

# НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.385

**Б. Г. Коноплев**, д-р техн. наук, проф., декан,  
**О. А. Агеев**, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,  
**В. А. Смирнов**, канд. техн. наук, доц.,  
**А. С. Коломийцев**, аспирант,  
**О. И. Ильин**, инженер,  
e-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru  
Технологический институт Южного федерального  
университета в г. Таганроге

## МОДИФИКАЦИЯ ЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ-КАНТИЛЕВЕРОВ ДЛЯ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Поступила в редакцию 23.11.10

*Представлены результаты экспериментальных исследований по модификации зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии (АСМ) путем осаждения на поверхность балки кантилевера вольфрамового острия методом фокусированных ионных пучков (ФИП) с применением высокоселективной газовой химии. Показано, что полученные методом ФИП зонды длиной 5 мкм и радиусом закругления порядка 50 нм позволяют повысить точность измерений тестовых объектов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления и модификации зондовых датчиков-кантилеверов АСМ, а также при исследовании структур микро- и наносистемной техники.*

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, кантилевер, фокусированный ионный пучок, ионно-стимулированное осаждение, сопротивление растекания

### Введение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является одним из основных методов исследования локальных электрических, химических и механических свойств поверхности с высоким пространственным разрешением в различных средах, а также активно используется при формировании наноразмерных структур нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники методами зондовой нанолитографии

[1–3]. Получение изображения методом АСМ происходит путем регистрации параметров взаимодействия в системе зонд—подложка, при этом на достоверность результатов существенное влияние оказывают параметры зондовых датчиков [1–4]. В качестве зондовых датчиков в методе АСМ используют кантилеверы, основными параметрами которых являются жесткость, форма, тип покрытия и радиус острия зонда [1]. В этих условиях актуальной задачей зондовой нанотехнологии является формирование кантилеверов с заданной геометрией и радиусом закругления острия зонда.

Технология изготовления коммерческих кантилеверов на основе кремния базируется на технологии микрообработки. При этом, как правило, формирование пирамидального острия кантилевера с радиусом закругления менее 30 нм происходит за счет анизотропного травления кремния [3]. Технологические процессы изготовления кантилеверов рассчитаны на массовое производство и не позволяют варьировать форму острия в широких пределах. Создание зондовых датчиков-кантилеверов для решения специальных метрологических и технологических задач (например с высоким аспектным соотношением) повышает себестоимость кантилевера в несколько раз. Другой проблемой АСМ является достаточно низкая долговечность зондов. В зависимости от типа исследуемого материала, одного зондового датчика хватает, как правило, на несколько циклов измерений, после чего геометрия острия зонда нарушается, что делает невозможным проведение дальнейших исследований данным зондом.

Метод фокусированных ионных пучков позволяет формировать микро- и наноразмерные структуры на поверхности подложки ионно-лучевым травлением и ионно-стимулированным осаждением материалов из газовой фазы с высоким разрешением и воспроизводимостью параметров [5, 6]. В отличие от стандартных технологических процессов, основанных на использовании литографических методов и химического травления для структурирования поверхности подложки, обработка методом ФИП происходит с высокой скоростью, независимо от типа обрабатываемой поверхности и не требует проведения дополнительных технологических операций [5].

Цель работы — разработка и исследование методики модификации кантилеверов с использованием технологии ФИП, а также исследование параметров полученных зондов методом АСМ.

## Методика эксперимента

Экспериментальные исследования по модификации и исследованию характеристик кантилеверов проводили с использованием многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (производитель — ЗАО "Нанотехнология-МДТ", г. Зеленоград) и РЭМ Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды). В качестве экспериментального образца использовали кантилевер марки NSG 10 (рис. 1) [7] с разрушенным после интенсивного использования острием (рис. 2, а). Формирование нового острия, на месте сломанного, осуществлялось локальным ионно-стимулированным осаждением вольфрама методом ФИП. Для локализации процесса осаждения был создан специальный графический шаблон, представляющий собой окружность заданного диаметра.

На начальном этапе было проведено выравнивание области балки путем осаждения проводящего слоя площадью  $2 \times 2$  мкм толщиной порядка 250 нм. После этого на сформированной площадке осуществлялось осаждение структуры острия зонда. Время проведения процесса составило 35 с, в результате на балке кантилевера было сформировано вольфрамовое острие высотой 5 мкм и радиусом закругления около 50 нм (рис. 2, б).

Для исследования характеристик кантилеверов методом АСМ в полуконтактном режиме проводилось сканирование субмикронных структур на поверхности калибровочной решетки TGQ 1 [7] с использованием стандартного и модифицированного методов ФИП кантилеверов.

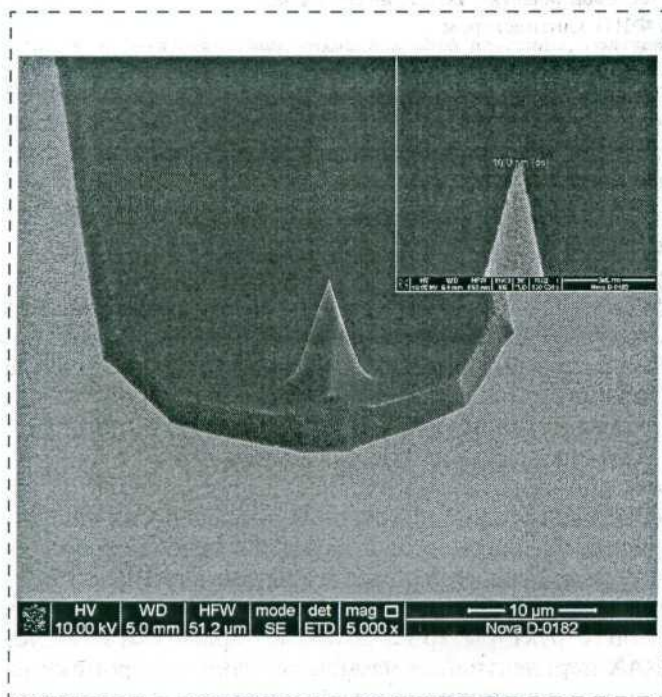


Рис. 1. РЭМ-изображения кремниевого кантилевера NSG 10

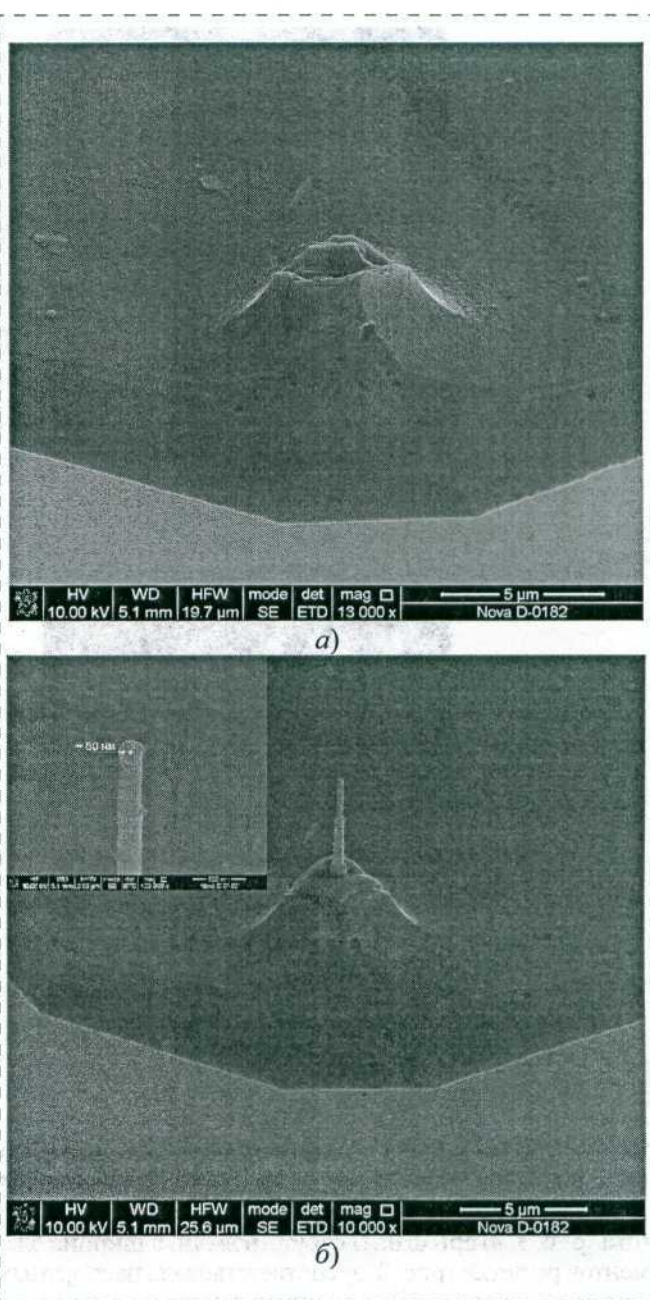


Рис. 2. РЭМ-изображения кантилевера с изношенным острием (а) и кантилевера, модифицированного методом ФИП (б)

## Результаты и их обсуждение

Анализ полученных АСМ-изображений (рис. 3) показал, что форма структур решетки TGQ1, полученных стандартным кантилевером (рис. 3, а) содержит артефакт в виде ступеньки (рис. 3, б), связанный с износом острия зонда после проведения нескольких циклов сканирования (вкладка на рис. 3, б). При этом угол конусности острия стандартного кантилевера (около  $22^\circ$  [7]) вносил существенный вклад в искажение формы и латеральных геометрических размеров структуры тестовой решетки, ширина элементов решетки составила 2 мкм (рис. 3, б). При сканировании решетки TGQ1 модифицированным методом ФИП кантилевером на АСМ-изображе-

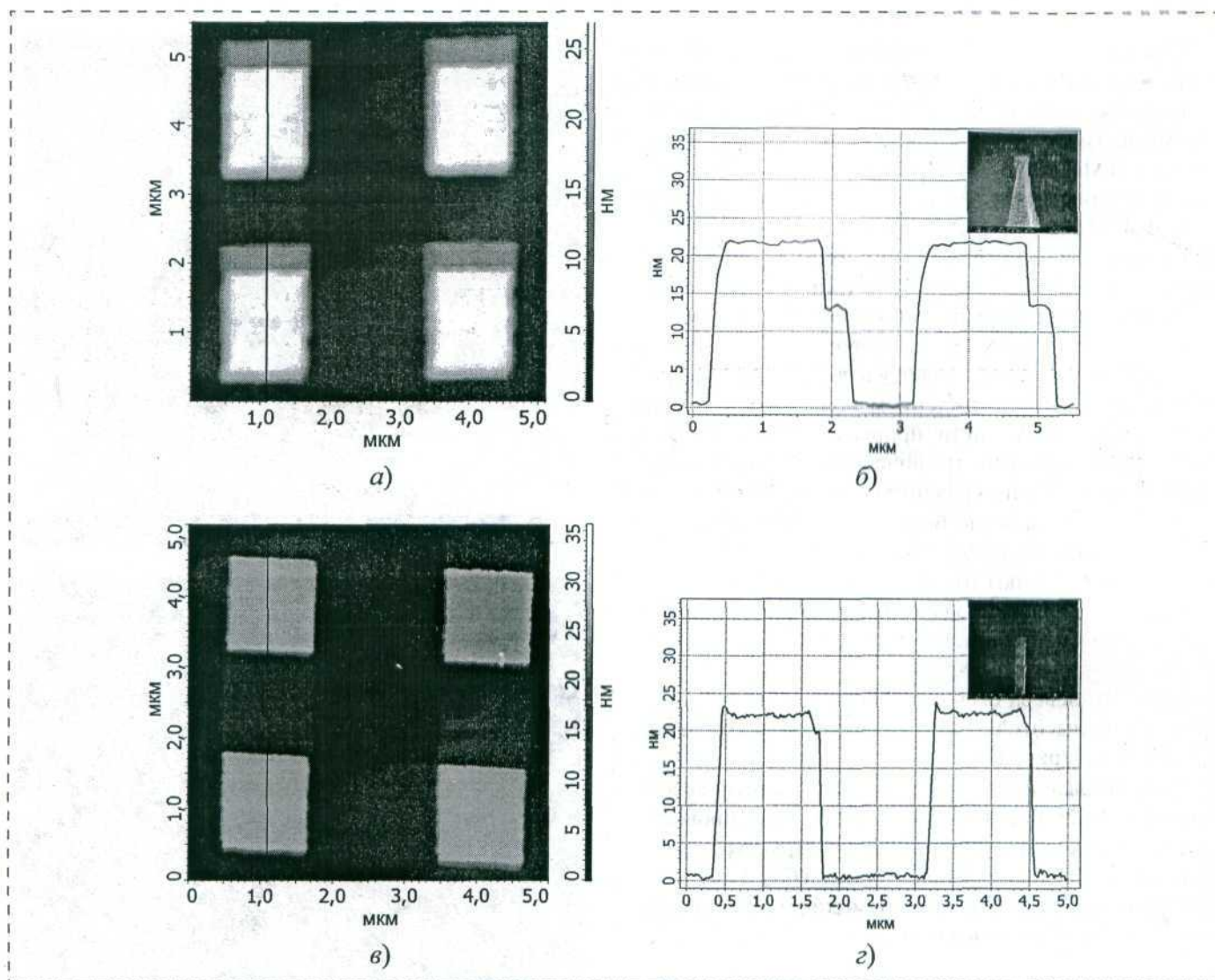


Рис. 3. АСМ-изображения и профилограммы субмикронных структур тестовой решетки TGQ1, полученные: а, б — исходным кантилвером; в, г — модифицированным методом ФИП кантилвером

нии (рис. 3, в) артефакты отсутствовали, а ширина элементов решетки (рис. 3, г) соответствовала паспортным данным (1,5 мкм [7]), что определяется малым углом конусности модифицированного острия (около 1°).

Модифицированные зондовые датчики-кантилверы для АСМ при исследовании топологии элементов нано- и микросистемной техники применяются в основном для формирования изображений структур с высокими аспектным соотношением и крутизной стенок. В частности, для исследования микроканальных пластин (МКП), которые представляют собой стеклянные пластины толщиной 0,75 мм со сквозными отверстиями [8], необходимо использовать кантилверы с высоким аспектным соотношением сторон и углом конусности острия менее 3° [8].

На рис. 4, а приведено АСМ-изображение микроканальной пластины, полученное модифицированным методом ФИП кантилвером. Анализ полученных АСМ-изображений показывает, что вертикальность стенок микроканалов МКП соответствует паспортным данным [8], при этом зонд длиной 5 мкм проникал в канал на полную длину острия (рис. 4, б).

Одной из наиболее актуальных задач зондовой нанотехнологии является измерение электрических параметров элементов наноэлектроники и наноразмерных структур [9].

В работе проводились исследования возможности использования модифицированного кантилвера для измерения электрических параметров наноразмерных структур методом АСМ. Исследовалась структура планарного элемента металлической наноэлектроники на основе наноразмерного канала проводимости, сформированного в тонкой пленке титана методом ФИП [10]. На рис. 5, а приведено АСМ-изображение распределения тока по поверхности наноразмерного канала шириной около 12 нм (РЭМ-изображение которого приведено на вкладке рис. 5, б), полученное с помощью метода отображения сопротивления. Затем с использованием модифицированного кантилвера была получена ВАХ этой структуры (рис. 5, в), которая соответствует ВАХ перспективных элементов наноэлектроники на основе квазиодномерных каналов проводимости предложенных (исследованных) в работе [2].

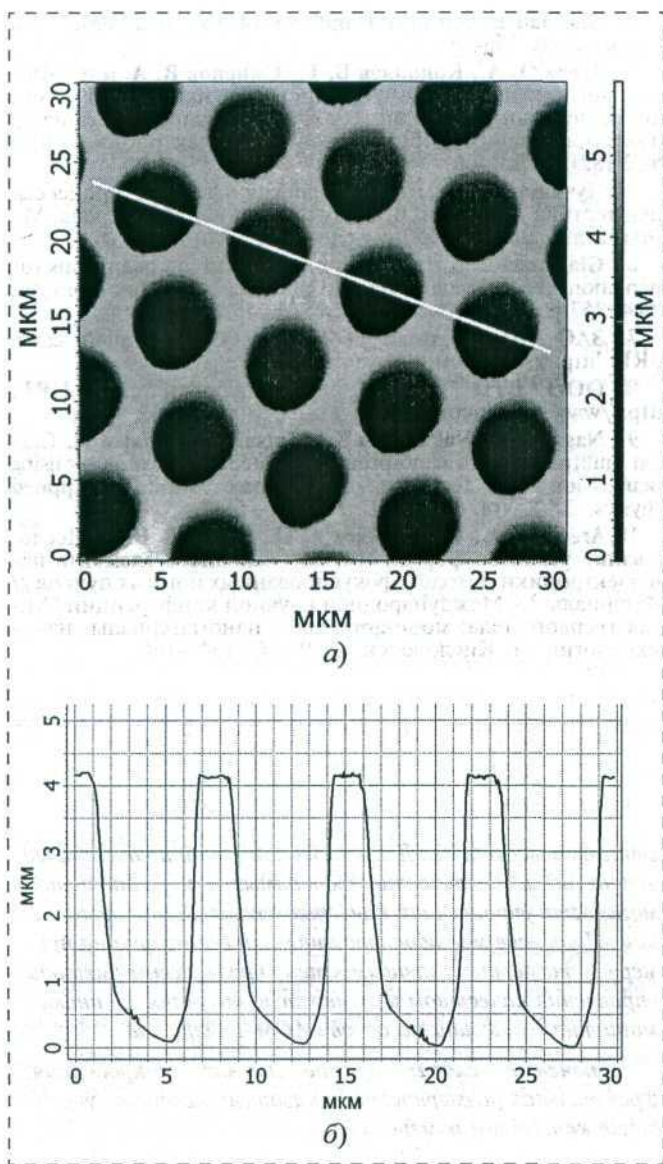


Рис. 4 АСМ-изображение микроканальной пластины, полученное модифицированным методом ФИП кантилевером:  
 а — топология поверхности; б — профилограмма вдоль линии

Таким образом, установлено, что зондовые датчики, модифицированные методом ФИП по разработанной методике, можно успешно применять для измерения электрических характеристик структур методами АСМ. Основными преимуществами полученных кантилеверов над стандартными являются большая площадь и однородность электрического контакта, что обеспечивает более высокую точность измерения характеристик структур, а также большую долговечность, вследствие того, что износ монолитного зонда, сформированного из проводящего материала, не вызывает деградации электрических параметров структуры.

### Заключение

В результате проведенной работы разработана методика модификации зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков, путем выращивания на балке кантилевера острия с регулируемым в широком диа-

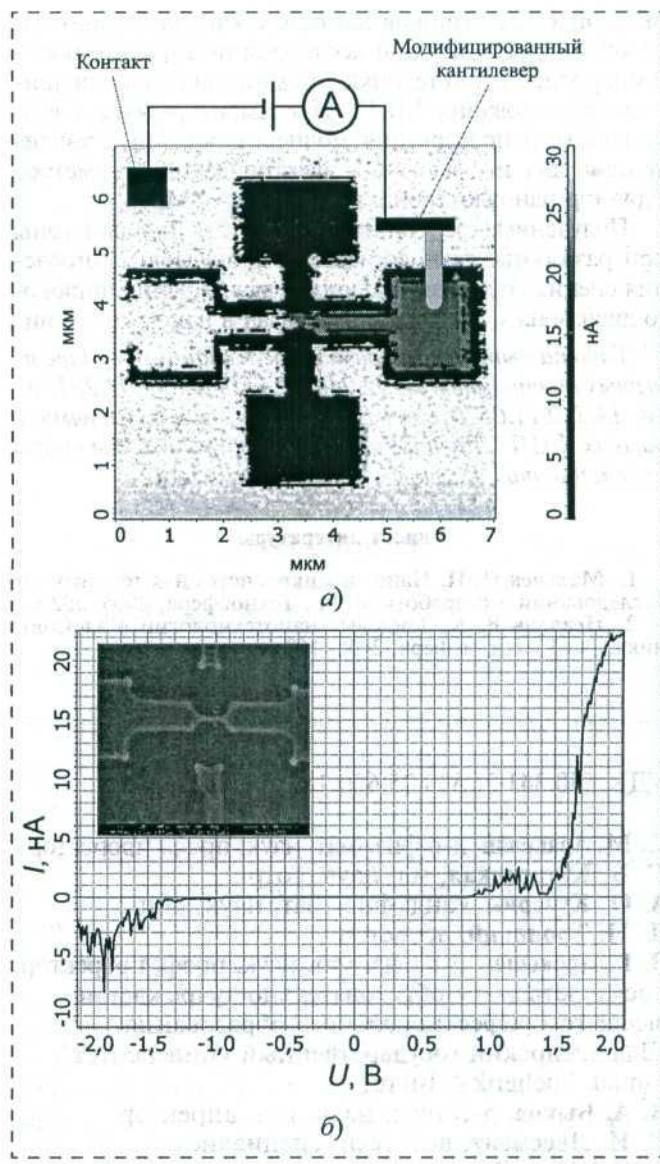


Рис. 5 АСМ-изображение планарной структуры нанозлектроники на основе наноразмерного канала проводимости:  
 а — распределения тока растекания; б — ВАХ планарной структуры

пазоне геометрическими параметрами. Показана возможность восстановления функциональности сломанных зондовых датчиков для атомно-силовой микроскопии. Получены и исследованы экспериментальные образцы модифицированных кантилеверов. Установлено, что использование метода ФИП для выращивания высокоаспектных структур позволяет сформировать острие зонда с радиусом закругления порядка 50 нм, углом конусности около  $1^\circ$ , аспектным соотношением сторон 30 : 1. Исследования субмикронных структур показали преимущества применения модифицированных зондов над стандартными кантилеверами в точности измерения размеров и геометрической формы элементов рельефа калибровочных решеток TGQ1. Установлено, что сформированный зонд имеет более высокую износостойкость по сравнению со стандартным зондом, что позволяет увеличить длительность использования одного кантилевера примерно в 2,5 раза. Показана перспективность применения модифицирован-

ных зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии при исследовании структур нано- и микросистемной техники сложного профиля на примере исследования МКП. Продемонстрирована возможность использования модифицированных кантилеверов для исследования электрических параметров структур нанoeлектроники методом АСМ.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления специализированных зондов для решения широкого диапазона метрологических задач в нанотехнологии.

*Работа выполнена в рамках реализации государственных контрактов № 02.740.11.5119 от 09.03.2010 г.; № 14.740.11.0520 от 01.10.2010 г., заключенными в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы.*

#### Список литературы

1. Мальцев П. П. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. — М.: Техносфера, 2006. 160 с.

3. Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology, 3rd edition. 2010. 1964 p.

4. Агеев О. А., Коноплев Б. Г., Смирнов В. А. и др. Фотоактивация процессов формирования наноструктур методом локального анодного окисления пленки титана // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2010. № 2 (82). С. 23—30.

5. Лучинин В. В. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика / Под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. М.: Физматлит, 2006. — 552 с.

6. Giannuzzi L. A. Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. New York: Springer, 2004. 357 p.

7. ЗАО "Нанотехнология МДТ". Официальный сайт. URL: <http://www.ntmdt.ru>

8. ООО ВТЦ "Баспик". Официальный сайт. URL: <http://www.baspik.com/>

9. Nagase M., Nakamatsu K., Matsui S., Namatsu H. Carbon multi-probes with nanosprings integrated on Si cantilever using focused-ion-beam technology // Japanese Journal of Applied Physics. 2005. Vol. 44, № 7B. P. 5409—5412.

10. Агеев О. А., Коломийцев А. С., Смирнов В. А. Исследование режимов формирования планарного элемента нанoeлектроники методом фокусированных ионных пучков // Материалы IX Международной научной конференции "Химия твердого тела: монокристаллы, наноматериалы, нанотехнологии", г. Кисловодск, 2009 г. С. 164—166.

УДК 550.341.2; 539.25:620.187

С. М. Аракелян, д-р физ.-мат. наук, проф, проректор;  
С. В. Кутровская, мл. науч. сотр.,  
А. О. Кучерик, канд. физ.-мат. наук, доц.,  
Д. П. Троицкий, ассистент,  
В. Г. Прокошев, д-р физ.-мат. наук, проф, проректор,  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Владимирский государственный университет"  
e-mail: [kucherik@vlsu.ru](mailto:kucherik@vlsu.ru),  
В. А. Быков, д-р техн. наук, ген. директор,  
С. И. Леесмент, вед. техн. специалист,  
ЗАО "НТ-МДТ"  
e-mail: [leesment@ntmdt.ru](mailto:leesment@ntmdt.ru)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ АНАЛИЗА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОЛУЧАЕМОГО ИНФОРМАЦИОННОГО МАССИВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Поступила в редакцию 02.12.10

*Методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) получают все большее распространение в задачах исследования нанобъектов и наноструктур. Используемые подходы позволяют получать с высоким разрешением карту*

*свойств поверхности. Для многих измерений принципиален вопрос об избыточности проводимых измерений и возможности управлением качеством получаемой информации. На основе методов фрактальной геометрии на примере одномерных зависимостей предложены методы управления качеством и точностью получаемого информационного массива на основе АСМ-измерений.*

*Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, фрактальная размерность, показатель Херстона, управление качеством измерений*

### Введение

Методы фрактальной геометрии, основанные на вычислении фрактальных размерностей [1] или определении показателя Херста [2, 3] для изображений, полученных с применением растровых электронных и сканирующих атомно-силовых микроскопов, получают все большее распространение в задачах анализа наноразмерных объектов. Данные методы позволяют получать численные характеристики микрогеометрии исследуемого объекта и дают возможность сравнения различных объектов по степени упорядоченности и подобия [4, 5].

Однако в большинстве работ при расчете фрактальной размерности используются стандартные методы, основанные на методе покрытия Минковского [6—8]. Такой подход требует дополнительной обработки анализируемых данных. В данной статье предложен метод расчета фрактальной размерности, использующий скейлинг-эффект [7]. На основе анализа полученных зависимостей предложены методы оценки избыточности измерений и метод