

Раздел III. Наносистемная техника

УДК 621.38-022.532

О.А. Агеев, В.А. Смирнов, А.С. Коломийцев, А.Л. Громов

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ АТОМНО-СИЛОВЫХ МИКРОСКОПОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований по модификации зондовых датчиков (кантилеверов) для атомно-силовой микроскопии (АСМ) методом фокусированных ионных пучков (ФИП). С использованием травления методом ФИП получены кантилеверы с радиусом закругления острия менее 10 нм и аспектным отношением 1:50. С помощью ионно-стимулированного осаждения методом ФИП получены кантилеверы с вольфрамовым острием длиной 5 мкм и радиусом закругления порядка 50 нм. Показано, что применение модифицированных зондовых датчиков методом ФИП позволяет повысить разрешающую способность и достоверность измерений тестовых объектов методом АСМ. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании структур микро- и нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.

Атомно-силовая микроскопия; кантилевер; фокусированный ионный пучок; ионно-лучевое травление; ионно-стимулированное осаждение.

O.A. Ageev, V.A. Smirnov, A.S. Kolomytsev, A.L. Gromov

APPLICATION OF FOCUSED ION BEAMS FOR ATOMIC FORCE MICROSCOPY PROBES MODIFICATION

Results of atomic force microscopy (AFM) probes-cantilevers modification by focused ion beams (FIB) experimental researches are presented. With use of FIB treatment are received cantilevers with tip radius than 10 nm and aspect ratio 1:50. With the help it is ionic-stimulirovannogo sedimentation by FIB are received cantilevers with a tungsten tip in length 5 microns and radius 50 nm. It is shown that application modified by FIB probes allows increasing resolution and reliability of measurements of test objects by AFM. The received results can be used at research of micro- and nanoelectronics, micro- and nanosystems structures.

Atomic force microscopy; cantilever; focused ion beam; ion beam treatment; ion-induced deposition.

Атомно-силовая микроскопия является современным методом исследования поверхности твердых тел с высоким пространственным разрешением, а также позволяет формировать наноразмерные структуры элементов нанoeлектроники, а также микро- и наносистемной техники с использованием зондовой нанолитографии [1–3]. Получение изображения методом АСМ происходит путем регистрации силы взаимодействия между поверхностью подложки и острием зонда. В качестве зондовых датчиков в методе АСМ используются кантилеверы, параметры которых оказывают существенное влияние на пространственное разрешение и достоверность результатов измерений [1–4]. К основным параметрам кантилеверов относятся радиус закругления острия, длина и аспектное соотношение сторон острия. Для получения достоверных результатов измерений необходимо, чтобы радиус закругления острия был много меньше размеров исследуемых объектов. При исследовании топологии элементов с высокой крутизной

стенок применяют кантилеверы, острие которых имеет достаточную длину и высокое аспектное соотношение.

Ионно-лучевое травление и ионно-стимулированное осаждение материалов из газовой фазы методом фокусированных ионных пучков позволяет структурировать поверхность образца, с нанометровым разрешением, высокой скоростью и воспроизводимостью, а также, в отличие от литографических методов, не требует проведения дополнительных подготовительных операций [5, 6].

Целью работы является разработка методик модификации кантилеверов с использованием технологии ФИП, а также исследование влияния параметров полученных зондов на разрешающую способность и достоверность результатов сканирования поверхности тестовых структур методом АСМ.

Модификации и исследование характеристик зондов производились с использованием сверхвысоковакуумного модуля фокусированных ионных пучков (СВВ ФИП) многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (производитель – ЗАО «Нанотехнология-МДТ», г. Зеленоград) и растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды).

Экспериментальные исследования по модификации зондовых датчиков АСМ ионно-лучевым травлением проводились на экспериментальных образцах, в качестве которых использовались кремниевые кантилеверы марки NSG 10 (рис. 1,а) [7]. Кантилеверы помещались в вакуумную камеру модуля СВВ ФИП нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 таким образом, чтобы острие зонда было направлено вверх, в направлении источника ионов. Рабочий вакуум при проведении ионно-лучевой обработки поддерживался на уровне $2\div 3 \times 10^{-4}$ Па. При формировании экспериментальных образцов АСМ-кантилеверов ионно-лучевое травление проводилось при следующих параметрах: ускоряющее напряжение ионного пучка 30 кэВ, ток ионного пучка 0,3 нА, время воздействия ионного пучка в каждой точке шаблона варьировалось от 500 нс до 4,6 мкс.

Для модификации кантилеверов методом ФИП была разработана методика, по которой травление острия производилось при управлении пространственным распределением интенсивности потока ионов, задаваемым комплектом графических растровых шаблонов формата *.bmp.

После модификации поверхность острия кантилеверов исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Анализ РЭМ-изображений (рис. 1) показывает, что на заключительном этапе процесса модификации по разработанной методике травления был получен кантилевер с радиусом закругления острия около 5 нм и аспектным соотношением 1:30 (рис. 1,б).

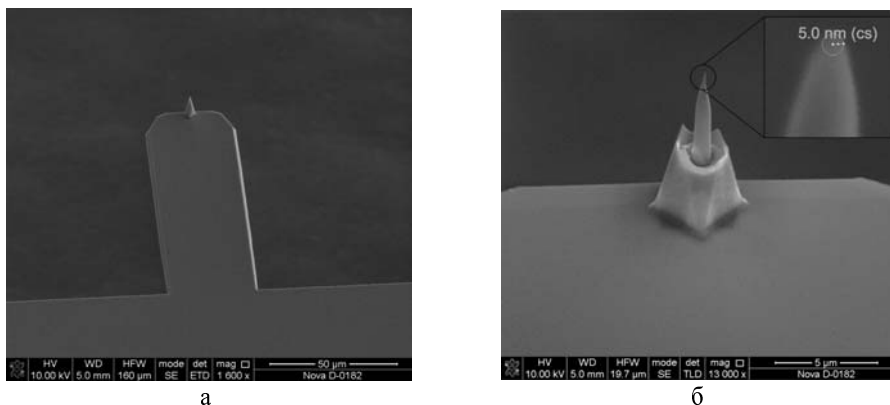


Рис. 1. РЭМ-изображения зондового датчика: а – исходного кантилевера; б – модифицированного кантилевера

Экспериментальные исследования по модификации зондовых датчиков АСМ ионно-стимулированным осаждением проводились на экспериментальных образцах, в качестве которых использовались кантилеверы марки NSG 10 [7] с разрушенным после интенсивного использования острием (рис. 2, а). Для формирования нового острия, на месте сломанного, с использованием ионно-стимулированным осаждением вольфрама методом ФИП был создан специальный графический шаблон, представляющий собой окружность заданного диаметра.

Вначале было проведено осаждение слоя площадью 2×2 мкм толщиной около 250 нм, на котором производилось осаждение структуры вольфрамового острия зонда высотой 5 мкм и радиусом закругления около 50 нм (рис. 2,б). Время проведения процесса осаждения составило 35 секунд.

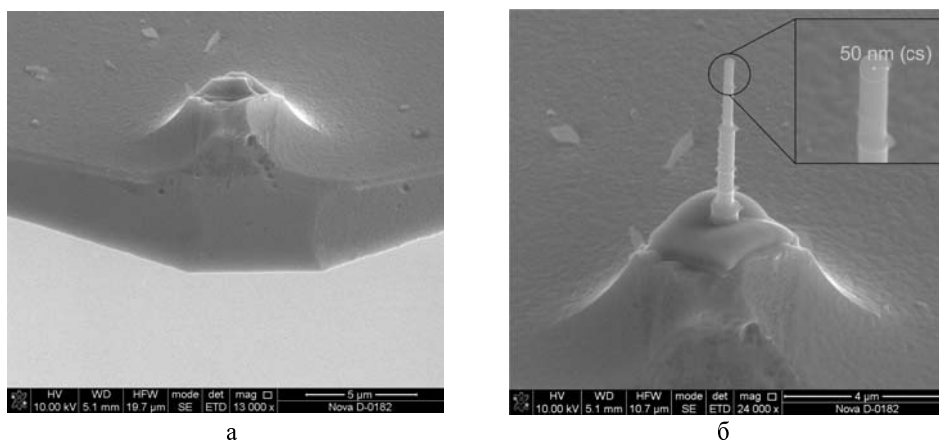


Рис. 2. РЭМ-изображения зондового датчика: а – кантилевера с изношенным острием; б – модифицированного кантилевера

Экспериментальные исследования влияния параметров модифицированных зондовых датчиков на разрешающую способность и достоверность результатов АСМ-измерений проводились на зондовой нанолaborатории NTEGRA Vita (ЗАО – «Нанотехнология-МДТ», г. Зеленоград) путем сканирования поверхности рельефных мер периода и высоты TGZ3 и TGQ1 [7] в полуконтактном режиме АСМ. Определение характерных размеров мер периода и высоты TGZ3 и TGQ1 проводился с использованием программного пакета Image Analysis 3.5 [7].

Анализ полученных АСМ-изображений (рис. 3) показал, что геометрические параметры структур рельефной меры периода и высоты TGZ3, полученных исходным кантилевером, не соответствуют паспортным данным и имеют большую дисперсию. При этом форма структур TGZ3 содержит артефакты, возникновение которых может быть связано с вкладом угла конусности острия кантилевера (около 22° [7]) в искажение формы и латеральных геометрических размеров (рис. 3,а,в). При сканировании рельефной меры периода и высоты TGZ3 модифицированным кантилевером, геометрические параметры, определенные из АСМ-изображений, хорошо коррелировали с паспортными данными [7], а на АСМ-изображении артефакты отсутствовали (рис. 3,б,г).

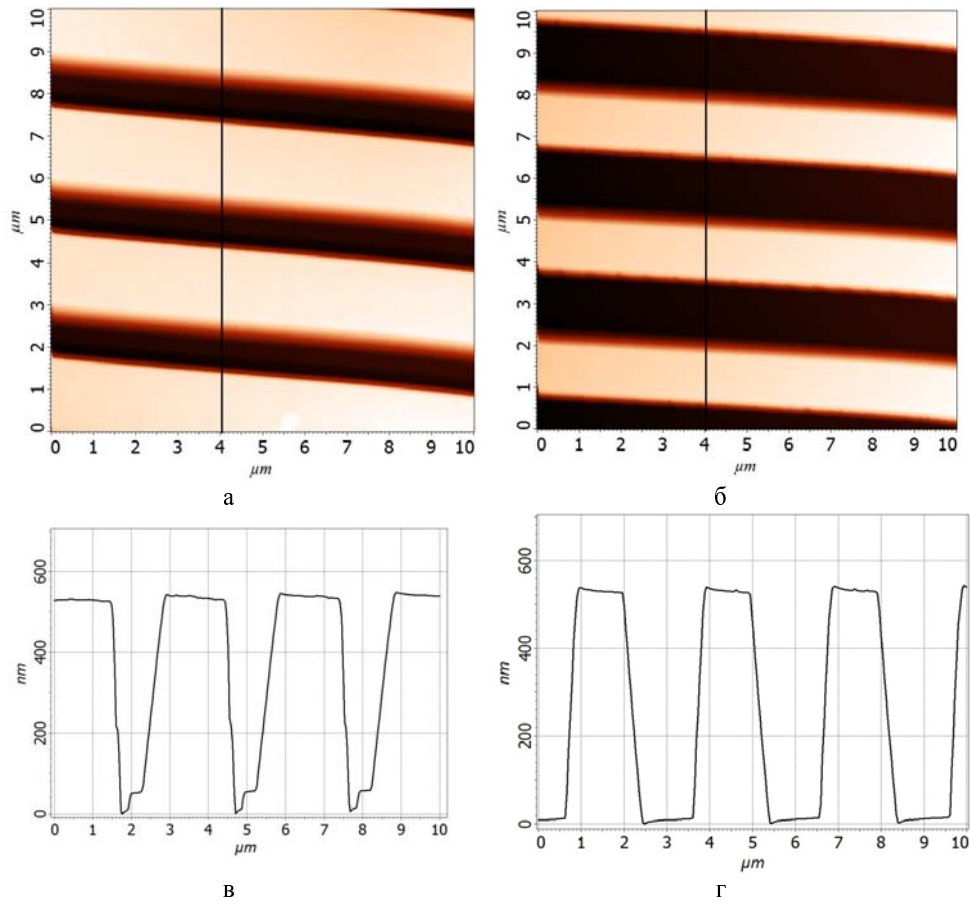


Рис. 3. АСМ-изображения и профилограммы поверхности линейной меры TGZ3, полученные исходным кантилевером (а, в) и модифицированным кантилевером (б, г)

При анализе АСМ-изображений (рис. 4), полученных исходным кантилевером (рис. 4,а), установлено, что форма структур рельефной меры периода и высоты TGQ1 содержит артефакты в виде ступеньки, связанные с деградацией острия зонда после нескольких циклов сканирования поверхности. При этом угол конусности острия исходного кантилевера (около 22° [7]) вносил существенный вклад в искажение формы и латеральных геометрических размеров структуры TGQ1 (ширина квадратных структур решетки составила 2 мкм). При сканировании TGQ1 модифицированным методом ФИП кантилевером, на АСМ-изображении (рис. 4,б) артефакты отсутствовали, а ширина элементов решетки соответствовала паспортным данным (1,5 мкм [7]), что определяется малым углом конусности модифицированного острия.

Были разработаны методики модификации острия зондов для атомно-силовой микроскопии на основе травления и осаждения фокусированным ионным пучком. Изготовлены экспериментальные образцы модифицированных кантилеверов. Показано, что травление методом ФИП позволяет формировать зонды с радиусом закругления острия менее 10 нм и аспектным соотношением 1:50. Использование осаждения методом ФИП позволяет восстанавливать сломанные зондовые датчики для АСМ, формировать зонды с радиусом закругления острия около

50 нм, углом конусности около 1° и аспектным соотношением сторон порядка 1:30. Установлено, что при диагностике субмикронных структур применение модифицированных кантилеверов позволяет минимизировать артефакты АСМ-изображений и повысить разрешающую способность и достоверность получаемых результатов.

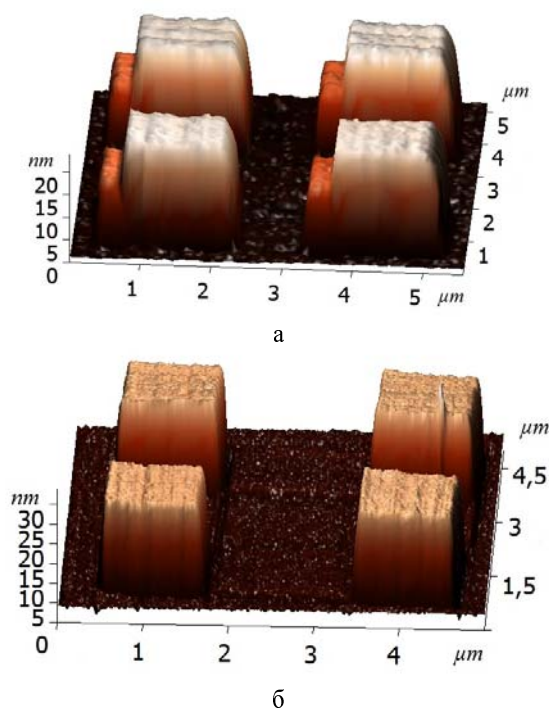


Рис. 4. АСМ-изображения поверхности рельефной меры высоты и периода TGQ1, полученные исходным кантилевером (а) и модифицированным кантилевером (б)

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов модификации зондовых датчиков атомно-силовых микроскопов, а также для решения широкого диапазона метрологических задач в микро- и нанотехнологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. 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.
4. Bhushan V. Springer Handbook of Nanotechnology // 3rd edition. – 2010. – 1964 p.
5. Лучинин В.В. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика / Под ред. В.В. Лучинина, Ю.М. Таирова. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.
6. Коноплев Б.Г., Агеев О.А. Эллионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.
7. Официальный сайт ЗАО «Нанотехнология - МДТ» <http://www.ntmdt.ru>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.А. Лаврентьев.

Агеев Олег Алексеевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; заведующий кафедрой; д.т.н; профессор.

Смирнов Владимир Александрович

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; к.т.н.; доцент.

Коломийцев Алексей Сергеевич

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Громов Александр Леонидович

E-mail: groall@tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head the Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Smirnov Vladimir Alexandrovich

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Associate Professor.

Kolomiytsev Alexey Sergeevich

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Gromov Alexandr Leonidovich

E-mail: groall@tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Undergraduate.

УДК 621.382

О.А. Агеев, А.С. Коломийцев, А.Л. Громов, О.И. Ильин

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СУБМИКРОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК КРЕМНИЯ МЕТОДОМ
ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ**

Проведены экспериментальные исследования технологических режимов субмикронного профилирования поверхности кремниевой подложки с нанометровым разрешением методом фокусированных ионных пучков. Установлены зависимости геометрических параметров сформированных наноразмерных структур от ускоряющего напряжения и тока ионного пучка, а также от времени воздействия ионного пучка в точке при различном количестве проходов пучка по шаблону. Исследованы зависимости скоростей травления полупроводниковых материалов от тока ионного пучка. Определены диапазоны технологиче-