

УДК 621.38

А.В. Быков**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
КАНТИЛЕВЕРОВ ДЛЯ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Для исследования поверхности твердых тел с высоким пространственным разрешением разработано множество различных методов, одним из них является атомно-силовая микроскопия. В работе проведен анализ конструктивно-технологических особенностей кантилеверов – зондовых датчиков в атомно-силовой микроскопии. Представлен типичный технологический процесс изготовления кантилеверов. Рассмотрены различные типы систем регистрации отклонения кантилевера: оптическая, емкостная, пьезоэлектрическая и пьезорезистивная, контактная и туннельная, выделены их достоинства и недостатки. Представлены значения конструктивных параметров промышленных кантилеверов с оптической системой регистрации, значения резонансных частот, коэффициента жесткости консоли. Приведена информация по основным международным поставщикам: Nanonics Imaging Ltd (Израиль), ЗАО «НТ-МДТ» (Россия), Veeco Probes (США), BudgetSensors (Болгария), Nanosensors (Швейцария), Nano and More GmbH (Германия), Nano World (США). По результатам проведенного анализа сделано заключение о целесообразности оптимизации конструктивных параметров кантилеверов под требуемые методики атомно-силовой микроскопии.

Кремниевый кантилевер; объемная микрообработка; системы регистрации отклонения кантилевера; атомно-силовая микроскопия.

A. V. Bykov**DESIGN AND TECHNOLOGY FEATURES CANTILEVERS FOR ATOMIC
FORCE MICROSCOPY**

Many different methods have been developed to study the surface of solids with high spatial, one of which is atomic force microscopy. The analysis of design and technological features of the cantilevers – probes for atomic force microscopy has been carried out. A typical process of cantilever manufacturing has been presented. Various types of beam deflection logon system are considered: optical, capacitor, piezoelectric and pyezorezistivny, contact and tunnel. Their advantages and disadvantages have been highlighted. There were presented Values data design of industrial cantilever with optical system of registration, value of resonant frequencies and coefficient of the console rigidity. The information on the main international suppliers(Nanonics Imaging Ltd (Israel), JSC NT-MDT (Russia), Veeco Probes (USA), BudgetSensors (Bulgaria), Nanosensors (Switzerland), Nano and More GmbH (Germany), Nano World (USA)) has been provided. By results of the carried out analysis, the conclusions on expediency of design optimization for the required cantilever technique of atomic force microscopy have been made.

Silicon cantilever; bulk micromachining; sensor read-out methods; atomic force microscopy.

Введение. Для исследования поверхности твердых тел с высоким пространственным разрешением разработано множество различных методов, одним из них является атомно-силовая микроскопия (АСМ) [1–6]. Последняя дает возможность комплексного изучения морфологии поверхностей проводящих и непроводящих материалов, а также локальных поверхностных свойств в широком диапазоне температур на воздухе, в вакууме, в жидких и газообразных средах с нанометровым разрешением [1–13]. В настоящее время зондовая микроскопия – это бурно развивающаяся область техники и прикладных научных исследований. За прошедшие годы применение атомно-силовой микроскопии позволило достичь уникальных научных результатов в различных областях физики, химии и биологии, например, при изучении процессов роста кристаллов, механизмов формирования пленок и процессов взаимодействия молекул с внедренными функциональными наноструктурами в пленках [1–15]. Наиболее яркими демонстрациями возможностей этого экспериментального направления при исследо-

вании поверхностей твердых тел могут служить: результаты по прямой визуализации поверхностной реконструкции, исследование локального влияния поверхностных дефектов на зонную структуру образца и пр. [4, 6].

В качестве технологического инструмента АСМ вступает зондовый датчик, основной элемент которого представляет упругую консоль (кантилевер) с острием на свободном конце. Среди известных ограничений применимости традиционных кантилеверов выделяют потребность во внешних аппаратных средствах – технически сложных системах оптической регистрации отклонений. В качестве направления решения проблем миниатюризации и расширения области применения АСМ рассматривается разработка кантилеверов с интегрированной системой отклонений и их регистрации [16].

Появление новых конструкций кантилеверов обусловлено стремлением увеличить пространственное разрешение и порог минимально измеряемой силы взаимодействия [4, 16]. Если первое определяется геометрией острия кантилевера, то на величину последней в основном оказывают влияние конструкция кантилевера и геометрия его отдельных элементов.

В простейшей конструкции промышленный кремниевый кантилевер представляет острие на консоли переходящей в основание [17]. Консоль может иметь вид прямоугольного параллелепипеда, имеющего длину l , толщину t ($t \ll l$) и ширину w ($w \ll l$) или треугольного соединения с некоторым углом, с острием длиной l_{ip} на одном из ее концов (рис. 1).

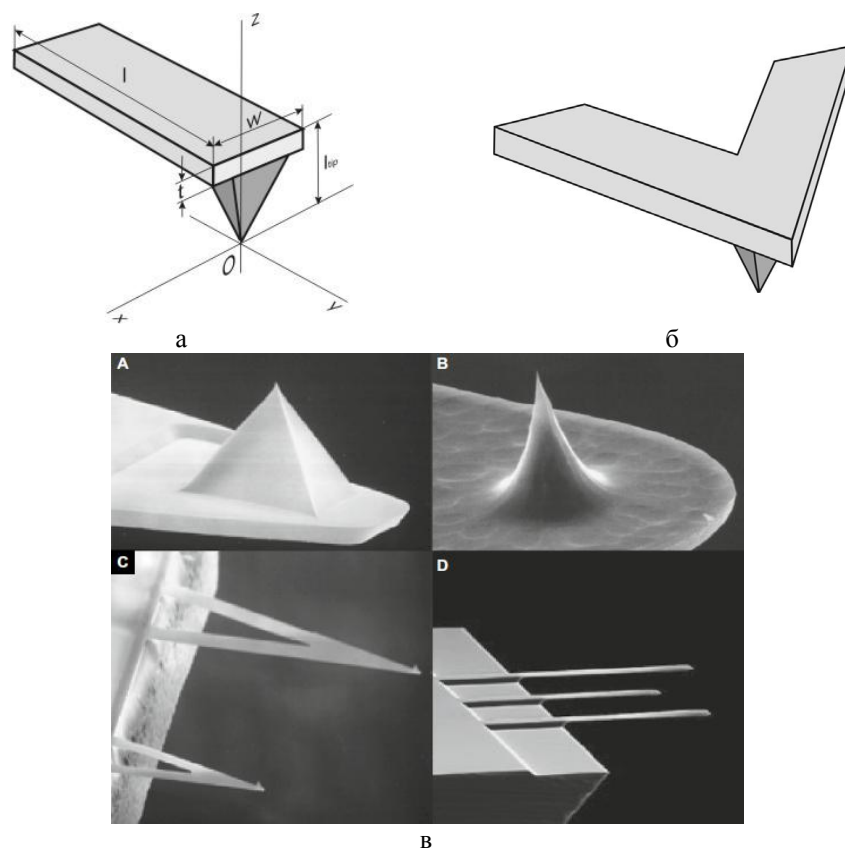


Рис. 1. Консоли кантилеверов: а – прямоугольного и б – треугольного вида, в – РЭМ-изображение

Технологий изготовления кантилеверов. Известно несколько вариантов технологий изготовления кантилеверов [16, 17 и др.]. В качестве общих операций в них можно выделить: формирование оснований будущего острия; формирование консоли; нанесение отражающего покрытия; разделение пластины на отдельные чипы.

Основным способом формирования консоли кантилевера (на основе кремния) является объемная микрообработка, в которой подложка травится с обратной стороны на всю толщину [16]. В таком процессе используют пластины монокристаллического кремния толщиной 350–500 мкм. При подготовке подложки наносят фактический материал консоли (нитрид или кремний, поликремний). Толщина этих пленок определяет толщину итоговой консоли. Как правило, формируют трехслойную структуру, в которой промежуточный слой представлен материалом, имеющим значительно меньшую скорость травления – стоп слой. Он защищает консольный слой в процессе изготовления, обеспечивает воспроизводимость толщины и высокую отражательную способность кантилевера [16].

По такой технологии изготавливают кантилеверы на основе КНИ-пластин (100) (рис. 2) [16, 18–20].

Топология консоли формируется путем фото- или электронно-лучевой литографии и жидкостного или реактивного ионного травления на лицевой стороне пластины (рис. 2,б) [21, 22]. Травление с обратной стороны пластины проводится с использованием гидроксида калия (KOH) [21] или глубокого реактивного ионного травления [23] (рис. 2,в). Освобождение кантилевера достигается за счет удаления стоп-слоя (рис. 2,г). В качестве альтернативных кремнию материалов, обладающих уникальными химическими и механическими свойствами, для кантилеверов исследуется карбид кремния [24], графен [25] и алмазоподобный углерод [26].

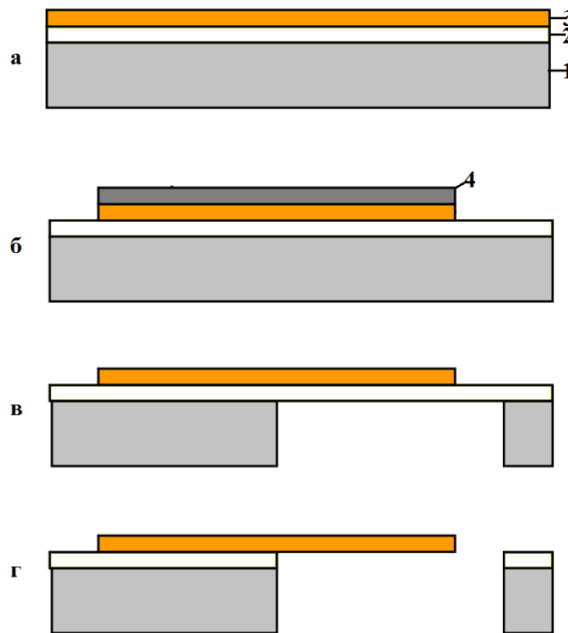


Рис. 2. Формирование консоли по технологии объемной микрообработки: а – подготовка подложки/осаждение тонкой пленки; б – нанесение рисунка консоли с помощью фотолитографии и травления; в – освобождение консоли травлением подложки с обратной стороны и г – удаление стоп слоя: 1 – кремний; 2 – стоп слой; 3 – тонкая пленка; 4 – фоторезист

Основными техническими параметрами кантилеверов для атомно-силовой микроскопии являются: жесткость, резонансная частота, добротность, радиус кривизны и форма острия [17, 18]. Также в качестве еще одного параметра приводят тип покрытия поверхности острия [17].

Анализ [17, 26–31] показывает, что современные промышленные кантилеверы имеют стандартный размер основания длиной 3,4 мм, шириной 1,6 мм и толщиной 0,3 мм (табл. 1). Размеры и форма консоли кантилевера, её жесткость, резонансная частота, а также форма, размеры и материал покрытия острия определяют функциональное назначение кантилевера применительно к методике/режиму АСМ (табл. 2).

Таблица 1

Основные параметры промышленных кантилеверов с оптической системой регистрации отклонения

Производитель	Режим работы*	Серия	Материал	Размер основания, мм	Покрытие	Размер кантилевера, мкм			Резонансная частота, кГц			Коэффициент жёсткости, Н/м		
						длина	ширина	толщина	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.
NT-MDT	Б/П	NSG10/15	Si	3,4×1,6×0,3	Au	95±5	30±3	2,0±0,5	87	150	230	1,45	5,1	15,1
	К	CSG10/15	Si	3,4×1,6×0,3	Au	225±5	30±3	1,0±0,5	4	9,8	17	0,003	0,03	0,13
Budget-sensors	Б/П	Tap300-G	Si	3,4×1,6×0,3	-	125±10	30±5	4,0±1,0	300 ± 100			20	40	75
	К	Contact	Si	3,4×1,6×0,3	-	450±10	50±5	2,0±1,0	13 ±4			0,07	0,2	0,4
Nano-world	Б/П	Arrow™ NC	Si	3,4×1,6×0,3	?	160±5	45±5	4,6±0,5	240	285	380	27	42	80
	К	Arrow™ CONT	Si	3,4×1,6×0,3	?	450±5	45±5	2,0±0,5	10	14	19	0,06	0,2	0,38
Nano-science	Б/П	AppNano ACT	Si	3,4×1,6×0,3	Al	125±10	35±5	4,5±0,5	200	300	400	25	40	75
	К	AppNano Sicon	Si	3,4×1,6×0,3	Al	450±10	40±5	2,5±0,5	11	12	18	0,1	0,2	0,6

* Б – бесконтактный; П – полуконтактный; К – контактный режимы работы АСМ

Таблица 2

Параметры консоли кантилеверов с оптической системой регистрации отклонения

Параметры	Режим	
	бесконтактный/полуконтактный	контактный
длина, мкм	95–160	225–450
ширина, мкм	30–45	30–50
толщина, мкм	2–4,6	1–2,5
резонансная частота, кГц	87–400	4–19
коэффициент жёсткости, Н/м	1,45–80	0,003–0,6

Из таблицы видно, что при работе в контактном режиме для исключения модификации поверхности образца и его разрушения предпочтительно небольшое значение коэффициента жёсткости.

Очевидно, что кантилеверы с треугольной консолью имеют при тех же размерах большую жесткость и, следовательно, более высокие резонансные частоты. Чаще всего они применяются в колебательных АСМ-методиках.

Известно около десятка методов высокоточной регистрации сил взаимодействия кантилевера с поверхностью. Любую информацию о поверхности атомно-силовой микроскоп получает благодаря механическим отклонениям балки кантилевера, которые регистрируются различными методами [3]. Самыми распро-

страненными из них являются оптическая, пьезорезистивная, пьезоэлектрическая, электростатическая, туннельная и тепловая система регистрации (табл. 3) [3, 16, 32–45].

Таблица 3

Системы регистрации отклонения кантилеверов в АСМ [3, 16, 32–45]

Система	Достоинства	Недостатки
оптическая	<ul style="list-style-type: none"> ◆ нет необходимости в электрическом соединении кантилевера; ◆ простота в изготовлении; ◆ линейный режим отклика; ◆ высокая чувствительность; ◆ надежность; ◆ высокая коммерциализация 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ необходимость внешних оптических блоков; ◆ необходимость калибровки при изменении среды (например, жидкость, газ); ◆ сложность при использовании массивов кантилеверов; ◆ склонность к оптическим артефактам, таким как изменение показателя преломления; ◆ не пригодна для нанометровых размеров кантилеверов
пьезорезистивная	<ul style="list-style-type: none"> ◆ интеграция с кантилевером, КМОП интеграция; ◆ может быть использована в любой среде; ◆ большой динамический диапазон; ◆ возможность использования массивов кантилеверов 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ изменение механических свойств кантилеверов; ◆ тепловая мощность рассеяния в пьезорезисторах и температурный дрейф; ◆ генерация тепла может привести к неустойчивому отклонению балки; ◆ нетехнологичность в аспекте чистоты
пьезоэлектрическая	<ul style="list-style-type: none"> ◆ интеграция с кантилевером, КМОП интеграция; ◆ может быть использована в любой среде; ◆ может быть использована как актюатор; ◆ возможность использования массивов кантилеверов 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ постоянный ток утечки, делает сложным применение статических режимов; ◆ малые выходные сигналы
электростатическая (емкостная)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ КМОП совместимость; ◆ большой динамический диапазон; ◆ используется для нанометровых размеров кантилеверов; ◆ не меняет механические свойства кантилевера 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ необходимость калибровки при изменении диэлектрической постоянной; ◆ не подходит в электрически проводящих средах; ◆ должно быть принято во внимание изменение диэлектрической проницаемости отсканированных частей образца; ◆ нелинейный режим
туннельная	<ul style="list-style-type: none"> ◆ принципиально высокая чувствительность 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ нелинейный режим; ◆ ограниченный динамический диапазон; ◆ необходимость обеспечения туннельного зазора, наличие дополнительного зонда

Оптическая система регистрации основана на регистрации отклонения сфокусированного луча полупроводникового лазера, отраженного от кончика кантилевера при сканировании [3, 32–34]. Разрешающая способность этого метода ограничивается величиной приблизительно 0,1–1 нм по горизонтали и 0,01 нм по вертикали, что является достаточным для получения изображения рельефа.

Одним из основных ограничений АСМ на основе оптической системы регистрации является время сканирования поверхности. Для получения одного изображения при скорости сотни микрон в секунду требуется несколько минут. Причина медленного сканирования в медленном времени отклика пьезоэлектрической трубки в z-направлении. В связи с чем получили развитие альтернативные системы регистрации интегрированные с консолью, при этом последней передается функция z-электрода.

Существует несколько публикаций, в которых оптическая система полностью интегрирована. Первая работа на эту тему была опубликована в 2006 г. Зиновьевым и др. [34].

Интегрированная пьезорезистивная система регистрации. В основу положена зависимость сопротивления от механического напряжения (пьезосопротивление): под действием внешней силы в кантилевере появляется внутреннее напряжение, которое приводит к изменению сопротивления пьезорезистивного элемента, измеряемого с помощью сбалансированного моста Уинстона [35–37]. Меньшая чувствительность и разрешение, могут быть использованы в био- и хемосенсорах.

Интегрированная пьезоэлектрическая система регистрации. Механизм регистрации основан на преобразовании внутреннего напряжения консоли в электрический сигнал (прямой пьезоэффект) – пассивный режим, и противоположным образом в режиме генерации колебаний [38]. Характеризуется высокой чувствительностью при технологической сложности [38, 39].

Электростатическая система регистрации. Формируя конденсатор между поверхностью кантилевера и неподвижной пластиной (например, электрод), отклонения кантилевера может быть измерено как изменение емкости [40, 41]. При таком подходе отклонение может быть обнаружено не только в статическом, но и в динамическом режиме. Резонирующий кантилевер, при использовании емкостной конструкции, создается периодическим изменением емкости. Вариация резонансной частоты кантилевера может быть обнаружена путем демодуляции выходного сигнала.

Туннельная система регистрации. Туннельный зонд помещен в наномасштабной близости от поверхности кантилевера, который имеет проводящее покрытие. Изменение расстояние между ними при сканировании вызывает пропорциональное изменение туннельного тока [42, 43]. Система характеризуется высокой чувствительностью и сложностью.

Тепловая система регистрации. При сканировании поверхности изменяется расстояние между пальцами консоли кантилевера и исследуемой поверхностью, что приводит к нагреву или охлаждению консоли [44,45]. Изменения температуры вызывают изменения сопротивления консоли. Последнее используется для формирования изображения поверхности. Тепловая проводимость между консолью и подложкой определяет ее чувствительность.

Заключение. В заключение выделим основных поставщиков кантилеверов различных типов: Nanonics Imaging Ltd (Израиль), ЗАО «НТ-МДТ» (Россия), Veeco Probes (США), BudgetSensors (Болгария), Nanosensors (Швейцария), Nano and More GmbH (Германия), Nano World (США). Проведенный анализ показал, что кантилеверы имеют стандартный размер основания и варьируемую геометрию

консоли с острием. Появление новых конструкций кантилеверов обусловлено стремлением увеличить пространственное разрешение и порог минимально измеряемой силы взаимодействия. Если первое определяется геометрией острия кантилевера, то на величину последней в основном оказывают влияние конструкция и тип системы регистрации его отклонения. Последние позволяют значительно расширить области использования атомно-силовой микроскопии за счет повышения чувствительности, разрешающей способности отсутствия недостатков внешней оптической системы регистрации при этом возрастает сложность процесса их изготовления, нетехнологичность. В связи с чем наибольшее распространение получили кантилеверы с оптической системой регистрации. Таким образом, актуальным остается решение вопросов оптимизации конструктивных параметров кантилеверов под требуемые методики атомно-силовой микроскопии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch.* Atomic force microscope // *Jpn. Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 56, № 9. – P. 930-933.
2. *Peter E., Paul W.* Atomic Force Microscopy. – NY: Oxford University Press, 2010. – 256 p.
3. *Maslova N.S., Oreshkin A.I., Panov V.I. [et al.]*. STM evidence of dimensional quantization on the nanometer size surface defects // *Solid State Communications.* – 1995. – Vol. 95, № 8. – P 507-510.
4. *Butt H.J., Cappella B., Kappl M.* Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications // *J. Surf. Sci. Rep.* – 2005. – Vol. 59. – P. 1-152.
5. *Baro A., Reifemberger R.* Atomic Force Microscopy in Liquid. – Weinheim: Wiley- VCH, 2012. – 368 p.
6. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Н. Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – С. 15-68.
7. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А. и др.* Модификация зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // *Нано- и наносистемная техника.* – 2011. – № 4. – С. 4-8.
8. *Авилов В.И., Агеев О.А., Коломийцев А.С. и др.* Формирование и исследование матрицы мемристоров на основе оксида титана методами зондовой нанотехнологии // *Известия высших учебных заведений. Электроника.* – 2014. – № 2 (106). – С. 50-57.
9. *Агеев О.А., Смирнов В.А., Коломийцев А.С.* Применение метода фокусированных ионных пучков для модификации зондовых датчиков атомно-силовых микроскопов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 166-171.
10. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А. и др.* Модификация зондов для сканирующей зондовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // *Микроэлектроника.* – 2012. – Т. 41, № 1. – С. 47-56.
11. *Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В. и др.* Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – 153 с.
12. *Агеев О.А., Коломийцев А.С., Михайличенко А.В. и др.* Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 1 (114). – С. 109-116.
13. *Величко Р.В., Гусев Е.Ю., Михно А.С., Бычкова А.С.* Исследование режимов плазмохимического осаждения пленок нано- и поликристаллического кремния // *Фундаментальные исследования.* – 2012. – № 11. – С. 1176-1179.
14. *Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др.* Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / Под ред. Р.В. Конаковой. – Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2008. – 392 с.
15. *Gysev E.Y., Ageev O.A., Gamaleev V.A. et al.* Effect of annealing on conductivity type of nanocrystalline ZnO films fabricated by RF magnetron sputtering // *Advanced Materials Research.* – 2014. – Vol. 893. – P. 539-542.
16. *Boisen A., Dohn S.* Cantilever-like micromechanical sensors // *Reports on Progress in Physics.* – 2011. – Vol. 74M, № 3. – P. 30.
17. *Быков В.А.* Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // *Микросистемная техника.* – 2000. – № 1. – С. 21-33.

18. Silicon Valley Microelectronics Inc [Electronic resource] URL: <http://www.svmi.com> (access date: 24.08.2014).
19. Soitec [Electronic resource]. URL: <http://www.soitec.com/en/index.php> (access date: 24.08.2014).
20. Silicon Wafer [Electronic resource]. URL: <http://www.universitywafers.com> (access date: 24.08.2014).
21. *May G.S., Sze S.M.* Photolithography, fundamentals of semiconductor fabrication. – New York: Wiley, 2004. – 320 p.
22. *McCord M.A., Rooks M.J.* Electron beam lithography: handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication. Bellingham, WA: SPIE Preaa. 1997. – Vol. 1. – P. 139-250.
23. *Garrou P., Bower C., Ramm P.* Handbook of 3D Integration. – Weinheim: Wiley, 2008. – 798 p.
24. *Bagolini A., Pakula L., T.L.M. et al.* Polyimide sacrificial layer and novel materials for post-processing surface micromachining // J. Micromech. Microeng. – 2002. – Vol. 12. – P. 385-389.
25. *Geim A.K., Novoselov K.S.* The rise of graphene // Nature Mater. – 2007. – Vol. 6. – P. 183-191.
26. *Robertson J.* Diamond-like amorphous carbon // Mater. Sci. Eng. R. – 2002. – Vol. 37. – P. 129-281.
27. NOVASCAN company. [Electronic resource]. URL: <http://www.novascan.com/>. (access date: 13.08.2014).
28. BUDGETSENSOR company. [Electronic resource]. URL: <http://www.budgetsensors.com/> (access date: 13.08.2014).
29. NTMDT company. [Electronic resource]. URL: <http://www.ntmdt-tips.com/> (access date: 14.08.2014).
30. Bruker company. [Electronic resource]. URL: <http://www.brukerafmprobes.com/> (access date: 14.08.2014).
31. NANOWORLD company. [Electronic resource]. URL: <http://www.nanoworld.com/> (access date: 14.08.2014).
32. Nanoscience Instruments. [Electronic resource]. URL: <http://www.nanoscience.com/products/afm/afm-probes/> (access date: 14.08.2014).
33. *Huber F., Hegner M., Gerber C. et al.* Label free analysis of transcription factors using microcantilever arrays // Biosensors & Bioelectronics. – 2006. – Vol. 21. – P. 1599-1605.
34. *Hinterdorfer P., Dufrêne Y.* Detection and localization of single molecular recognition events using atomic force microscopy // Nature methods. – 2006. – Vol. 3. – P. 347-355.
35. *Zinoviev K., Dominguez C., Plaza J.A. et al.* A novel optical waveguide microcantilever sensor for the detection of nanomechanical forces // J. Lightwave Technol. – 2006. – Vol. 24. – P. 2132-2138.
36. *Rangelow I. W., Ivanov T., Ivanova K.* Piezoresistive and self-actuated 128-cantilever arrays for nanotechnology applications // Microelectronic Engineering. – 2007. – Vol. 84. – P. 1260-1264.
37. *Andreas Schneider, Robert H. Ibbotson, Richard J. Dunn et al.* Arrays of SU-8 microcantilevers with integrated piezoresistive sensors for parallel AFM applications // Microelectronic Engineering. – 2011. – Vol. 88. – P. 2390-2393.
38. *Ansari M.Z., Cho C.* An Analytical Model of Joule Heating in Piezoresistive Microcantilever // Sensors. – 2010. – Vol. 10. – P. 9668-9686.
39. *Itoh T., Suga T.* Piezoelectric sensor for detecting force gradients in atomic force microscopy // Japanese Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol. 33. – P. 334-339.
40. *Indermuhle P.F., Schurmann G., Racine G.A. et al.* Fabrication and characterization of cantilevers with integrated sharp tips and piezoelectric elements for actuation and detection for parallel AFM applications // Sensors and Actuators A. – 1997. – Vol. 60. – P. 186-190.
41. *Brugger J., Buser R.A., Rooij N.F.* Micromachined atomic force microprobe with integrated capacitive read-out // J. Micromech. Microeng. – 1992. – Vol. 2. – P. 218-220.
42. *Kim S.-J., Ono T., Esashi M.* Capacitive resonant mass sensor with frequency demodulation detection based on resonant circuit // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 88. – P. 053116-053116-3.
43. *Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch.* Atomic force microscope // Jpn. Phys. Rev. Lett. – 1986. – Vol. 56, № 9. – P. 930-933.
44. *Scheible D.V., Erbe A., Blick R.H.* Dynamic control and modal analysis of coupled nanomechanical resonators // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 82. – P. 3333-3335.

45. Kim K.J., Park K., Lee J. et al. Nanotopographical imaging using a heated atomic force microscope cantilever probe // *Sensors and Actuators A (Physical)*. – 2007. – Vol. 136. – P. 95-103.
46. King WP. Design analysis of heated atomic force microscope cantilevers for nanotopography measurements // *J. Micromech. Microeng.* – 2005. – Vol. 15. – P. 24-41.

REFERENCES

1. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscope, *Jpn. Phys. Rev. Lett.*, 1986. – Vol. 56, No. 9, pp. 930-933.
2. Peter E., Paul W. Atomic Force Microscopy. NY: Oxford University Press, 2010, 256 p.
3. Maslova N.S., Oreshkin A.I., Panov V.I. [et al.]. STM evidence of dimensional quantization on the nanometer size surface defects, *Solid State Communications*, 1995, Vol. 95, No. 8, pp. 507-510.
4. Butt H.J., Cappella B., Kappl M. Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications, *J. Surf. Sci. Rep.*, 2005, Vol. 59, pp. 1-152.
5. Baro A., Reifemberger R. Atomic Force Microscopy in Liquid. Weinheim: Wiley- VCH, 2012, 368 p.
6. Mironov V.L. Osnovy skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Fundamentals of scanning probe microscopy]. Nizhny Novgorod: Institut fiziki mikrostruktur, 2004, pp. 15-68.
7. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A. i dr. Modifikatsiya zondovykh datchikov-kantileverov dlya atomno-silovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of the probe-cantilevers for atomic force microscopy focused ion beams], *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano - and Microsystem technology], 2011, No. 4, pp. 4-8.
8. Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomyitsev A.S. i dr. Formirovanie i issledovanie matritsy memristorov na osnove oksida titana metodami zondovoy nanotekhnologii [The formation and study of the matrix of memristor-based titanium oxide methods probe nanotechnology], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2014, No. 2 (106), pp. 50-57.
9. Ageev O.A., Smirnov V.A., Kolomyitsev A.S. Primenenie metoda fokusirovannykh ionnykh puchkov dlya modifikatsii zondovykh datchikov atomno-silovykh mikroskopov [The application of the method of focused ion beams to modify probe atomic force microscopes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 166-171.
10. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A. i dr. Modifikatsiya zondov dlya skaniruyushchey zondovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probes for scanning probe microscopy focused ion beams], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 47-56.
11. Ageev O.A., Mamikonova V.M., Petrov V.V. i dr. Mikroelektronnye preobrazovateli neelektricheskikh velichin [Microelectronic transducers non-electrical quantities]. Taganrog: TRTU, 2000, 153 p.
12. Ageev O.A., Kolomyitsev A.S., Mikhaylichenko A.V. i dr. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Obtaining nanoscale structures based on nanotechnology NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
13. Velichko R.V., Gusev E.Yu., Mikhno A.S., Bychkova A.S. Issledovanie rezhimov plazmokhimicheskogo osazhdeniya plenok nano- i polikristallicheskogo kremniya [The study of the plasma-chemical deposition of films of nano- and polycrystalline silicon], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2012, No. 11, pp. 1176-1179.
14. Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S. i dr. Fazy vnedreniya v tekhnologii poluprovodnikovyykh priborov i SBIS [The implementation phase in the technology of semiconductor devices and VLSI]. Khar'kov: NTK «Institut mono-kristallov», 2008, 392 p.
15. Gysev E.Y., Ageev O.A., Gamaleev V.A. et al. Effect of annealing on conductivity type of nanocrystalline ZnO films fabricated by RF magnetron sputtering, *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 893, pp. 539-542.
16. Boisen A., Dohn S. Cantilever-like micromechanical sensors, *Reports on Progress in Physics*, 2011, Vol. 74M, No. 3, pp. 30.
17. Bykov V.A. Mikromekhanika dlya skaniruyushchey zandovoy mikroskopii i nanotekhnologii [Micromechanics for scanning Sandoval microscopy and nanotechnology], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem technology], 2000, No. 1, pp. 21-33.

18. Silicon Valley Microelectronics Inc. Available at: <http://www.svmi.com> (access: 24 August 2014).
19. Soitec. Available at: <http://www.soitec.com/en/index.php> (access: 24 August 2014).
20. Silicon Wafer. Available at: <http://www.universitywafers.com> (access: 24 August 2014).
21. May G.S., Sze S.M. Photolithography, fundamentals of semiconductor fabrication. New York: Wiley, 2004, 320 p.
22. McCord M.A., Rooks M.J. Electron beam lithography: handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication. Bellingham, WA: SPIE Preaa, 1997, Vol. 1, pp. 139-250.
23. Garrou P., Bower C., Ramm P. Handbook of 3D Integration. Weinheim: Wiley, 2008, 798 p.
24. Bagolini A., Pakula L., T.L.M. et al. Polyimide sacrificial layer and novel materials for post-processing surface micromachining, *J. Micromech. Microeng.*, 2002, Vol. 12, pp. 385-389.
25. Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of grapheme, *Nature Mater.*, 2007, Vol. 6, pp. 183-191.
26. 80. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon, *Mater. Sci. Eng. R.*, 2002, Vol. 37, pp. 129-281.
27. NOVASCAN company. Available at: <http://www.novascan.com/> (access 13 August 2014).
28. BUDGETSENSOR company. Available at: <http://www.budgetsensors.com/> (access 13 August 2014).
29. NTMDT company. Available at: <http://www.ntmdt-tips.com/> (access 14 August 2014).
30. Bruker company. Available at: <http://www.brukerafmprobes.com/> (access 14 August 2014).
31. NANOWORLD company. Available at: <http://www.nanoworld.com/> (access 14 August 2014).
32. Nanoscience Instruments. Available at: <http://www.nanoscience.com/products/afm/afm-probes/> (access 14 August 2014).
33. Huber F., Hegner M., Gerber C. et al. Label free analysis of transcription factors using microcantilever arrays, *Biosensors & Bioelectronics*, 2006, Vol. 21, pp. 1599-1605.
34. Hinterdorfer P., Dufrene Y. Detection and localization of single molecular recognition events using atomic force microscopy, *Nature methods*, 2006, Vol. 3, pp. 347-355.
35. Zinoviev K., Dominguez C., Plaza J.A. et al. A novel optical waveguide microcantilever sensor for the detection of nanomechanical forces, *J. Lightwave Technol.*, 2006, Vol. 24, pp. 2132-2138.
36. Rangelow I. W., Ivanov T., Ivanova K. Piezoresistive and self-actuated 128-cantilever arrays for nanotechnology applications, *Microelectronic Engineering*, 2007, Vol. 84, pp. 1260-1264.
37. Andreas Schneider, Robert H. Ibbotson, Richard J. Dunn et al. Arrays of SU-8 microcantilevers with integrated piezoresistive sensors for parallel AFM applications, *Microelectronic Engineering*, 2011, Vol. 88, pp. 2390-2393.
38. Ansari M.Z., Cho C. An Analytical Model of Joule Heating in Piezoresistive Microcantilever, *Sensors*, 2010, Vol. 10, pp. 9668-9686.
39. Itoh T., Suga T. Piezoelectric sensor for detecting force gradients in atomic force microscopy, *Japanese Journal of Applied Physics*, 1994, Vol. 33, pp. 334-339.
40. Indermuhle P.F., Schurmann G., Racine G.A. et al. Fabrication and characterization of cantilevers with integrated sharp tips and piezoelectric elements for actuation and detection for parallel AFM applications, *Sensors and Actuators A*, 1997, Vol. 60, pp. 186-190.
41. Brugger J., Buser R.A., Rooij N.F. Micromachined atomic force microprobe with integrated capacitive read-out, *J. Micromech. Microeng.*, 1992, Vol. 2, pp. 218-220.
42. Kim S.-J., Ono T., Esashi M. Capacitive resonant mass sensor with frequency demodulation detection based on resonant circuit, *Applied Physics Letters*, 2006, Vol. 88, pp. 053116-053116-3.
43. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscope, *Jpn. Phys. Rev. Lett.*, 1986, Vol. 56, No. 9, pp. 930-933.
44. Scheible D.V., Erbe A., Blick R.H. Dynamic control and modal analysis of coupled nanomechanical resonators, *Appl. Phys. Lett.*, 2003, Vol. 82, pp. 3333-3335.
45. Kim K.J., Park K., Lee J. et al. Nanotopographical imaging using a heated atomic force microscope cantilever probe, *Sensors and Actuators A (Physical)*, 2007, Vol. 136, pp. 95-103.
46. King WP. Design analysis of heated atomic force microscope cantilevers for nanotopography measurements, *J. Micromech. Microeng.*, 2005, Vol. 15, pp. 24-41.

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

Быков Александр Викторович – Закрытое акционерное общество «Нанотехнология МДТ»; e-mail: bykov@ntmdt.ru; 124482, г. Москва, Зеленоград, корпус 100; тел.: +74997357777; ведущий научный сотрудник.

Bykov Alexander Victorovich – NT-MDT Co (Molecular Devices and Tools for NanoTechnology); e-mail: bykov@ntmdt.ru; Building 100, Zelenograd, Moscow, 124482, Russia; phone: +74997357777; chief researcher.

УДК 621.382

А.С. Коломийцев

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СУБМИКРОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ ГАЛЛИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР*

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов субмикронного профилирования поверхности подложек фокусированным ионным пучком галлия. Для подложек кремния и арсенида галлия получены зависимости глубины травления от тока ионного пучка, от общего времени воздействия; угла наклона грани от тока ионного пучка, от значения параметра overlap, от общего времени воздействия; среднеарифметической шероховатости от тока ионного пучка, от значения параметра overlap, от времени воздействия ионного пучка в точке и от общего времени воздействия. Установлено, что минимальное значение среднеарифметической шероховатости для Si и GaAs достигается при значениях overlap 50 и 25 % соответственно. Показано, что угол наклона грани для структур на Si и GaAs возрастает в диапазоне значений тока 1 нА – 3 нА. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования структур и элементов микро- и нанoeлектроники, интегральной оптоэлектроники с применением метода фокусированных ионных пучков.

Нанотехнология, нанодиагностика; фокусированные ионные пучки; наноразмерное профилирование; наносистемная техника.

A.S. Kolomiitsev

THE RESEARCH OF THE SUBSTRATES SUBMICRON PROFILING USING FOCUSED GALLIUM ION BEAM FOR PRODUCTION OF THE NANOSCALE STRUCTURES

The results of experimental studies of the modes of submicron profiling of a substrates surface are presented by the focused ionic beam of gallium. The dependences of the etching depth and ion beam current, the total exposure time; the angle of the face inclination of the ion beam current, the value overlap parameter, the total exposure time; arithmetic average roughness of the ion beam current, the value overlap parameter, the time of the ion beam in situ exposure and the total exposure time for silicon and gallium arsenide substrates are obtained. It has been established that the minimum value of an average arithmetic roughness for Si and GaAs is reached at overlap values of 50% and 25 % respectively. It is shown that the slope faces to structures on Si and GaAs increases in the range of current of 1 pA – 3 nA. The results of experimental studies can be used in the development process of the structures formation and elements of micro- and nanoelectronics, integrated optoelectronics with application the method of focused ion beams.

Nanotechnology; nanodiagnostics; focused ion beams; nanoscale profiling; nanosystems technology.

Введение. В настоящее время локальное ионно-лучевое травление фокусированным ионным пучком (ФИП) является одним из наиболее перспективных методов субмикронного профилирования поверхности твердых тел [1]. Применение технологии

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-31162 мол_а, а также Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 16.1154.2014/К).