности материалов, а также определении параметров высокоаспектных структур.

Цель настоящей работы – исследование методов модификации и восстановления АСМ-зондов путем осаждения углеродной нанотрубки на острие зонда под действием механического и электростатического взаимодействий между АСМ-зондом и массивом вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ) для формирования УНТ-зондов. Также в работе исследуются характеристики УНТ-зондов при анализе высокоаспектных структур методом CD-AFM.

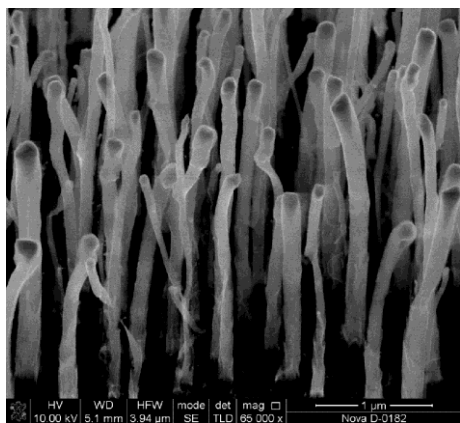


Рис.1. РЭМ-изображение массива ВОУНТ

(FEI Company, Нидерланды), составили около 2 мкм и 8 мкм² соответственно, диаметр нанотрубок в массиве изменялся от 12 до 75 нм (рис.1).

Осаждение нанотрубок из массива ВОУНТ на острие АСМ-зонда проводилось на зондовой нанолaborатории Ntegra ЗАО «НТ-МДТ». В качестве зондов использовались коммерческие кремниевые кантилеверы марки NSG10 [17] с платиновым покрытием и радиусом острия около 80 нм, изношенным после интенсивного использования. Осаждение под действием механического взаимодействия АСМ-зонда с массивом ВОУНТ проводилось методом силовой литографии АСМ в векторном режиме при силе прижима зонда к поверхности массива 0,5 мкН (рис.2,а).

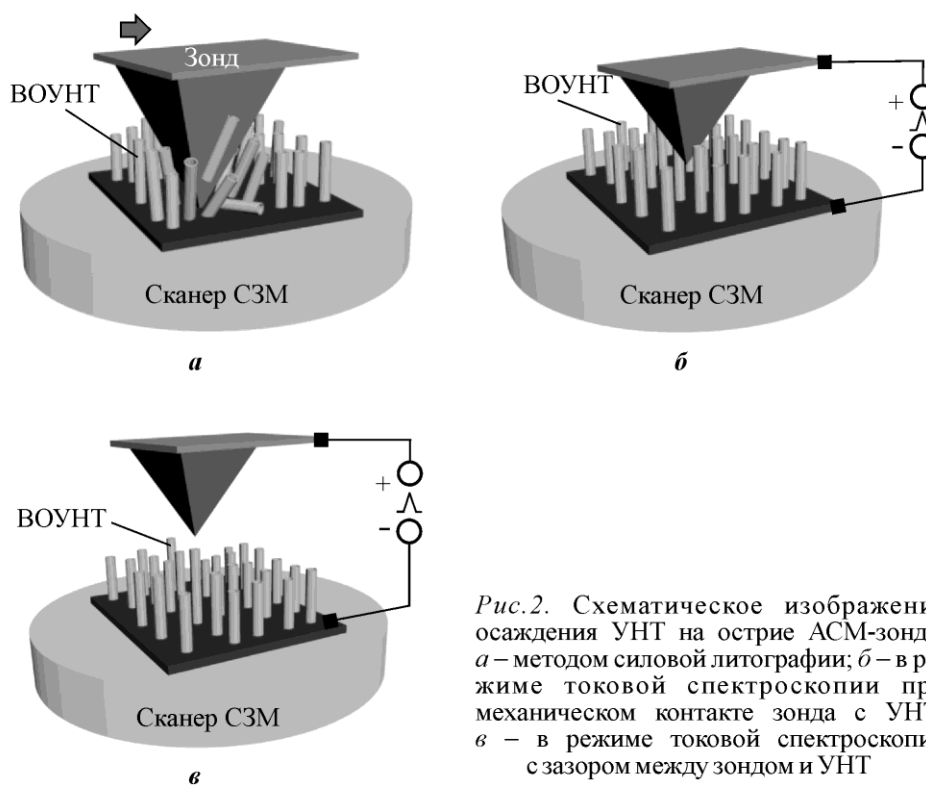


Рис.2. Схематическое изображение осаждения УНТ на острие АСМ-зонда: а – методом силовой литографии; б – в режиме токовой спектроскопии при механическом контакте зонда с УНТ; в – в режиме токовой спектроскопии с зазором между зондом и УНТ

Осаждение под действием электростатического взаимодействия АСМ-зонда с массивом ВОУНТ выполнялось АСМ-методом в режиме токовой спектроскопии при приложении к системе зонд – образец напряжения амплитудой от 10 до 40 В длительностью импульса 1 с, при механическом контакте зонда с поверхностью массива ВОУНТ (рис.2,б) и при расстояниях между АСМ-зондом и поверхностью массива ВОУНТ 1 и 2 нм (рис.2,в). При отведении АСМ-зонда от поверхности массива ВОУНТ напряжение не прикладывалось, при этом углеродные нанотрубки на поверхности зонда АСМ удерживались только за счет сил Ван-дер-Ваальса [19].

Исследование результатов осаждения ВОУНТ на острие АСМ-зонда проводилось методом РЭМ (рис.3).

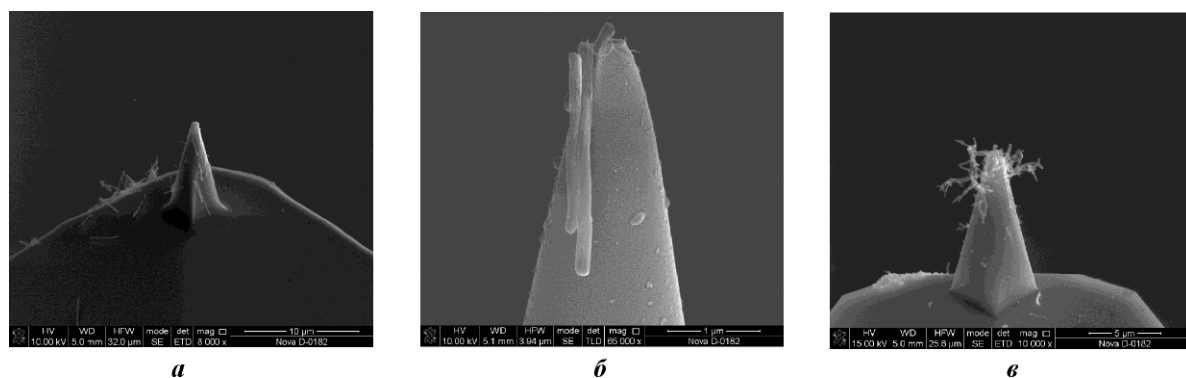


Рис.3. АСМ-зонд после осаждения УНТ различными методами: а – силовой литографии; б – токовой спектроскопии при механическом контакте зонда с ВОУНТ и напряжении на зонде 20 В; в – токовой спектроскопии при расстоянии 1 нм и напряжении на зонде 40 В

Закрепление индивидуальной нанотрубки, осажденной на вершине зонда, выполнялось методом локального ионно-стимулированного осаждения методом ФИП с использованием растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (рис.4,а). Методика закрепления УНТ на поверхности острия зонда основана на осаждении в течение 20 с углерода методом ФИП по графическому шаблону, представляющему окружность заданного диаметра. Острие зонда с зафиксированной методом ФИП УНТ показано на рис.4,б,в.

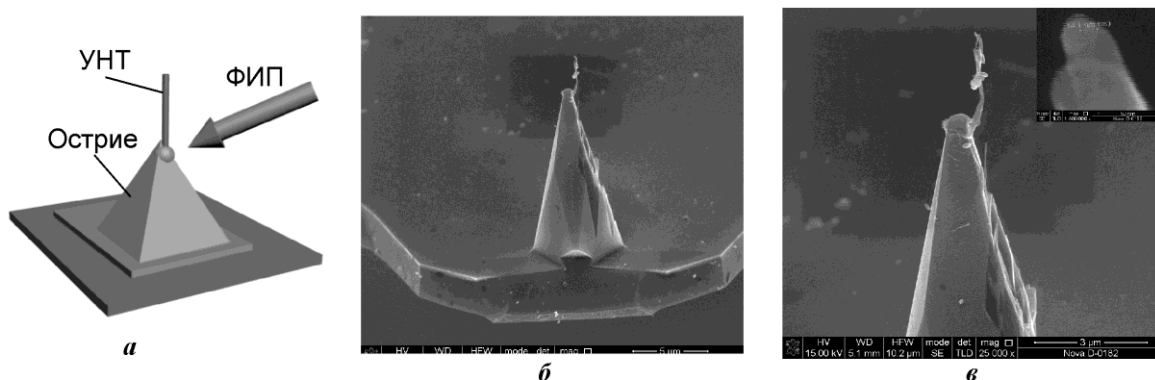


Рис.4. УНТ-зонд, полученный методом токовой спектроскопии при расстоянии 1 нм и напряжении 30 В: а – схематическое изображение процесса фиксации УНТ методом ФИП; б, в – РЭМ-изображение с увеличением $\times 10000$ и $\times 25000$ соответственно

Экспериментальные исследования разрешающей способности полученного УНТ-зонда на достоверность результатов АСМ-измерений проводились на зондовой нанолaborатории Ntegra путем сканирования поверхности рельефной меры высоты TGZ2 [17] с использованием стандартного кантилевера марки NSG 10 и изготовленного УНТ-зонда. Сканирование меры осуществлялось в полуконтактном режиме АСМ. На рис.5 представлены АСМ-изображения поверхности рельефной меры TGZ2, полученные различными кантилеверами. На рис.6 показаны трехмерное АСМ-изображение рельефной меры TGZ2 и профилограмма ее вертикальной стенки. Анализ АСМ-изображений для определения геометрических параметров меры TGZ2 проводился с использованием программных пакетов Image Analysis 3.5 и MathCad 14.

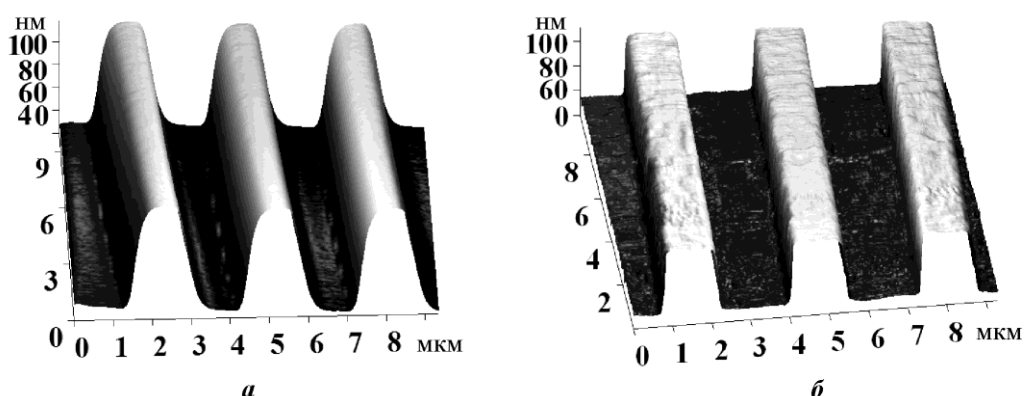


Рис.5. АСМ-изображение поверхности рельефной меры TGZ2, полученное коммерческим зондом (а) и УНТ-зондом (б)

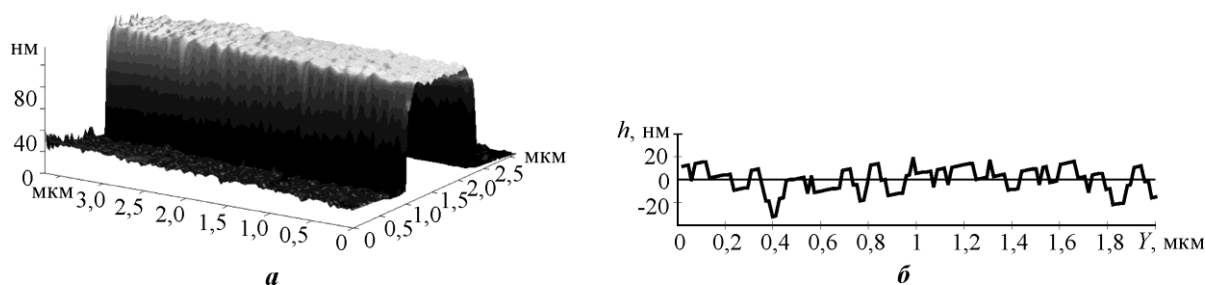


Рис.6. Элемент рельефной меры TGZ2: а – 3D АСМ-изображение; б – профилограмма вертикальной стенки

Результаты и их обсуждение. В результате проведения силовой литографии массива ВОУНТ установлено, что при жестком механическом контакте АСМ-зонда происходит отрыв углеродных нанотрубок от подложки [20], которые затем под действием сил Ван-дер-Ваальса «прилипают» на боковую поверхность зонда и балку кантилевера (см. рис.3,а). Как показали оценки, силы Ван-дер-Ваальса между кремниевым кантилевером и массивом ВОУНТ могут достигать 284 Н/см^2 для индивидуальной нанотрубки [19], что является достаточным для прочного сцепления УНТ с поверхностью зонда. Однако при использовании данного метода затруднительно контролировать число и расположение на поверхности зонда осажденных нанотрубок.

Для прецизионного осаждения углеродных нанотрубок на вершину острия зонда использовался АСМ-метод в режиме токовой спектроскопии. Между АСМ-зондом и

массивом ВОУНТ прикладывалось внешнее напряжение, в результате чего формировалось неоднородное электрическое поле с максимальным значением напряженности вблизи острия зонда. Под действием электростатического взаимодействия между АСМ-зондом и массивом ВОУНТ углеродные нанотрубки отрываются от подложки без механического воздействия на них, переносятся на зонд и локализуются вблизи его острия.

Результаты исследования влияния прикладываемого напряжения при механическом контакте АСМ-зонда с массивом ВОУНТ (см. рис.2,б) показали, что при напряжении менее 10 В не наблюдается осаждения УНТ на поверхность острия зонда. Это связано с недостаточным значением напряженности электрического поля для отрыва ВОУНТ от подложки. При напряжении в диапазоне 10 – 20 В происходит осаждение единичных УНТ. Однако данные результаты плохо воспроизводимы, что, вероятно, связано с отрывом УНТ не от подложки, а с разрывом нанотрубки в возможных местах дефектов ее структуры, т.е. вероятность осаждения УНТ на поверхность острия АСМ-зонда при приложении напряжения менее 20 В зависит от наличия дефектов в осаждаемой УНТ. При приложении напряжения амплитудой от 20 до 30 В наблюдается осаждение двух-трех УНТ преимущественно на боковую поверхность зонда (рис.3,б). Это, возможно, связано с частичным проникновением зонда в глубину массива ВОУНТ при его подводе к поверхности.

Для решения данной проблемы осаждение углеродных нанотрубок проводилось при расстоянии между АСМ-зондом и поверхностью массива ВОУНТ 1 и 2 нм (см. рис.2,в). В результате установлено, что при расстоянии между зондом и массивом ВОУНТ 2 нм и напряжении в диапазоне 20–40 В наблюдается осаждение большого количества УНТ (более 10) вблизи вершины зонда (рис.3,в). Это, вероятно, связано с увеличением площади взаимодействия с поверхностью массива ВОУНТ электрического поля, создаваемого вокруг вершины острия зонда, при удалении зонда от образца. При расстоянии между зондом и массивом ВОУНТ около 1 нм и напряжении от 20 до 30 В наблюдается воспроизводимое осаждение одной или двух нанотрубок вблизи вершины АСМ-зонда. На рис.4,б представлено РЭМ-изображение УНТ, осажженной на зонд при напряжении 30 В. При увеличении напряжения до 40 В количество осаждаемых ВОУНТ возрастает.

Установлено, что оптимальными параметрами осаждения УНТ на острие кантилевера марки NSG10/Pt из экспериментального массива ВОУНТ являются напряжение в диапазоне 20–30 В и расстояние между АСМ-зондом и массивом ВОУНТ около 1 нм. С использованием данных параметров получен УНТ-зонд с радиусом острия около 7 нм и аспектным соотношением сторон острия 1:15, РЭМ-изображение которого представлено на рис.4,в.

Анализ АСМ-изображений рельефной меры TGZ2, полученных кантилевером NSG 10 (см. рис.5,а), показал наличие артефактов сканирования, возникновение которых связано с вкладом угла конусности острия зонда. При сканировании рельефной меры TGZ2 УНТ-зондом на АСМ-изображении артефакты отсутствуют (см. рис.5,б).

Высота и период структур меры TGZ2, определенные с помощью УНТ-зонда, составили 112 нм и 3 мкм соответственно, что хорошо коррелирует с паспортными данными (таблица). Кроме того, сравнение АСМ-изображений меры TGZ2, полученных коммерческим кантилевером NSG10 (см. рис.5,а) и УНТ-зондом (см. рис.5,б), показало, что благодаря высокому аспектному соотношению сторон модифицированного УНТ-зонда лучше отображалась вертикальность боковых стенок структур меры.

Геометрические параметры рельефной меры TGZ2

Данные	Параметры меры TGZ2		
	Период, мкм	Высота, нм	Угол отклонения вертикальной стенки от нормали, градус
Паспортные	3,0±0,01	112±2	~ 0
Измеренные зондом NSG10	2,9±0,02	110±2	11±1
Измеренные УНТ-зондом	3,05±0,04	112±0,5	3±1

Результаты анализа вертикальной стенки рельефной меры TGZ2 (см. рис.6) показали, что шероховатость боковой поверхности (среднее из максимальных высот неровностей на поверхности по ГОСТ 7016-82) составила 9,1 нм.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований методов модификации зондов для атомно-силовой микроскопии путем осаждения УНТ на острие изношенного зонда под действием механического и электростатического взаимодействий между АСМ-зондом и массивом ВОУНТ показали следующее. При проведении силовой нанолитографии массива ВОУНТ нанотрубки, оторванные от подложки, «прилипают» на поверхность зонда за счет сил Ван-дер-Ваальса, но локализации на острие зонда не происходит. При приложении между АСМ-зондом и массивом ВОУНТ импульса напряжения возможно локальное осаждение УНТ на острие зонда, результат которого зависит от амплитуды и расстояния между зондом и поверхностью ВОУНТ.

Установлено, что при напряжении 20–40 В происходят отрыв ВОУНТ от подложки и последующее осаждение нанотрубки на поверхность АСМ-зонда. При механическом контакте зонда с массивом ВОУНТ осаждение под действием электрического поля происходит на боковую поверхность зонда. Осаждение углеродных нанотрубок на острие АСМ-зонда наблюдается при расстоянии более 1 нм. Однако с увеличением расстояния между зондом и поверхностью массива ВОУНТ (более 2 нм) происходит осаждение большого числа нанотрубок, что затрудняет получение УНТ-зонда. Таким образом, экспериментально показано, что осаждение одной-двух углеродных нанотрубок на вершину АСМ-зонда из полученного экспериментально массива ВОУНТ наблюдается при напряжении 20–30 В и расстоянии 1 нм.

На основе полученных результатов сформирован УНТ-зонд радиусом около 7 нм и с аспектным соотношением сторон острия 1:15. Результаты исследования УНТ-зондом поверхности рельефной меры TGZ2 показали более высокую латеральную и вертикальную разрешающую способность по сравнению с коммерческим зондом, а также возможность применения УНТ-зондов для исследования вертикальных стенок структур методом CD-AFM.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления и восстановления специальных зондов для атомно-силовой микроскопии, в том числе зондов для CD-AFM, а также при разработке методик межоперационного экспресс-контроля параметров технологического процесса производства элементов микро- и наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.

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 РФФИ (проекты № 14-07-31322 мол_а, № 14-07-31162 мол_а).

Литература

1. *Orji N.G., Dixon R.G.* Higher order tip effects in traceable CD-AFM-based linewidth measurements // Meas. Sci. Technol. – 2007. – № 18. – P. 448–455.
2. *Bhushan B.* Springer handbook of nanotechnology. – 3rd ed. – 2010. – 1964 p.
3. *Неволин В.К.* Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2006. – 160 с.
4. Нанотехнологии в электронике / *Под ред. Ю.А. Чаплыгина.* – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
5. Формирование и исследование матрицы мемристоров на основе оксида титана методами зондовой нанотехнологии / *В.И. Авиллов, О.А. Агеев, В.А. Смирнов и др.* // Изв. вузов. Электроника. – 2014. – № 2 (106). – С. 50–57.
6. Probe modification for scanning probe microscopy by the focused ion beam method / *B.G. Konoplev, O.A. Ageev, V.A. Smirnov et al.* // Russian Microelectronics. – 2012. – Vol. 41. – № 1. – P. 41–50.
7. *Savenko A., Yildiz I., Boggild P.* Out-of-plane bending based on SiN-ion-irradiation and bilayer structures for easy access for micromanipulation // Microelectronic Engineering. – 2013. – Vol. 110. – P. 398–402.
8. Ultra-high aspect ratio replaceable AFM tips using deformation-suppressed focused ion beam milling / *A. Savenko, I. Yildiz, D.H. Petersen et al.* // Nanotechnology. – 2013. – N 24. – P. 465701–465708.
9. Модификация зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков / *Б.Г. Коноплев, О.А. Агеев, В.А. Смирнов и др.* // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 4. – С. 4–8.
10. Иглы на основе многостенных углеродных нанотрубок для сканирующей зондовой микроскопии / *О.В. Демичева, Г.Б. Мешков, О.В. Сеницына и др.* // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3. – № 11. – С. 118–123.
11. *Hafner J.H., Cheung C.L., Lieber C.M.* Growth of nanotubes for probe microscopy tips // Nature. – 1999. – Vol. 398. – P. 761–762.
12. *Hafner J.H., Cheung C.L., Lieber C.M.* Direct growth of single-walled carbon nanotube scanning probe microscopy tips // J. Am. Chem. Soc. – 1999. – Vol. 121. – P. 9750–9751.
13. Morphology control and integration of the carbon nanotube tip for AFM / *J.K. Park, J.H. Lee, Ch.S. Han et al.* // Current Appl. Phys. – 2006. – Vol. 6. – Sup. 1. – P. e220–e223.
14. *Fang F.Z., Xu Z.W., Dong S., Zhang G.X.* High aspect ratio nanometrology using carbon nanotube probes in atomic force microscopy // Annals of the CIRP. – 2007. – Vol. 56, No 1. – P. 533–536.
15. Precision carbon nanotube tip for critical dimension measurement with atomic force microscope / *B.C. Park, K.Y. Jung, J. Hong et al.* // Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX. – 2005. – Vol. 5752. – P. 412–419.
16. The effect of the shape of a tip's apex on the fabrication of an AFM tip with an attached single carbon nanotube / *H.W. Lee, S.H. Kim, Y.K. Kwak et al.* // Sensors and Actuators. – 2005. – A 125. – P. 41–49.
17. Официальный сайт ЗАО «НТ-МДТ». – URL: <http://www.ntmdt.ru> (дата обращения: 19 ноября 2014 г.)
18. Исследование режимов формирования каталитических центров для выращивания ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD / *О.А. Агеев, О.И. Ильин, В.С. Климин и др.* // Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – Т. 13. – № 2. – С. 226–231.
19. Исследование возможности создания биомимических адгезионных покрытий на основе массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок / *О.А. Агеев, О.И. Ильин, В.С. Климин и др.* // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9. – С. 58–67.
20. Определение геометрических параметров массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом атомно-силовой микроскопии / *О.А. Агеев, О.И. Ильин, А.С. Коломийцев и др.* // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 3. – С. 9–13.

Статья поступила
21 ноября 2014 г.

Агеев Олег Алексеевич – доктор технических наук, профессор, директор Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (ЮФУ) (г. Таганрог). *Область научных интересов:* стимулированные фотонным, ионно- и электронно-лучевым воздействием физико-химические процессы технологии микро- и нанoeлектроники; разработка и исследование технологических процессов изготовления элементной базы приборов нанoeлектроники; твердофазные процессы в полупроводниках и диэлектриках при импульсной термообра-

ботке некогерентным излучением и электронно-лучевыми потоками; разработка и исследование технологических процессов формирования контактов к активным элементам приборов экстремальной электроники. **E-mail: ageev@sfnedu.ru**

Быков Александр Викторович – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник ЗАО «НТ-МДТ» (г. Москва). *Область научных интересов:* сканирующая зондовая микроскопия, разработка и исследование технологических процессов изготовления элементной базы приборов нанoeлектроники.

Коломийцев Алексей Сергеевич – доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ (г. Таганрог). *Область научных интересов:* технология микро- и нанoeлектроники, разработка и исследование технологических процессов микро- и нанoeлектроники на основе использования фокусированных ионных пучков, аналитическая растровая электронная микроскопия наноразмерных структур.

Коноплев Борис Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры конструирования электронных систем Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ (г. Таганрог). *Область научных интересов:* микроэлектроника и методы автоматизированного проектирования.

Рубашкина Марина Владимировна – аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ (г. Таганрог). *Область научных интересов:* нанотехнология, нанoeлектроника, сканирующая зондовая микроскопия, углеродные нанотрубки.

Смирнов Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ (г. Таганрог). *Область научных интересов:* сканирующая зондовая микроскопия, фотонно-стимулированные физико-химические процессы технологии микро- и нанoeлектроники, разработка и исследование технологических процессов изготовления элементной базы приборов нанoeлектроники.

Цуканова Олеся Геннадьевна – магистрант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ (г. Таганрог). *Область научных интересов:* разработка и исследование процессов изготовления мемристорных структур на основе наноструктурированных пленок оксидов металлов.