

Д. В. Щеглов, А. В. Латышев, В. Ю. Попков

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
ул. Акад. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

Dipartimento di Fisica Teorica E. R. Caianiello
Universita degli Studi di Salerno Via S. Allende, I-84081 Baronissi (SA), Italy
E-mail: latyshev@thermo.isc.ru

КИНЕТИЧЕСКИЙ ФАЗОВЫЙ КОНТРАСТ В АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ *

Изучен механизм формирования фазового контраста, инициированного сбоем колебаний осциллирующего зонда атомно-силового микроскопа при различных условиях его взаимодействия с поверхностью. Обоснован кинетический механизм формирования фазового контраста, проявляющийся при увеличении скорости передвижения зонда АСМ по поверхности подложки вследствие увеличения силы трения.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, фазовый контраст, поверхность, трение.

Введение

Значительный прогресс в структурной диагностике низкоразмерных систем достигнут благодаря развитию и широкому применению методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ): сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), атомно-силового микроскопии (АСМ) и др. [1–3]. Эти методы, основанные на эффектах взаимодействия твердотельной иглы с исследуемой поверхностью, стали основными инструментариями структурных исследований поверхности в физике, геологии, химии, биологии и медицине. Относительная простота интерпретации получаемых изображений при высокой разрешающей способности и прецизионной точности измерений зондовой микроскопии позволяет решать многочисленные задачи, которые невозможно решить другими экспериментальными методами.

Достоинством методов сканирующей зондовой микроскопии является возможность

получения трехмерного изображения рельефа поверхности, формирование которого оптической или электронной микроскопией затруднено и сопряжено со значительными математическими расчетами. Преимуществом АСМ диагностики также является способность получения карт распределения по поверхности ряда параметров, таких как потенциал, уровень легирования, кулоновский заряд, электрическая емкость, намагниченность, твердость, оптические характеристики и др. [4–13].

Способность прецизионного позиционирования острозаточенного зонда относительно исследуемого образца с точностью до единиц нанометров, а в нормальных координатах до долей ангстрема, открывает возможность применения СЗМ не только для диагностики, но и для литографии в нанометровом диапазоне [14–37]. В качестве наиболее яркого примера можно привести работы по переносу на острие зонда и укладыванию на поверхности единичных атомов, что явля-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-02-1003).

Авторы выражают благодарность С. С. Косолобову за предоставленные тест-объекты.

ется теоретическим пределом разрешения в литографии [38; 39].

Развитие полуконтактных резонансных методик в атомно-силовой микроскопии позволило не только улучшить чувствительность, но и расширить область применения методов СЗМ [40; 41]. В основе полуконтактной методики АСМ лежит регистрация амплитуды и сбой фазы резонансных колебаний зонда при его взаимодействии с поверхностью [42]. Методика АСМ, регистрирующая сбой фазы колебаний зонда, получила название метода фазового контраста. В работе [43] приведена обобщающая модель взаимодействия зонда с поверхностью, в которой учитывается энергия диссипации колебаний зонда АСМ при соприкосновении с поверхностью. Целью данной работы является анализ механизмов взаимодействия резонансно колеблющегося зонда АСМ с подложкой при латеральном движении вдоль нее.

Эксперимент

Для проведения экспериментов в атмосферных условиях был использован атомно-силовой микроскоп «Solver P-47H» (NT-MDT) с вертикальным разрешением до $0,5 \text{ \AA}$, который для улучшения разрешения был помещен в изолированную от электромагнитных помех виброшумозащитную ячейку. Для контроля толщины адсорбированного слоя воды, который оказывает существенное влияние на взаимодействие между зондом и поверхностью, микроскоп был дополнен ячейкой управления влажностью, которая позволяла изменять относительную влажность воздуха в зоне образец – зонд от 25 до 85 %. в термостатированных условиях.

Регистрация сбой фазы колебаний кантилевера в полуконтактном режиме проводилась при сканировании ступенчатой поверхности кремния. Образцы представляли собой пластины ($0,25 \times 1 \times 8 \text{ мм}^3$) кремния (111) с разориентацией менее одного градуса. После стандартной химической обработки образцы подвергались высокотемпературному отжигу в сверхвысоковакуумной (СВВ) камере. Образец прогревался прямым пропусканием электрического тока. Средняя шероховатость на террасах между моноатомными ступенями составила по измерениям АСМ величину менее $0,6 \text{ \AA}$.

Фазовый контраст в атомно-силовой микроскопии

Рассмотрим сбой фазы осциллирующего зонда АСМ – кантилевера в одномерной модели, когда взаимодействие зонда с поверхностью происходит в направлении Z , нормальном к поверхности (рис. 1). Зонд с эффективной массой кантилевера m^* , закрепленный на конце пружины с жесткостью k , совершает осциллирующие колебания за счет вынуждающей гармонической силы, действующей на другой конец пружины. Влияние взаимодействия зонда с исследуемой поверхностью вводится через параметр демпфирования («вязкости») q . В такой модели колебание зонда может быть описано следующим дифференциальным уравнением:

$$m^* \ddot{z} + q\dot{z} + kz = L \sin \omega t, \quad (1)$$

где L и ω_0 – амплитуда и частота вынуждающей силы; t – текущее время. Смещение фазы колебаний кантилевера, обусловленное взаимодействием зонда с поверхностью в направлении, перпендикулярном этой поверхности, назовем *нормальным* фазовым контрастом. При перемещении зонда вдоль поверхности нормальный фазовый контраст показывает величину сбой фазы колебаний зонда АСМ в каждой отдельной точке. В работах [44–46] было предложено решение уравнения (1) в виде соотношения, связывающего сбой фазы колебаний кантилевера ϕ при его взаимодействии с поверхностью и диссипацию его кинетической энергии E_{diss} в каждом цикле колебаний зонда АСМ:

$$\sin \phi = \frac{A\omega}{A_0\omega_0} + \frac{QE_{\text{diss}}}{AA_0k\pi}, \quad (2)$$

где A_0 – амплитуда свободных колебаний зонда; A и ω – амплитуда и частота, регистрируемые в подведенном к поверхности состоянии; Q – добротность кантилевера. Полученное соотношение сбой фазы колебаний кантилевера и затрачиваемой им при ударе о поверхность энергии позволило установить основные факторы, влияющие на величину сбой фазы. Справедливость представленного выше соотношения была показана при исследовании влияния жесткости кантилевера на величину сбой фазы его колебаний [47; 48]. Подробное рассмотрение траектории движения зонда атомно-сило-

го микроскопа, его колебаний, и детальный учет всех сил, действующих на подложку в момент касания зондом поверхности, представлено в работе [49].

Типичные топографическое (а) и фазовое (б) АСМ-изображения ступенчатой поверхности Si(111) после извлечения из СВВ-камеры показаны на рис. 2. Анализ спектра высот (распределение точек на топографическом изображении по высотам) однозначно указывает на наличие атомных ступеней высотой в одно межплоскостное расстояние (0,31 нм) (рис. 2, в). Фазовое АСМ-изображение показывает распределение относительной величины сбоя фазы колебаний кантилевера в области сканирования, совпадающей с топографическим АСМ-изображением. Заметим, что фазовый контраст от соседних террас не изменяется, т. е. величина сбоя фазы на террасах сохраняется одинаковой для всей области сканирования. Прямые измерения фазового сдвига при неподвижном зонде (*нормальный* фазовый контраст) не выявили различий на террасах и моноатомных ступенях в любой точке сканируемого пространства, что находится в полном соответствии с уравнением (2).

Нормальный фазовый контраст зависит от таких параметров, как влажность, твердость, электрический заряд и т. д. Влияние адсорбированной на поверхности влаги на взаимодействие зонд – образец было продемонстрировано на гладкой поверхности образца с попеременно чередующимися гидрофильными и гидрофобными полосами [50]. В процессе сканирования одновременно регистрировалась топография и фазовый контраст в условиях непрерывного изменения влажности. При низкой влажности зоны с низкой и высокой смачиваемостью показывают одинаковый фазовый сдвиг, тогда как при увеличении влажности фазовый сдвиг существенно различается из-за наличия на поверхности тонкого слоя влаги. Различие в величине сбоя фазы колебаний зонда АСМ позволило выявить неоднородности гранулированной поверхности композитного материала из стекла и полиэстера за счет различной твердости гранул [51]. Фазовый контраст АСМ изображений интерпретировался за счет различных коэффициентов жесткости стекла и полиэстера. Важным применением фазовой мето-

дики атомно-силовой микроскопии является возможность идентификация химических соединений на поверхности [52].

Установлено формирование фазового контраста даже на однородной по химическому составу и содержащей однородный адсорбционный слой поверхности. На рис. 2, б показано, что светлые линии на фазовом изображении соответствуют смещению фазы осцилляций зонда за счет перепада высоты рельефа в данном случае на монокристаллических ступенях. Возникновение фазового контраста, по-видимому, связано с латеральным взаимодействием зонда при сканировании. Контраст, обусловленный латеральным взаимодействием конца иглы зонда АСМ с рельефом поверхности при движении кантилевера, будем называть *кинетическим* фазовым контрастом. Экспериментальная регистрация латеральных сил в контактной методике сканирования АСМ проведена в работе [53], а также подтверждена наблюдением фазового контраста от поверхности Si (111), частично покрытой сверхструктурными доменами,

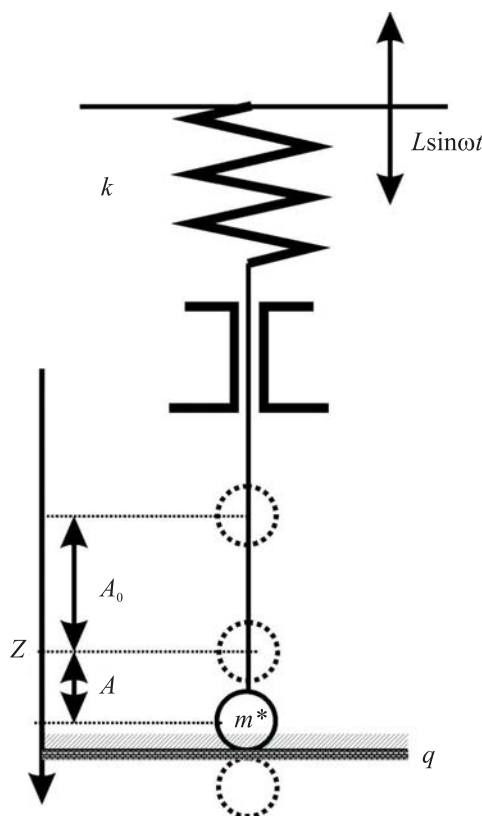


Рис. 1. Схематическое представление взаимодействия зонда АСМ с поверхностью в модели осциллятора с вынуждающей силой и демпфированием

иницированными субмонослойным осаждением золота, меди и кальция [54]. Следует отметить, что с уменьшением скорости сканирования кинетический фазовый контраст от одного и того же участка ступенчатой поверхности кремния ослабевал или даже полностью исчезал. Это дополнительно указывает на тот факт, что латеральное диссипативное взаимодействие (сила трения) между зондом и анализируемым образцом влияет на фазовый контраст, который активируется при перемещении зонда вдоль поверхности и зависит от скорости этого перемещения.

Мы учли латеральные силы, возникающие при сканировании зондом, в зависимости коэффициента демпфирования q от скорости движения и рельефа поверхности [55]:

$$\begin{aligned} m^* \ddot{z} + [q(x, y) + g(V(x, y), \\ f(x, y))] \dot{z} + kz = L \sin \omega t, \end{aligned} \quad (3)$$

где $q(x, y)$ – поверхностное распределение коэффициента демпфирования; $g(V(x, y),$

$f(x, y))$ – добавочный коэффициент демпфирования, связанный с потерями энергии зонда на латеральное взаимодействие с поверхностью при движении по ней. Этот коэффициент зависит от латеральной скорости передвижения зонда АСМ по поверхности $V(x, y)$ и от профиля рельефа в направлении движения зонда $f(x, y)$.

На основе численного моделирования сканирования острозаточенным зондом поверхности с различной шероховатостью с учетом многоточечного контакта зонд-поверхность [55; 56] предложено следующее соотношение между энергией диссипации и скоростью движения зонда вдоль поверхности:

$$E_{\text{diss}} \approx FV \frac{\gamma}{v} R^i, \quad (4)$$

где F – средняя сила давления иглы на поверхность за время касания; V – скорость движения иглы по поверхности; γ – доля периода колебания, в котором игла касается поверх-

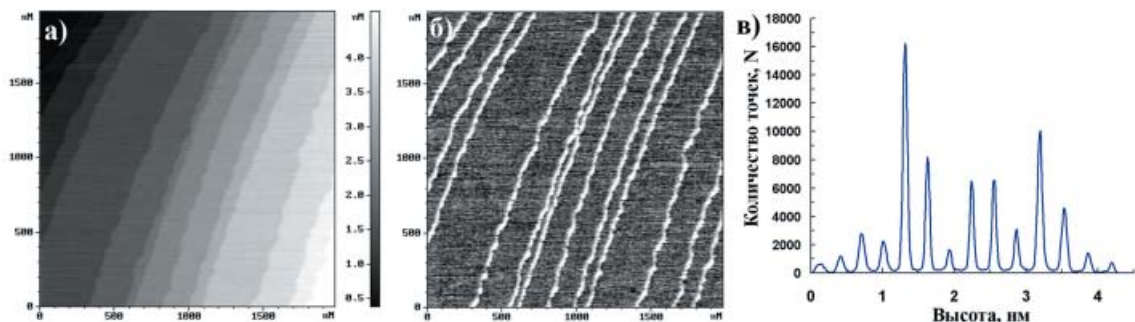


Рис. 2. АСМ-изображения ступенчатой поверхности кремния (111): a – 2×2 мкм² топографическое; b – фазовое. Спектр высот (в), пики соответствуют террасам, расстояние между пиками – высоте монокристаллической ступени

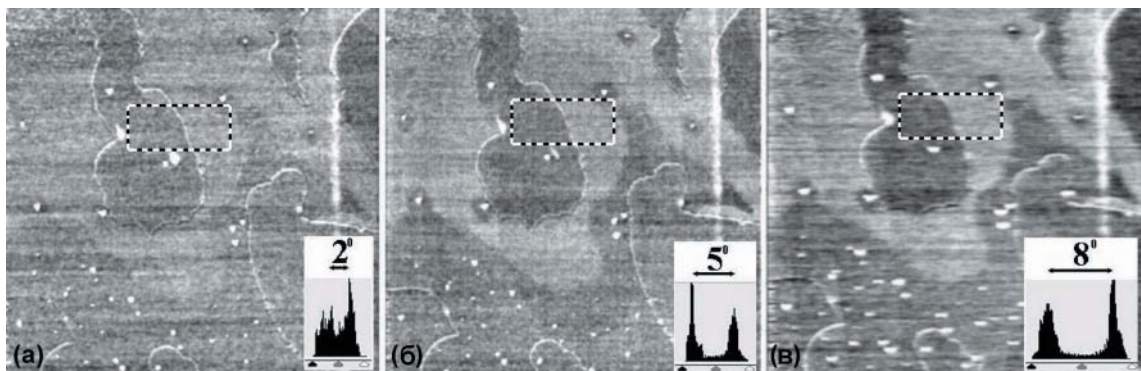


Рис. 3. Фазовые АСМ-изображения поверхности кремния со сверхструктурой $(5 \times 5)\text{Cu}$ (темные области), полученные при различных скоростях движения зонда по поверхности: a – 1 мкм/с; b – 5 мкм/с; в – 15 мкм/с. Внизу показаны спектры фазового контраста от прямоугольника, выделенного штриховой линией, на фазовых изображениях. Величина сдвига фазы составила: a – 2° , b – 5° , в – 8°

ности; ν – частота колебаний; R^i – коррелированная шероховатость поверхности в направлении сканирования.

Для проверки предположения о трибологическом механизме латерального фазового контраста АСМ, исходя из соотношений (3) и (4), были проведены измерения величины разности сбоя фазы на специально подготовленном тест-объекте, характеризующимся малой величиной шероховатости поверхности и одинаковым по высоте рельефом. В качестве такого тест-объекта была приготовлена поверхность кремния (111), содержащая неоднородное распределение примесных атомов в виде отдельных полицентрических доменов, поверхностной реконструкции, инициированной субмонослойным осаждением золота или меди из обезгаженного вольфрамового испарителя в СВВ-ка-

мере [57; 58]. На рис. 3 показаны фазовые АСМ-изображения поверхности кремния со сверхструктурой $[5 \times 5]_{\text{Cu}}$ (темные и светлые области), полученные при различных скоростях движения зонда по поверхности. Величина сбоя фазы от одной и той же области поверхности, выделенной штриховой рамкой, определялась по спектрам фазового контраста, показанным в правом нижнем углу каждого изображения, и составляла 2° , 5° и 8° соответственно (рис. 3). Можно видеть, что с увеличением скорости сканирования до 15 мкм/с происходит рост разности фазового сдвига на реконструированной и не реконструированной медью поверхности кремния. Это согласуется как с моделью, представленной в работе [55], так и с моделью Бхушана – Тамбе [59; 60], связывающей диссипативную силу и скорость в предпо-

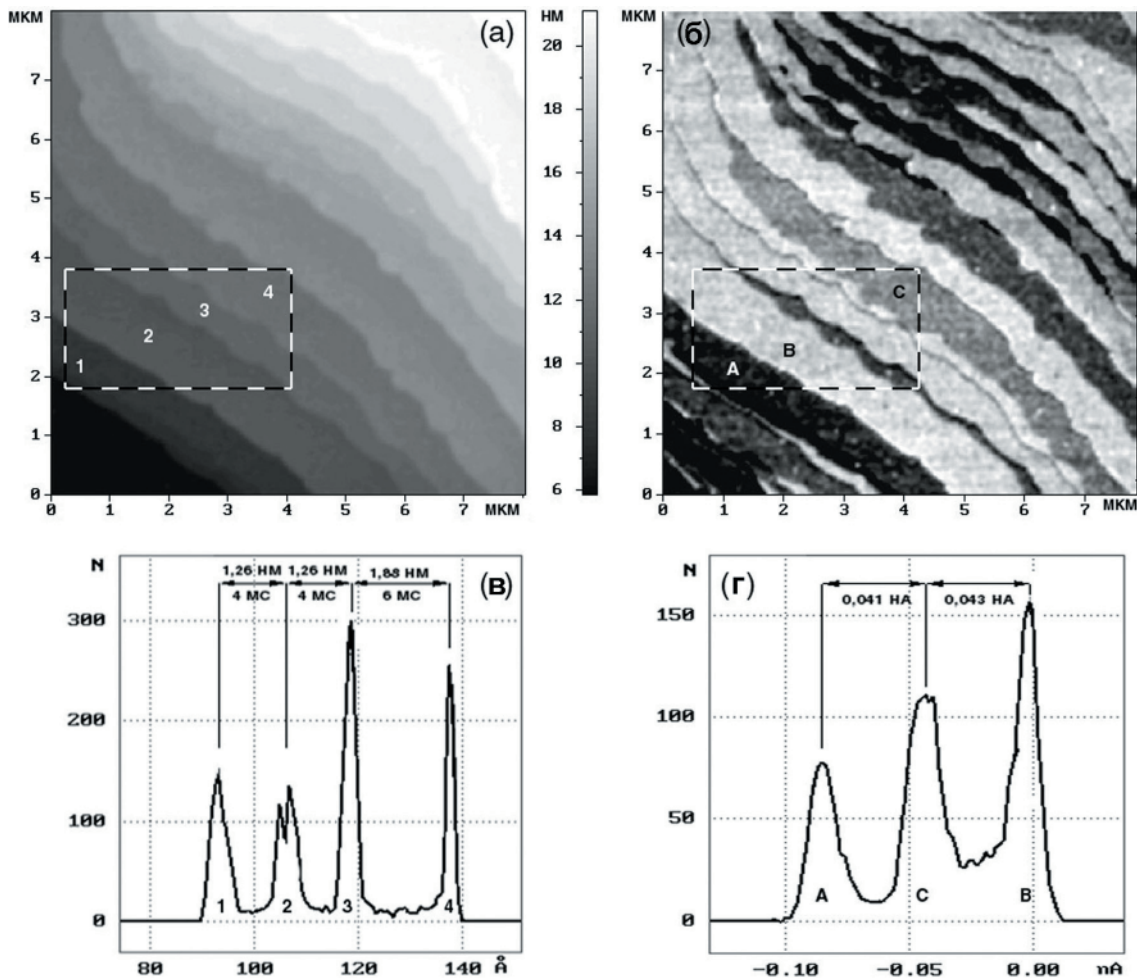


Рис. 4. АСМ-изображения: топографическое (а) и фазовое (б), одного и того же $8 \times 8 \text{ мкм}^2$ участка поверхности кремния (111), содержащей сверхструктурные домены $[5 \times 5]$, инициированные осаждением меди в СВВ-камере. Спектр высот (v) и сбоев фазы (z) по участку поверхности, ограниченному прямоугольником. Цифрами помечены террасы (а), буквами – области с разным сбоем фазы (б)

ложении о затратах энергии на «асферическую» неупругую деформацию:

$$F_{fr} \approx \beta V^{\frac{7}{3}},$$

где коэффициент β определяется силой нормального давления на поверхность и ее упругими характеристиками.

В результате оптимизации скорости сканирования методом фазового контраста получены топографические и фазовые АСМ-изображения поверхности кремния (111), частично покрытой сверхструктурными доменами меди [5×5]. Детальное изучение АСМ-топографии такой поверхности не выявило какого-либо различия между доменами (см. рис. 4, а). Однотонные полосы на изображении представляют собой гладкие террасы, высота и шероховатость которых вдоль всей полосы одинаковы. На рис. 4, в показан спектр высот по области поверхности, ограниченной штрихованной линией. Четирем пронумерованным террасам в прямоугольнике на этом изображении соответствуют четыре пронумерованных пика с периодом по высоте 1,26; 1,26; 1,88 нм с точностью наших измерений, что кратно межплоскостному расстоянию (0,314 нм), и составляет соответственно две ступени высотой в 4 моноатомных слоя и одну ступень высотой в 6 монослоев. В отличие от топографического АСМ-изображение в режиме регистрации фазового сдвига выявило не только положение ступеней, но и три вида контраста на поверхности кремния (111), покрытой медью (см. рис. 4, б). Светлая, темная и промежуточная серая области, помеченные литерами А, В и С, соответствуют участкам поверхности кремния (111), покрытым сверхструктурой (5×5), иницированной медью [61]. Рис. 4, г демонстрирует спектр сбой фазы колебаний зонда АСМ на участках А и С относительно темных участков В, полученный во время движения зонда по поверхности. Относительная величина сбой фазы для области С в 2 раза превысила сбой фазы для области А. На исходной поверхности различия в фазовом контрасте по поверхности кремния (111) выявлено не было (см. рис. 2, б). Различие в фазовом контрасте АСМ для сверхструктурных доменов, иницированных субмонослойным

осаждением меди, может быть объяснено различной ориентацией доменов относительно направления сканирования зондом поверхности [62].

Заключение

В представленной работе изучен механизм формирования фазового контраста в атомно-силовой микроскопии в различных условиях взаимодействия осциллирующего зонда с поверхностью. Представлен новый кинетический механизм формирования фазового контраста на поверхности, иницирующийся при увеличении скорости передвижения зонда АСМ по поверхности подложки вследствие увеличения силы трения. Применение кинетического фазового контраста АСМ позволяет расширить возможности визуализации поверхностных дефектов.

Список литературы

1. Binning G., Rorer H., Gerber Ch., Weibel E. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy // Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 49. 57 p.
2. Binnig G., Rorer H., Gerber Ch., Weibel E. Tunneling through a controllable vacuum gap // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 40. 178 p.
3. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch. Atomic force microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56. 930 p.
4. Дунаевский М. С., Красильник З. Ф., Лобанов Д. Н. и др. Визуализация зарощенных наностроек GeSi в кремниевых структурах методом атомно-силовой микроскопии на сколах // ФТП. 2003. Т. 37, вып. 6. С. 692–699.
5. Anand S., Carlstron C. F. Doping landscapes in the nanometer range by scanning capacitance microscopy // Applied Surface Science. 1999. Vol. 144–145. P. 525–529.
6. Tomiye H., Yao T. Nanometer-scale characterization of lateral $p-n^+$ junction by scanning capacitance microscope // Applied Surface Science. 2000. Vol. 159, 160. P. 210–219.
7. Tomiye H., Kawami H., Yao T. Characterization of SiO_2/Si with a novel scanning capacitance microscope combined an atomic force microscope // Applied Surface Science. 1997. Vol. 117, 118. P. 166–170.
8. Decossas S., Mazen F., Souifi T., Bremond G. Electric measurements by AFM on

- silicon nanocrystals // *Physica. E*. 2003. Vol. 17. P. 543–545.
9. De Wolf P., Brazel E., Erickson A. Electrical characterization of semiconductor materials and devices using scanning probe microscopy // *Mat. Science in Semiconductor Processing*. 2001. Vol. 4. P. 71–76.
10. Ludeke R., Cartier E. Imaging of oxide and interface charges in SiO₂ – Si // *Microelectronic Engineering*. 2001. Vol. 59. P. 259–263.
11. Ludeke R. Electrical characterization of oxides by scanning probe microscopies // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2002. Vol. 303. P. 150–161.
12. Kimura K., Kobayachi K., Yamada H., Matsushige K. Two-dimensional dopant profiling by scanning capacitance force microscopy // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 210. P. 93–98.
13. Bordoni F., Fasciani L., De Tommasis R. et al. Scanning capacitance microscope, an alternative technique to the C-V measurement for the SiO₂ characterisation // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1997. Vol. 216. P. 180–184.
14. Van Loenen E. J., Dijkkamp D., Hoeven A. J. et al. Direct writing in Si with a scanning tunneling microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1989. Vol. 55.
15. Mamin H. J., Guethner P. H., Rugar D. Atomic emission from a gold scanning-tunneling-microscope tip // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Vol. 65.
16. Heyvaert I., Osquiguil E., Van Haesendonck C., Bruynse-raede Y. Etching of screw dislocations in YBa₂Cu₃O₇ films with a scanning tunneling microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1992. Vol. 61.
17. McCord M. A., Pease R. F. W. Exposure of calcium fluoride resist with the scanning tunneling microscope // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1987. Vol. 5.
18. Wilder K., Quate C., Singh B., Kyser D. F. Electron beam and scanning probe lithography: A comparison // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1998. Vol. 16.
19. Stockman L., Neuttiens G., Van Haesendonck C., Bruyn-seraede Y. Submicrometer lithographic patterning of thin gold films with a scanning tunneling microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 62.
20. Park S. W., Soh H. T., Quate C. F., Park S.-I. Nanometer scale lithography at high scanning speeds with the atomic force microscope using spin on glass // *Appl. Phys. Lett.* 1995. Vol. 67.
21. Sohn L. L., Willet R. L. Fabrication of nanostructures using atomic-force-microscope-based lithography // *Appl. Phys. Lett.* 1995. Vol. 67.
22. Dagata J. A., Schneir J., Harary H. H. et al. Modification of hydrogen-passivated silicon by a scanning tunneling microscope operating in air // *Appl. Phys. Lett.* 1990. Vol. 56.
23. Tabata O., Asahi R., Funabashi H. Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions // *Sensors and Actuators. A*. 1992. Vol. 34.
24. Day H. C., Allee D. R. Selective area oxidation of silicon with a scanning force microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 62. No. 21.
25. Kramer N., Birk H., Jorritsma J., Schroenenberger C. Fabrication of metallic nanowires with a scanning tunneling microscope // *Appl. Phys. Lett.* 1995. Vol. 66.
26. Sugimura H., Uchida T., Kitamura N., Masuhara H. Tip-induced anodization of titanium surfaces by scanning tunneling microscopy: A humidity effect on nanolithography // *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 63.
27. Held R., Heinzl T., Studerus P., Enslin K. Nanolithography by local anodic oxidation of metal films using an atomic force microscope // *Phys. E*. 1998. Vol. 2. P. 748–752.
28. Thundat T., Nagahara L. A., Oden P. I. et al. Modification of tantalum surfaces by scanning tunneling microscopy in an electrochemical cell // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1990. Vol. 8. No. 4. P. 3537–3541.
29. Notargiacomo A. et al. Atomic force microscopy lithography as a nanodevice development technique // *Nanotechnology*. 1999. Vol. 10.
30. Snow E. S., Campbell P. M. AFM Fabrication of Sub-10 nm Metal-Oxide Devices with in Situ Control of Electrical Properties // *Science*. 1995. Vol. 270.
31. Sheglov D. V., Prozorov A. V. et al. Peculiarities of nanooxidation on flat surface // *Phys. Low-Dim. Struct.* 2002. Vol. 5, 6. P. 239–247.
32. Szekeres A., Lytvyn P., Alexandrova S. AFM surface imaging of thermally oxidized hydrogenated crystalline silicon // *Appl. Surf. Sci.* 2002. Vol. 191. No. 1–4. P. 148–152.
33. Vallee C., Cardinaud C., Rolland L., Peignon M.-C. Roughness and chemistry of silicon and polysilicon surfaces etched in high-

- density plasma: XPS, AFM and ellipsometry analysis // *Appl. Surf. Sci.* 2000. Vol. 164.
34. *Lee H., Rabalais J. W. et al.* Growth of Ti and TiSi₂ films on Si(111) by low energy Ti⁺ beam deposition // *Surface Science*. 2000. Vol. 453.
35. *Sheu J. T., You K. S., Wo C. H., Chang K. M.* Single-electron transistor structures based on silicon-on-insulator silicon nanowire fabrication by scanning probe lithography and wet etching // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2002. Vol. 20.
36. *Соколов Д. В.* Механизм нанооксидирования n-In_{0.53}Ga_{0.47}As с помощью атомно-силового микроскопа // *ЖТФ*. 2002. Вып. 72/1. С. 60–65.
37. *Ma Y.-R., Yu C. et al.* Tip-induced local anodic oxidation on the native SiO₂ layer of Si(111) using an atomic force microscope // *Phys. Rev. B*. 2002. Vol. 64. No. 19.
38. *Eigler D. M., Schweizer E. K.* Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope // *Nature*. 1990. Vol. 344.
39. *Lyding J. W.* UHV STM nanofabrication: progress, technology spin-offs, and challenges // *Proceedings of the IEEE*. 1997. Vol. 85.
40. *Schmitz I., Schreiner M., Friedbacher G., Grasserbauer M.* Phase imaging as an extension to tapping mode AFM for the identification of material properties on humidity-sensitive surfaces // *App. Surf. Sci.* 1997. Vol. 115. P. 190–198.
41. *Zhong Q., Iniss D., Elings V. B.* Fractured polymer/silica fiber surface studied by tapping mode atomic force microscopy // *Surf. Sci.* 1993. Vol. 290.
42. *Tamayo J., Garcia R.* Effects of elastic and inelastic interactions on phase contrast images in tapping-mode scanning force microscopy // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 71.
43. *Martinez N. F., Garcia R.* Measuring phase shifts and energy dissipation with amplitude modulation atomic force microscopy // *Nanotechnology*. 2006. Vol. 17. P. 167–172.
44. *Garcia R., Tamayo J., Paulo A. S.* Phase contrast and surface energy hysteresis in tapping mode scanning force microscopy // *Sur. Interface Anal.* 1999. Vol. 27. P. 312–316.
45. *Hoffman P. M., Jeffery S., Pethica J. B. et al.* Energy Dissipation in Atomic Force Microscopy and Atomic Loss Processes // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 87. No. 26.
46. *Magonov S. N., Reneker D.* Characterization of Polymer Surfaces with Atomic Force Microscopy // *Ann. Revs. Mat. Sci.* 1997. Vol. 27.
47. *Nunes V. B., Zanette S. I.* Cantilever's behavior in the AC mode of an AFM // *Material Characterization*. 2003. Vol. 50. P. 173–177.
48. *Magonov S. N., Elings V., Whangbo M. H.* Phase imaging and stiffness in tapping-mode AFM // *Surf. Sci. Lett.* 1997. Vol. 375. P. L385–391.
49. *Spatz J. P. et al.* Forces affecting the substrate in resonant tapping force microscopy // *Nanotechnology*. 1995. Vol. 6. P. 40–44.
50. *Nguen T., Gu X., VanLaningham M., Giraud M. et al.* Characterization of Coating System Interphases With Phase Imaging AFM // 24th Ann. Meet. of the adhes. society. Proceedings. The Adhesion society. 2001. P. 68–70.
51. *Berquand A., Mazeran P.-E., Laval J.-M.* Influence of volume and surface properties on phase contrast in tapping mode atomic force microscopy // *Surf. Sci.* 2003. Vol. 523. P. 125–130.
52. *Basnar B., Friedbacher G., Brunner H. et al.* Analytical evaluation of tapping mode atomic force microscopy for chemical imaging of surfaces // *Appl. Surf. Sci.* 2001. Vol. 171. P. 213–225.
53. *Mate C. M., McClelland G. M., Erlands-son R., Chiang S.* Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface // *Phys. Rev. Lett.* 1987 Vol. 59. P. 1942–1945.
54. *Sheglov D. V., Kosolobov S. S., Rodyakina E. E., Latyshev A. V.* Application of atomic force microscopy in epitaxial nanotechnology // *Microscopy and analysis*. 2005. Vol. 9. P. 9–11.
55. *Щеглов Д. В., Латышев А. В.* Кинетический контраст в атомно-силовой микроскопии // *ЖЭТФ*. 2008. Т. 133.
56. *Ren N., Lee S. C.* The Effect of Surface Roughness and Topography on the Contact Behaviour of Elastic Bodies // *ASME. Journal of Tribology*. 1994. Vol. 116.
57. *Latyshev A. V. et al.* Direct UHV REM observation of the behaviour of monatomic steps on the silicon (111) surface // *Phys. Stat. Sol.* 1994. Vol. 146.
58. *Krasilnikov A. B. et al.* Monoatomic step clustering during superstructural transitions on Si(111) surface // *J. Crys. Gr.* 1992. Vol. 116.
59. *Tambe N. S., Bhushan B.* Friction model for the velocity dependence of nanoscale friction // *Nanotechnology*. 2005. Vol. 16.

60. Tambe N. S., Bhushan B. A new atomic force microscopy based technique for studying nanoscale friction at high sliding velocities // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38.

61. Dolbak A. E., Zhachuk R. A., Olshanetsky B. Z. Diffusion of Cu over a Clean Si(111) Surface // Semiconductors. 2001. Vol. 35. No. 9.

62. Крошков А. А., Баранова Е. А., Якушенко О. А. и др. Устройство для дифференциальной сверхвысоковакуумной откачки электронного микроскопа // Приборы и техника эксперимента. 1985.

Материал поступил в редколлегию 24.12.2007