

УДК 539.612:539.32

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ДЕТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗОЛОТЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛЕЙКОСАПФИРА

© 2011 г. А. Э. Муслимов, Ю. О. Волков, В. Е. Асадчиков, В. М. Каневский, Б. С. Рошин, В. П. Власов

Институт кристаллографии РАН, Москва

Email: amuslimov@mail.ru

Поступила в редакцию 13.11.2010 г.

Методами атомно-силовой микроскопии проведена диагностика наноструктурированных ансамблей частиц золота, полученных на подложках лейкосапфира с регулярным нанорельефом. Показано, что измерения в режиме фазового контраста в совокупности с методами контактной силовой спектроскопии позволяют идентифицировать полученные наноструктуры и описать некоторые их физические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Создание наноансамблей частиц с различным типом проводимости на поверхности непроводящих подложек открывает принципиальную возможность целенаправленного изменения оптических свойств материалов и, в частности, может найти применение в функциональных устройствах нелинейной оптики [1, 2]. Однако при этом возникает ряд технологических трудностей. Например, надлежит решить задачу элементной идентификации и визуализации получаемых наноструктур.

В зависимости от необходимого предельного разрешения в структурной диагностике низкоразмерных систем применяют несколько принципиально различных методов, в частности рентгеноспектральный анализ [3, 4], ядерный микроанализ [5, 6], электронную микроскопию [7] и атомно-силовую микроскопию (АСМ). Например, авторами [8] показано, что, используя различные методики атомно-силовой микроскопии, можно в ряде случаев локально идентифицировать материал нановключений в двухкомпонентных структурах. Хотя использованные этими авторами методики и отличаются высокой разрешающей способностью, они имеют существенный недостаток, связанный с неизбежным внесением паразитных сигналов в общую картину измеряемой величины, что приводит к артефактам при получении изображения.

В настоящей работе исследовались наноансамбли золота на поверхности сапфира с террасно-ступенчатой структурой. На примере этого материала продемонстрирована применимость комплекса методов АСМ для получения раздель-

ных топографических картин подложки и формируемых на ее поверхности частиц сложной формы при одновременном уменьшении артефактов изображения.

Обсуждаются возможности метода фазового контраста. Детальный анализ методики измерения в этом режиме обнаруживает причины возникновения артефактов изображения. Показано, что в случае исследования двухфазных систем существует возможность раздельного анализа фаз по двумерным картинкам фазового контраста, получаемого методом АСМ. Такие картины, представляющие проекцию трехмерного распределения регистрируемого сигнала на плоскость, далее будем называть латеральным рельефом [9]. Предложенный для этой цели алгоритм предполагает проведение измерений образцов в двух взаимно-противоположных направлениях с последующей математической обработкой результатов.

Приведены результаты исследования адгезионных свойств поверхностных слоев золота и лейкосапфира, полученных методом контактной силовой спектроскопии.

Представлено сопоставление контактной жесткости изучаемой системы с результатами исследования эталонных образцов. При этом подтверждается идентификация наноансамблей золота на поверхности лейкосапфира. Статья завершается обсуждением полученных результатов.

РЕЖИМ ФАЗОВОГО КОНТРАСТА

Принято считать, что при исследованиях, проводимых методом АСМ, выявление картины распределения химических свойств вдоль поверхно-

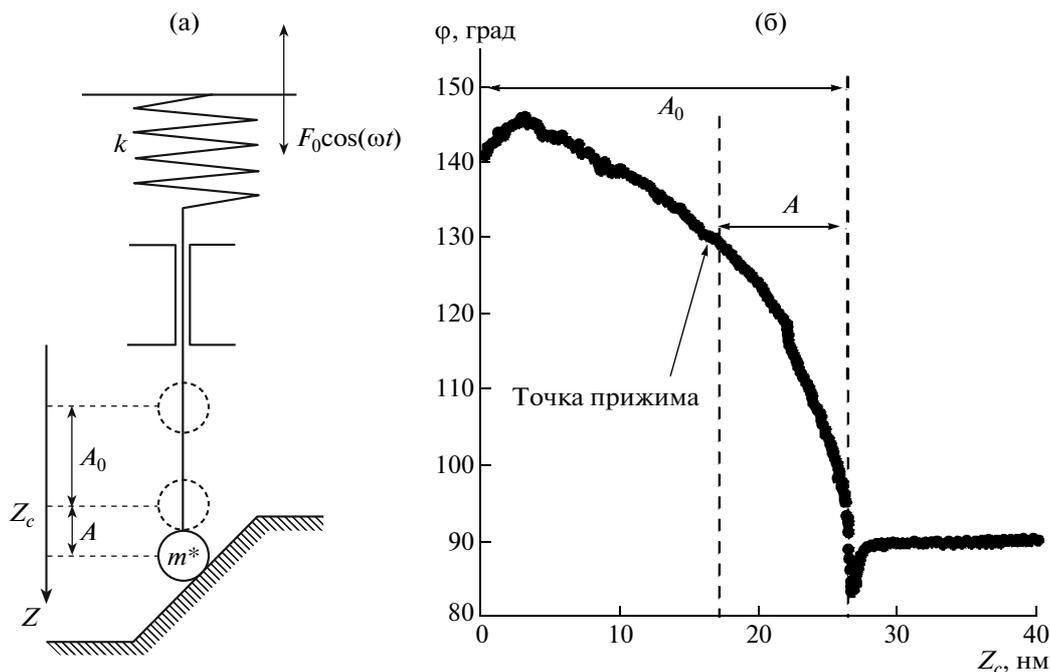


Рис. 1. Схема осциллирующего зонда АСМ-кантилевера в одномерной модели (а) и изменение фазы колебания зонда при приближении к исследуемой поверхности [10] (б).

сти возможно с использованием метода фазового контраста. В основе этого метода лежит регистрация сдвига фазы резонансных колебаний зонда при его взаимодействии с поверхностью. Однако величина сдвига фазы зависит от многих параметров, поэтому необходим детальный анализ изображений, полученных методом фазового контраста, для их правильной интерпретации.

В рамках одномерной модели, рассматривающей взаимодействие зонда с поверхностью в направлении z , нормальном к поверхности (рис. 1а), колебание зонда описывается следующим дифференциальным уравнением [11]:

$$m\ddot{z} + q\dot{z} + kz = F_{ts} + F_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

где коэффициент демпфирования $q = m\omega_0/Q$, m — эффективная масса, Q — добротность, ω_0 — резонансная частота колебаний, k — модуль упругости кантилевера; F_0 и ω — амплитуда и частота вынуждающей силы, F_{ts} — сила взаимодействия острия зонда с образцом. Стационарное решение данного уравнения имеет вид [12]:

$$z(z_0, t) = z_0(z_c) + A(z_c) \cos[\omega t - \varphi(z_c)], \quad (2)$$

где z_0 — среднее отклонение зонда от равновесного положения, A и φ — амплитуда и фазовый сдвиг колебаний, z_c — равновесная высота зонда над поверхностью образца. Типичная экспериментальная зависимость сдвига фазы от высоты зонда над поверхностью приведена на рис. 1б.

В [13–15] было предложено соотношение, связывающее сдвиг фазы φ колебаний зонда с диссипацией его кинетической энергии E_{dis} при взаимодействии с поверхностью:

$$\sin \varphi = \frac{A\omega}{A_0\omega_0} + \frac{QE_{dis}}{\pi kAA_0}, \quad (3)$$

где A_0 и ω_0 — амплитуда и частота свободных колебаний кантилевера, A и ω — амплитуда и частота, регистрируемые в процессе эксперимента.

В ходе сканирования образца дополнительный вклад в диссипацию энергии кантилевера вносит трение между концом зонда и поверхностью при его движении по ней. Это приводит к появлению в уравнении (1) добавочного коэффициента демпфирования [10]:

$$m\ddot{z} + [q + g(V(x, y), f(x, y))]\dot{z} + kz = F_{ts}(x, y) + F_0 \cos(\omega t), \quad (4)$$

где $V(x, y)$ — латеральная скорость движения зонда вдоль поверхности, $f(x, y)$ — профиль рельефа в направлении движения зонда. В [10] было введено понятие кинетического контраста. Оно определяется как составляющая поверхностного распределения фазового сдвига, которая возникает в результате латерального взаимодействия зонда с поверхностью. Этой терминологии и будем следовать.

В общем случае режим фазового контраста не дает однозначной картины распределения неоднородности механических свойств поверхности

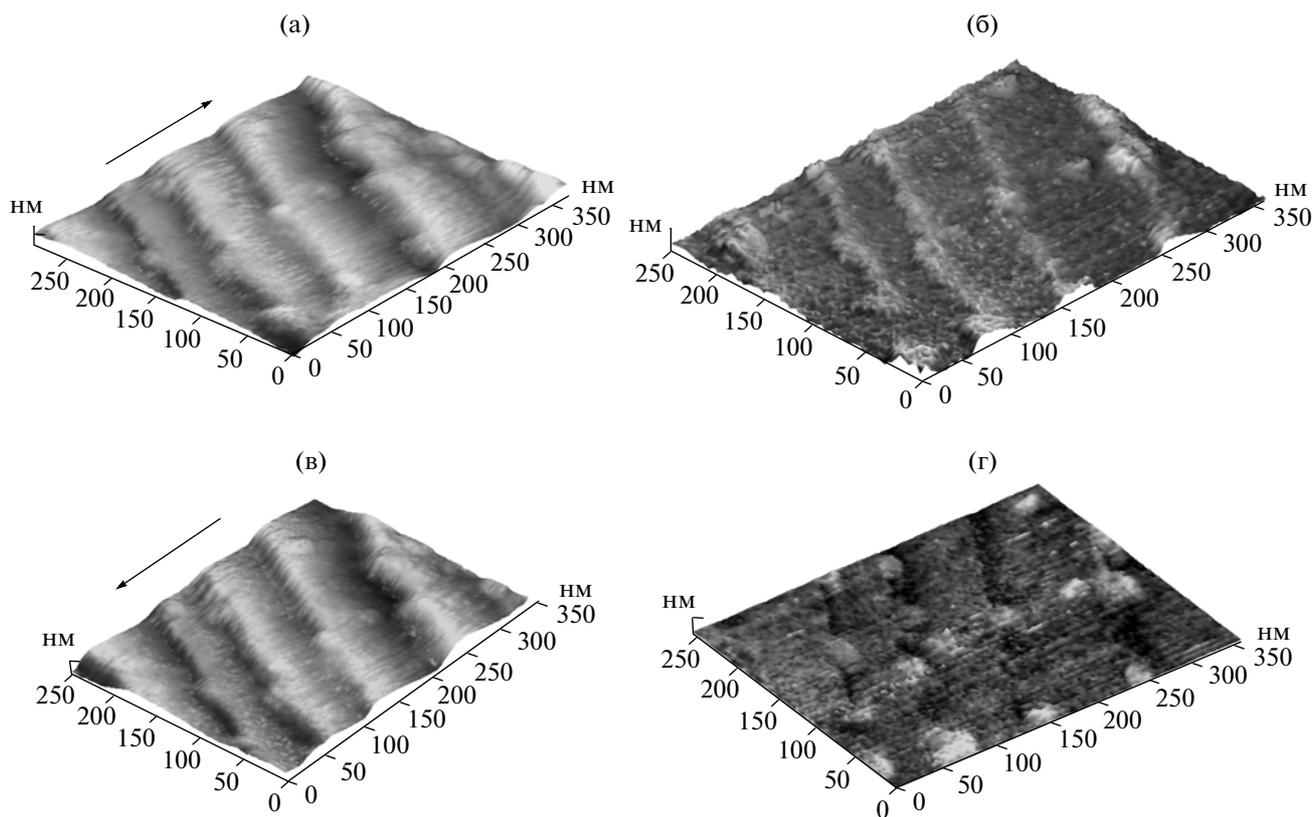


Рис. 2. Топографическое изображение поверхности (а, в) и соответствующие ей картины фазового контраста (б, г). Стрелки указывают направление сканирования.

из-за вклада кинетической составляющей. На рис. 2 представлены топографические (рис. 2а, 2в) и фазовые (рис. 2б, 2г) АСМ-изображения 250×350 нм ступенчатой поверхности с осажденными на ней наноансамблями частиц золота, полученные при сканировании в различных направлениях. Измерения были проведены на атомно-силовом микроскопе, входящем в состав комплекса “НАНОФАБ-100Л” (производство NT-MDT, г. Зеленоград), с использованием кантилеверов марки NSG20 с жесткостью 48 Н/м той же фирмы. Следует отметить, что кинетическая составляющая на ступенях меняет знак при смене направления движения зонда, в то время как нормальная составляющая от направления практически не зависит. Это обусловлено характером зависимости фазового сдвига от высоты зонда над поверхностью, приведенной на рис. 1б – при подъеме зонда на ступень его амплитуда колебаний резко уменьшается, а при спуске со ступени, наоборот, резко возрастает.

В случае, когда измерения одного участка поверхности проведены в двух противоположных направлениях при сохранении аппаратных параметров, представляется возможным разделить нормальную и кинетическую компоненты фазового контраста путем сопоставления полученных

изображений. Результирующую фазу колебаний для обоих измерений можно представить как $F^{(1)} = F_n + F_k$, $F^{(2)} = F_n - F_k$, где F_n и F_k – модули нормальной и кинетической компонент. Таким образом, при суммировании измерений происходит обнуление паразитного фазового сдвига, связанного с рельефом ($F^{sum} = 2F_n$), что дает усиленную картину распределения нормального фазового сдвига, согласно локальной неоднородности свойств. В свою очередь вычитание приводит к усилению картины распределения сдвига фазы, отражающего градиент высоты рельефа поверхности ($F^{diff} = 2F_k$).

Следует отметить, что предлагаемый алгоритм обработки сигналов с использованием фазового контраста включает в качестве неперемного этапа совмещение изображений поверхности, получаемых в различных измерениях. Такое совмещение карт фазового сдвига, снятых в противоположных направлениях, было проведено путем их пошагового смещения друг относительно друга с шагом, соответствующим пространственному разрешению прибора при заданном размере области сканирования (в данном конкретном случае эта величина составляла ~ 3 нм). Для нахождения

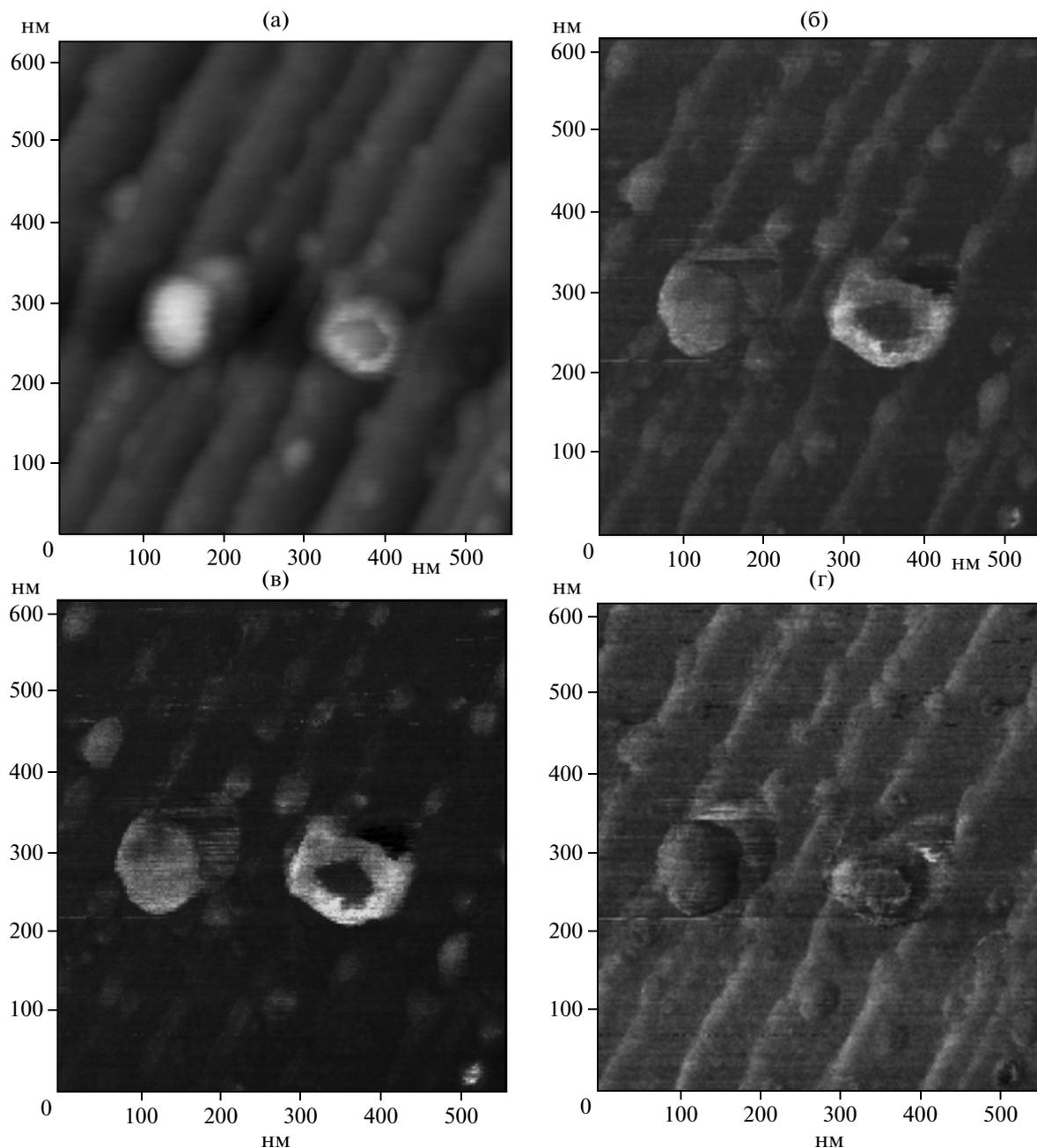


Рис. 3. Топографическое изображение (а); картина фазового контраста, снятая в одном направлении (б); суммарная (в) и разностная (г) картины фазового контраста для дискретного ансамбля золота на сапфире.

оптимального смещения была использована функция невязки:

$$MF = \sum \left(\text{grad} |F^{(1)}(x, y)| - \text{grad} |F^{(2)}(x, y)| \right), \quad (5)$$

где $F^{(1)}(x, y)$, $F^{(2)}(x, y)$ – экспериментальный сдвиг фазы колебания зонда для измерений в противоположных направлениях. В результате минимизации оптимальное смещение составило 18 нм по оси X , при этом минимальное значение невязки составило 0.131. Среднее изменение невязки на

один шаг смещения в ходе подгонки составляло 2.85×10^{-4} .

Результат исследования дискретного наноансамбля представлен на рис. 3. На суммарной картине фазового сдвига выделена компонента, соответствующая золоту, на разностной картине – террасному рельефу поверхности подложки. Для сравнения на рис. 3б приведена картина фазового контраста, снятого в одном направлении. Измерением сигналов определено, что отображение

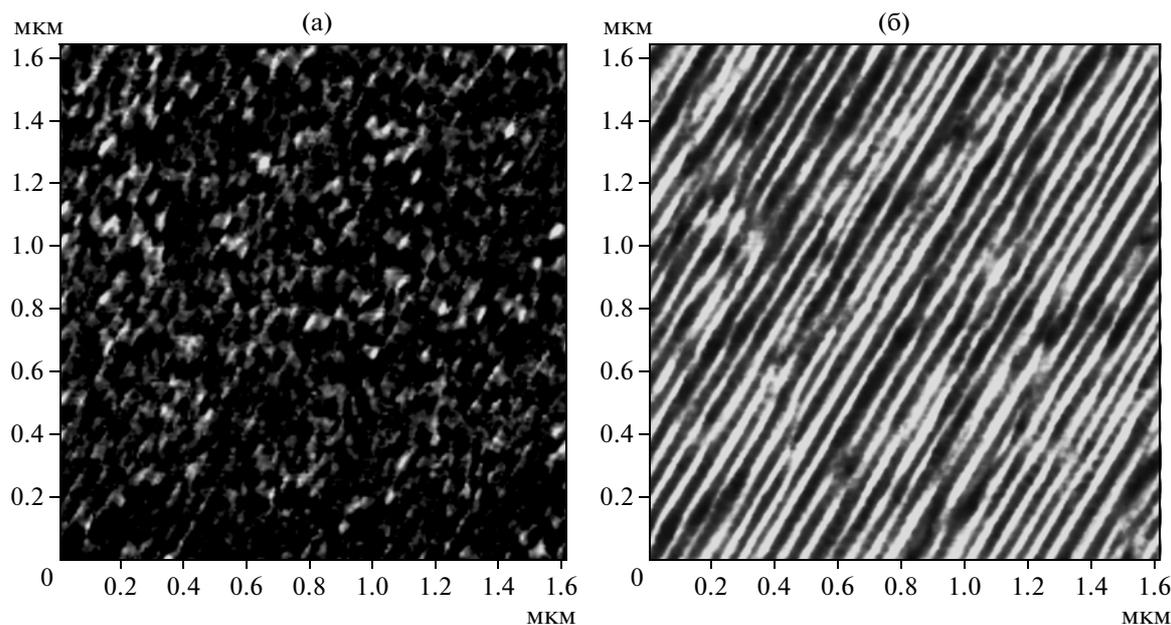


Рис. 4. Суммарная (а) и разностная (б) картины фазового контраста для островковой структуры.

латерального рельефа подложки на разностной картине в сравнении с картиной, полученной сканированием в одном направлении, контрастнее в 1,4–1,7 раз. Это позволяет визуализировать не только макрорельеф подложки, но и рассмотреть детальную картину травления ступеней частицами золота при нагревании.

Вследствие нелинейного характера зависимости $\varphi(z_c)$ (рис. 1б) абсолютные значения изменения сдвига фазы при поднятии на ступень и спуске со ступени являются неэквивалентными. Помимо этого, техническая сложность сохранения параметров в ходе эксперимента приводит к разбросу значений сигнала в одной и той же точке до 15% и соответственно неполному обнулению кинетической компоненты фазового контраста. Тем не менее, описанный подход позволяет качественно визуализировать распределение элементов в многокомпонентной системе. В частности, применение подхода к фазовым сканам большей площади (рис. 4) позволило пронаблюдать островковый характер осаждения золота на структурированной поверхности, что согласуется с данными [16].

АДГЕЗИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

В предыдущем разделе показано, что метод фазового контраста позволяет различить материалы, находящиеся на поверхности исследуемого образца, и описать латеральный рельеф каждой из фаз. Однако более детальное определение физических характеристик обнаруженных фаз при использовании этого метода далеко не очевидно.

Возможность локального изучения механических (упругих) и адгезионных свойств материалов на поверхности появляется при использовании зонда атомно-силового микроскопа в качестве наномеханического сенсора [17].

Адгезионное взаимодействие зонда с материалом поверхности обусловлено сочетанием вандер-ваальсовых, электростатических и капиллярных сил. Как правило, основной вклад в процесс этого взаимодействия вносят силы двух последних типов. Если между острием зонда и поверхностью образуется влажная пленка, необходимо также учитывать вклад в работу адгезии и капиллярных сил. Проявляются они только при отрыве зонда от поверхности.

Обоснуем это утверждение, рассмотрев зависимость величины изгиба кантилевера (приращение тока фотодиода ΔI) от длины выдвижения ΔZ пьезосканера на подводе и отводе зонда от поверхности (рис. 5). Заметно, что точки контакта при подводе кантилевера и отвода от нее смещены друг относительно друга. Действительно, в процессе подвода зонда к исследуемой поверхности образование капиллярной перемычки перед входением в контакт практически не отражается на сигнале, поскольку толщина слоя адсорбированной воды на поверхности образцов в воздухе не превышает 1 нм, а радиус капиллярного мениска, соединяющего зонд с поверхностью, составляет ~ 0.3 нм [18, 19], т.е. обе величины близки к дискретному перемещению сканера, составляющему ~ 1 нм. В течение одного шага зонд, проникая в жидкость, теряет механическую устойчивость и подвергается влиянию сил Ван-дер-Ва-

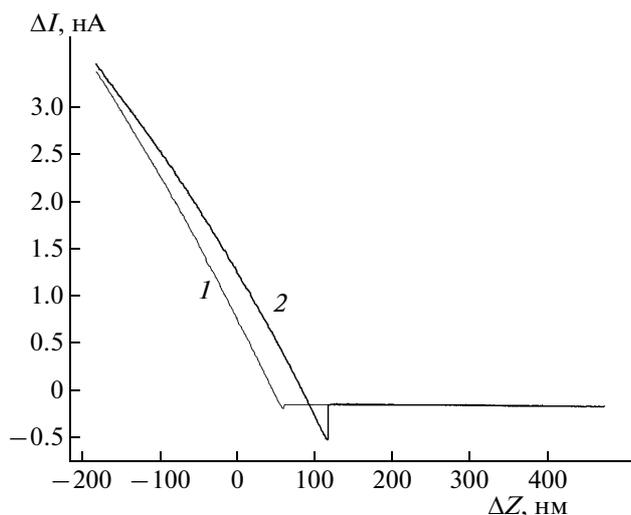


Рис. 5. Зависимость $\Delta I(\Delta Z)$ в единичной точке для поверхности сапфира в вакууме при подводе (1) и отводе (2) зонда.

альса и электростатических сил. При отводе образца от зонда, напротив, ранее образовавшиеся боковые водные мениски между зондом и образцом сохраняются в течение длительного времени, поэтому происходит постепенное вытягивание водной прослойки из контактной зоны, увеличивающее силу капиллярного гистерезиса (что соответствует кривой 2 на рис. 5). Таким образом, при подводе основную роль играют силы Ван-дер-Ваальса и электростатического взаимодействия, а при отводе – капиллярные силы. По-

этому появляется возможность определить силу адгезии, если рассматривать участок спектроскопической кривой, соответствующий отводу зонда от поверхности, пренебрегая при этом силой Ван-дер-Ваальса, которая обратно пропорциональна шестой степени расстояния между молекулами образца и зонда.

Силу адгезии определяли по методике, описанной в [17]. Суть измерения сводится к получению спектроскопической кривой $\Delta I(\Delta Z)$ в контактной моде, на основе которой рассчитывается сила адгезии в предположении ее линейной зависимости от смещения зонда в нормальном к поверхности направлении:

$$F_a = k\varnothing Z, \quad (6)$$

где k – жесткость кантилевера, $\varnothing Z$ – величина максимального приращения координат сканера от начала отрицательных деформаций кантилевера до максимума силы адгезии.

Использованный атомно-силовой микроскоп позволяет исследовать адгезионные свойства как на воздухе, так и в условиях вакуума 10^{-7} Па. При проведении измерений в вакууме можно было бы пренебречь капиллярными силами, однако известны материалы, на поверхности которых из-за прочной химической связи даже в условиях низкого вакуума присутствует жидкая пленка микроскопической толщины. К таковым, в частности, относится и сапфир [20]. В отличие от сапфира золото обладает высокой химической стойкостью [21] и не образует прочной связи с молекулами воды, присутствующими в воздухе. Данная особенность была использована при построении

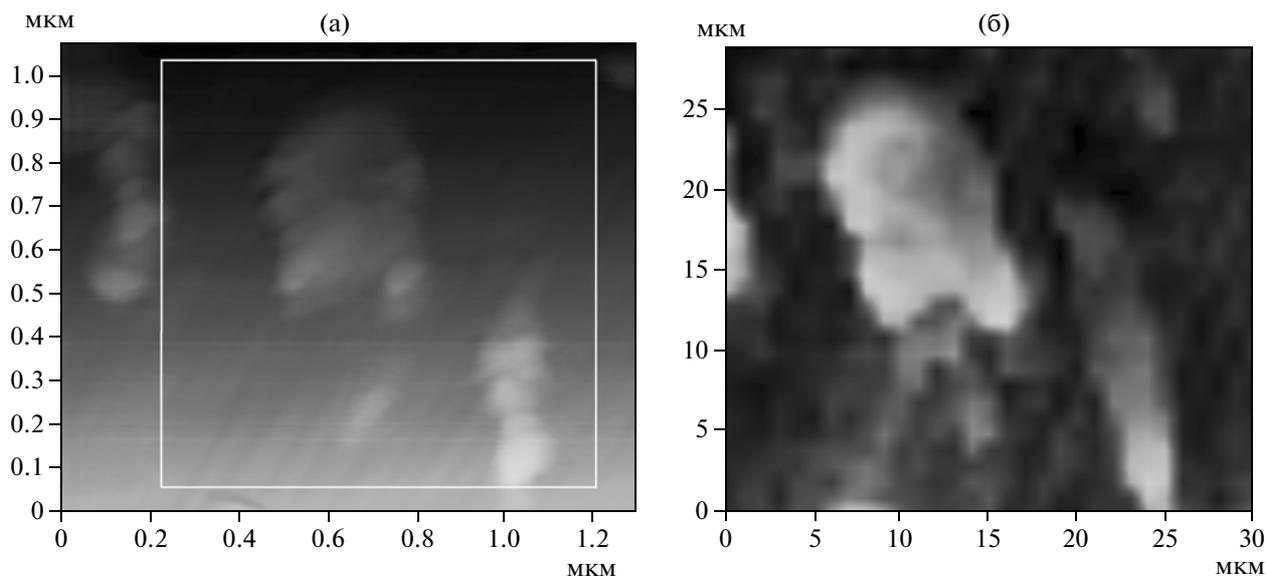


Рис. 6. Топографическое изображение поверхности (а) и соответствующая выделенному участку карта распределения адгезионных сил (б) для частиц золота на сапфире в вакууме.

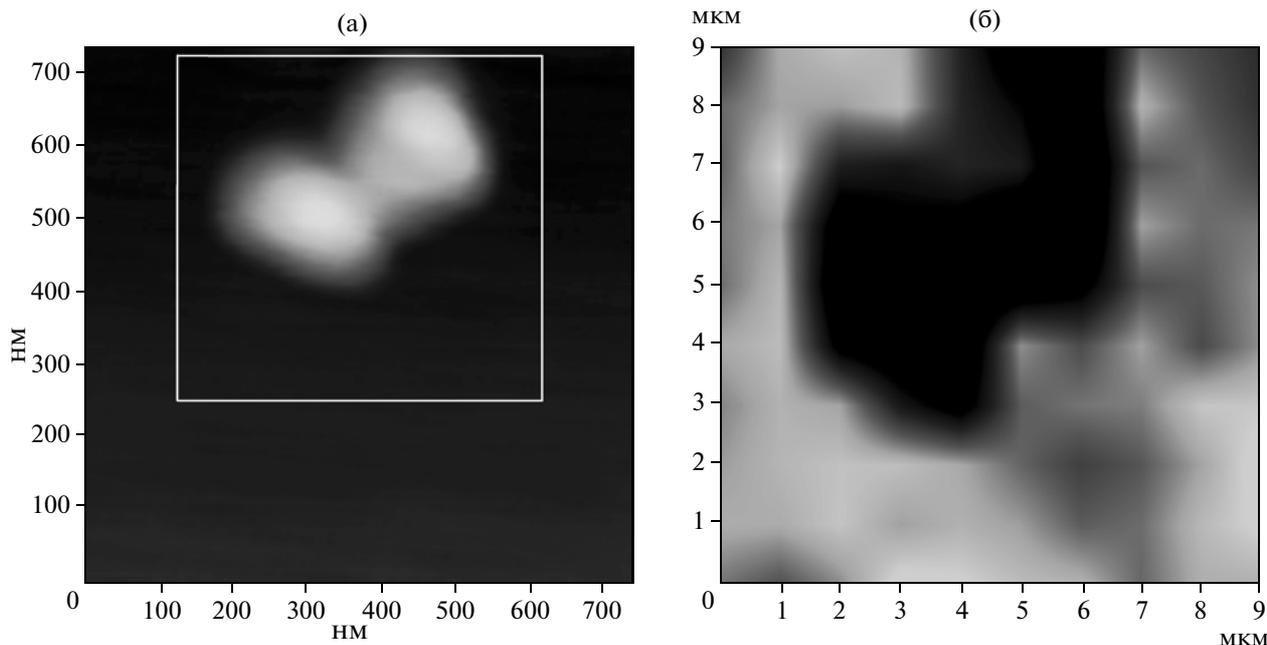


Рис. 7. Топографическое изображение поверхности (а) и соответствующая выделенному участку карта распределения адгезионных сил (б) для частиц золота на сапфире в нормальных условиях.

контрастной карты распределения силы адгезии для системы золото-сапфир.

Программа построения карты такого типа входит в комплект поставки измерительного прибора. На рис. 6 представлено изображение, полученное для частиц золота на сапфире в вакууме 10^{-7} Па.

Поскольку величины сил адгезионной связи невелики, для получения данных изображений использовали мягкие кантилеверы с жесткостью 4.5 Н/м. Жесткость контролировалась использованием стандартного алгоритма, описанного в [22]. Результаты исследований показали, что даже в вакууме на поверхности сапфира сохраняется влажная пленка, что подтверждает данные о прочной связи молекул воды с поверхностными атомами сапфира. Сила адгезии, полученная для контакта частица золота-кремний, составила 14 нН. Для сравнения в [23] приведена теоретически рассчитанная величина силы адгезии контакта золото-кремний, равная 17.2 нН. По всей видимости, используемая в этой работе модель не учитывает всех особенностей взаимодействия. Однако приведенное экспериментальное значение находится в хорошем соответствии с теоретическим расчетом.

Также была определена сила адгезии для системы сапфир-кремний. Ее значение составило 40 нН. Литературных данных по исследованию адгезии в такой системе не выявлено. Следует отметить, что величина силы адгезии контакта для

системы золото-кремний меньше, чем для системы сапфир-кремний, как и предполагалось.

Различие в силе химической связи молекул воды с молекулами золота и сапфира должно было отразиться при построении карты силы адгезии в нормальных атмосферных условиях из-за резкого увеличения влажности среды. Полученные изображения показали более контрастное отображение отдельных участков различной химической природы (рис. 7). Поэтому можно считать, что для данной системы более предпочтительно использование спектроскопии на воздухе. Показано, что в этом случае можно выделить частицы золота с латеральными размерами до 50 нм.

Можно было бы предположить, что отмеченные результаты связаны с резким перепадом высоты частиц над средней линией рельефа на исследуемой поверхности по аналогии с методом кинетического фазового контраста. Для проверки этой гипотезы были исследованы частицы полианилина, осажденные на кремнии. Эта система интересна тем, что сила адгезии выше на исследуемом покрытии, нежели на поверхности подложки. На рис. 8 приведены результаты исследования. Сила адгезии на частицах полианилина отображается большей по величине, чем на кремнии.

Таким образом, можно определенно сказать, что спектроскопические данные отражают реальную картину взаимодействия зонда с поверхностью.

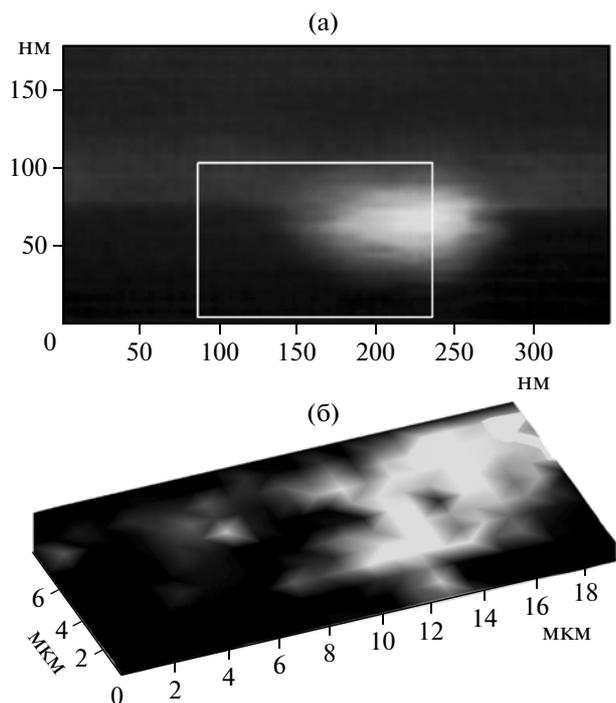


Рис. 8. Топографическое изображение поверхности (а) и соответствующая выделенному участку карта распределения адгезионных сил (б) для частиц полианилина на кремнии.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ УПРУГОСТИ

Известно, что на величину силы адгезионной связи могут влиять условия эксперимента, в числе которых основную роль играют влажность, температура, состав и структура поверхности и материал зонда. Идентифицировать исследуемый объект только по этому параметру не совсем корректно. В [24] показано, как измерением наклона контактных линий спектроскопии $\Delta I(\Delta Z)$ можно сопоставить друг другу модули упругости и пропорциональные им коэффициенты жесткости для различных материалов. В нашей работе была использована данная методика, при этом в качестве дополнительного идентифицируемого параметра исследовалась контактная жесткость систем кремний–золото и кремний–сапфир. Для проведения этих измерений необходимо, чтобы жесткость кантилевера была сопоставима с величиной контактной жесткости образцов. Поскольку силы упругости несравненно больше по

Средние значения $\tilde{S}p/\Delta Z$ [нА/нм] для сапфира и золота

Золото	Сапфир (0001)	Частица золота на сапфире (0001)	Область без золота на сапфире (0001)
0.0275 ± 0.002	0.0345 ± 0.002	0.0238 ± 0.003	0.0342 ± 0.002

величине, чем силы адгезионной связи, использование мягких кантилеверов оказалось затруднительным. При малой величине контактной жесткости наклон контактных кривых мало зависит от упругих свойств образцов, и определение модулей упругости становится невозможным. Были использованы жесткие кантилеверы NSG 20 с коэффициентом жесткости 41 Н/м. Жесткость контролировалась по методике, описанной в [22]. Задачей исследования стало определение локального местонахождения наночастиц золота на сапфире с использованием эталонных образцов золота и сапфира.

При сканировании в контактной моде задается программная величина S_p , пропорциональная силе прижатия F кантилевера. Для сопоставления контактной жесткости исследуемых систем эталонным образцам можно использовать соотношение $F/S_p = \text{const}$. Считая зависимость силы упругости от деформации линейной ($F = k\Delta Z$), получаем $k \sim S_p/\Delta Z$. Используя линейный спадающий участок спектроскопической кривой $\Delta I(\Delta Z)$ на подводе (рис. 5) по методике, описанной в [17], определяем ΔZ для данной S_p .

Была отснята серия спектроскопических кривых $\Delta I(\Delta Z)$ для чистого сапфира, чистого золота и системы золото–сапфир. Средние значения величины $S_p/\Delta Z$, рассчитанные по 15 измерениям для каждого образца, приведены в таблице. Точность измерения составляла 10%. Из таблицы видно, что для поверхности сапфира в случае чистой и напыленной золотом результаты сопоставимы, а для частиц золота результирующее отношение меньше на 13%. Причиной такого уменьшения может служить изменение химической чистоты напыленного золота. В то же время поверхность эталонного образца золота представлена сферическими частицами с радиусом закругления порядка 100 нм, поверхность частиц золота на сапфире имеет более сложную форму. Размеры острия зонда порядка 10 нм. Таким образом, наряду с различием химической чистоты уменьшение можно объяснить различной геометрией взаимодействующих поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была предложена и опробована методика, позволяющая отличить нанесенные на подложку материалы от рельефа самой подложки. Эти результаты были получены с использованием методов атомно-силовой микроскопии, включавших в себя стандартную полуконтактную моду, режим отображения фазового контраста, что позволило разделить латеральные рельефы подложки и покрытия, а также дальнейшую идентификацию материалов по локальным физическим параметрам (сила адгезионной связи и модуль упругости), что было выполнено посредством

контактной спектроскопии. Нами изучались наноансамбли золота на террасно-ступенчатой поверхности лейкосапфира. Сравнивая полученные в этих исследованиях результаты, можно отметить, что предложенный подход, в принципе, позволяет качественно идентифицировать наноструктуры. При этом линейные размеры исследуемых наноструктур определяются с той же точностью, что и при обычном топографическом подходе, применяемом в атомно-силовой микроскопии. В обоих случаях точность нахождения линейных размеров ограничивается параметрами (радиусом кривизны) применяемого зонда.

Важно отметить, что при использовании режима фазового контраста измерения проводились в двух противоположных направлениях. Это позволило, применив соответствующую математическую обработку сигналов, визуализировать наноансамбли золота, устранив при этом влияния рельефности самой подложки. Вносимая при таком подходе погрешность связана с технической сложностью совмещения параметров измерений и соответственно условий взаимодействия зонда с поверхностью при сканировании в противоположных направлениях. Отсутствие полного совмещения обуславливает неполную эквивалентность регистрируемых сигналов, что в свою очередь приводит к неполному обнулению сигнала сдвига фазы при наложении изображений. Сигналы, характеризующие одну и ту же точку, могут различаться по величине до 15%. Тем не менее такая методика позволяет качественно визуализировать распределение элементов в многокомпонентной системе.

В частности, удалось выявить островковый характер осаждения тонких слоев золота, нанесенных методом магнетронного напыления на подложку лейкосапфира. Данный результат согласуется с данными [16]. Однако сам факт обнаружения островков именно золота нуждается в дополнительном обосновании. Зарегистрированный латеральный рельеф, вообще говоря, может быть обусловлен не только нанесенным золотом, но и примесями, внесенными при напылении либо при транспортировке образцов. Проведенные по этой причине исследования сил адгезионной связи и сил упругости дают основания считать, что обнаруженные наноансамбли действительно представлены частицами золота. Сила адгезионной связи, полученная для контакта частица золота-кремний, оказалась равной 14 нН. Это значение хорошо соответствует теоретическим предсказаниям работы [23], где приведена величина силы адгезии 17.2 нН для той же системы. Отсутствие полного совпадения может быть обусловлено особенностями в технологии нанесения покрытия. Также на величину силы адгезионной связи могут влиять условия эксперимента, в числе которых основную роль играют влажность,

температура, поверхность и материал зонда. Более того, нами и другими авторами замечено, что на поверхности сапфира сохраняется адсорбированный слой молекул воды даже в условиях низкого вакуума [20]. Поэтому по методике, описанной в предыдущем разделе, было проведено сопоставление контактной жесткости изучаемой системы с соответствующими параметрами эталонных образцов. Полученные в этих измерениях данные хорошо согласуются между собой. Однако они не полностью соответствуют литературным данным, из которых следует, что отношение величин коэффициентов жесткости для данных материалов различается более чем в 4 раза. По результатам наших измерений эти величины различаются не более, чем в 1.5 раза. Это можно объяснить тем, что мы рассматриваем контактную жесткость материалов в системах золото-кремний и сапфир-кремний, а не самих материалов сапфира и золота. Помимо этого, в [27] указывалось на критичность выбора зонда при исследованиях сил упругости. В рассматриваемой нами системе исследуемые материалы имеют принципиально различную жесткость и, вообще говоря, для каждого исследуемого материала нужно было бы подбирать соответствующий по жесткости зонд. Однако в таком случае будет затруднительно сравнивать результаты измерений для двух материалов. Нами проводились измерения с использованием одного зонда и анализировалось только отношение полученных величин. Следует также иметь в виду, что в литературе обычно приводятся объемные значения модулей упругости (жесткости). Мы же работаем с поверхностью и, стало быть, можно ожидать, что приводимые нами значения будут отличаться от литературных данных.

В заключение отметим, что даже с учетом указанных ограничений удастся количественно различить параметры рельефа подложки и нанесенных на нее наночастиц другой фазы с высоким разрешением (до 50 нм) и в некоторой степени описать физические свойства данных материалов.

Авторы выражают благодарность А.В. Бузмакову за полезные обсуждения результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gangopadhyay P., Gallet S., Franz E. et al.* // IEEE Trans. Magnetics. 2005. V. 41. № 10. P. 4194.
2. *Ed. by Bertolotti M., Bowden C.M., Sibilio C.* Nanoscale linear and nonlinear optics, V. 560. New York: 2001.
3. *Буханько Н.Г., Казакова Е.Ф., Соколовская Е.М.* // Вестн. МГУ. Серия 2. Химия. 2002. Т. 43. № 1. С. 51.
4. *Goldstein J.I., Newberry D.E., Echlin P. et al.* Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. N.Y.; Dordrecht; London; Moscow: Kluwer Academic/Plenum Publisher, 2003.

5. *Gavrilov G., Krivchitch A., Lebedev V.* // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. A. 2003. V. 515. № 1–2. P. 108.
6. *Kudoyarova V.Kh., Kozuyukhin S.A., Tsendin K.D. et al.* // Inorg. Mater. 2006. V. 42. № 8. P. 850.
7. *Панин А.В., Шугуров А.Р., Ивонин И.В., Шестериков Е.В.* // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. № 1. С. 118.
8. *Чижик С.А., Ан Х.-С., Лузинов И. и др.* Изображение фазового контраста для твердых материалов и их интерпретация методом силовой спектроскопии. // Доклад БелСЗМ-4. Гомель. 2004 г. С. 75.
9. *Иевлев В., Сидоров Н.В., Палатников М.Н. и др.* // Конденсированные среды и межфазные границы. 2009. Т. 11. № 3. С. 221.
10. *Щеглов Д.В., Латышев А.В.* // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. № 2. С. 271.
11. *Tamayo J., Garcia R.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. № 18. P. 2394.
12. *Salapaka M.V., Chen D.J., Cleveland J.P.* // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. № 2. P. 1106.
13. *Cleveland J.P., Anczykowski B., Schmid A.E., Elings V.B.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. № 20. P. 2613.
14. *Anczykowski B., Gotsmann B., Fuchs H. et al.* // Appl. Surf. Sci. 1999. V. 140. P. 376.
15. *Garcia R., Tamayo J., San Paulo A.* // Surf. Interface Analysis. 1999. V. 27. P. 312.
16. *Дистлер Г.И., Власов В.П., Герасимов Ю.М.* Декорирование поверхности твердых тел. М.: Наука, 1976. 112 с.
17. *Дедков В.Г., Дедкова А.Г.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 3. С. 76.
18. *Hudlet S., Saint Jean M., Guthmann C., Berger J.* // European Phys. J. B. 1998. V. 2. № 1. P. 5.
19. *Дедков Г.В., Дедкова Е.Г., Тегаев Р.И., Хоконов Х.Б.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 1. С. 38.
20. *Занавескин М.Л.* Дис. Атомно-силовая микроскопия в исследовании шероховатости наноструктурированных поверхностей. Канд. ... физ.-мат. наук. М., ИК РАН, 2008.
21. *Степанов А.Л., Marques C., Alves E. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 31. № 16. С. 59.
22. *Sader J.E.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. P. 64.
23. *Дедков Г.В., Дедкова Е.Г., Карамурзов Б.С. и др.* // Поверхность. 2007. Т. 6. С. 93.
24. *Дедков Г.В., Тегаев Р.И., Дедкова Е.Г.* // Нано- и микросистемная техника. 2007. Т. 2. С. 8.
25. *Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А.* Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Киев: Наукова Думка, 1982, 286 с.
26. Handbook of Ceramic Hard Materials, vol. 2 (Ed. by R. Riedel). WILEY-VCH, Weinheim, 2000, 1020 p.
27. *Дедкова Е.Г.* Контактная атомно-силовая спектроскопия металлических пленок и диэлектрических материалов. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик: Кабардино-Балкарский ГУ, 2008.