

КИНЕТИЧЕСКИЙ КОНТРАСТ В АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Д. В. Щеглов**, *А. В. Латышев***

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 22 мая 2007 г.

Изучен механизм формирования фазового контраста в атомно-силовой микроскопии (АСМ) в различных условиях взаимодействия осциллирующего зонда с поверхностью. Зарегистрирован сдвиг фазы колебаний резонирующего зонда АСМ при его взаимодействии с поверхностью подложки при передвижении зонда АСМ вдоль поверхности. Обоснован кинетический механизм формирования фазового контраста АСМ, инициирующийся при увеличении скорости передвижения зонда АСМ по поверхности подложки вследствие увеличения силы трения. Обнаружена зависимость величины кинетического контраста АСМ от эффективной шероховатости поверхности. Методом кинетического фазового контраста АСМ получены изображения распределения примесей меди по поверхности кремния в атмосферных условиях.

PACS: 68.37.Ps, 68.35.Bs, 81.40.Pq

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что атомно-чистые поверхности полупроводников и металлов покрываются слоем естественного оксида после извлечения из сверхвысоковакуумной камеры. Однако атомно-силовая микроскопия (АСМ), несмотря на наличие пленки естественного окисла и загрязнения, присутствующие на поверхности кремния в атмосферных условиях, позволяет визуализировать на ней единичные атомные ступени высотой в одно межплоскостное расстояние (0.31 нм на Si(111) [1] и 0.14 нм на Si(100) [2]). Следовательно, естественный оксид в процессе образования реплицирует такие морфологические особенности поверхности, как атомные ступени высотой в несколько ангстрем. Более того, недавно было показано, что атомно-силовая микроскопия при атмосферных условиях позволяет визуализировать элементы рельефа высотой 0.08 нм на ступенчатой поверхности Si(111) [3]. Такой существенный прогресс в диагностике структурных процессов на поверхности стал возможен благодаря открытию полуконтактной методики сканирования поверхности осциллирующим зондом АСМ [4].

В основе полуконтактной методики АСМ лежит

регистрация амплитуды и сдвоя фазы резонансных колебаний зонда при его взаимодействии с поверхностью [5]. Методика АСМ, регистрирующая сдвоя фазы колебаний зонда, получила название метода фазового контраста. Величина сдвоя фазы колебаний зонда АСМ при соприкосновении с поверхностью зависит от многих параметров, таких как жесткость, химический состав, наличие окисла, абсорбционного слоя воды и т. д. Физические закономерности сдвоя фазы недостаточно изучены, что затрудняет корректную интерпретацию информации, получаемой о поверхности этим методом [6, 7]. В работе [8] показано, что изменения фазового сигнала во время приближения иглы к поверхности могут быть описаны моделью, учитывающей вязкостные силы, величина которых пропорциональна глубине проникновения иглы в объем пленки адсорбата на поверхности. В работе [9] показано, что источником сдвоя фазы для колеблющегося зонда является гистерезис, связанный с адгезионной диссипацией энергии. Установлено, что капиллярные силы [10] и кулоновское взаимодействие [11] также влияют на сдвоя фазы колебаний иглы на поверхности. Данная работа направлена на изучение механизмов формирования фазового контраста в атомно-силовой микроскопии в различных условиях взаимодействия зонда с поверхностью.

*E-mail: sheglov@thermo.isp.nsc.ru

**E-mail: latyshev@thermo.isp.nsc.ru

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментов в атмосферных условиях был использован атомно-силовой микроскоп Solver P-47H (NT-MDT), помещенный в специальную виброшумозащитную металлическую ячейку, корпус которой заземлялся с целью уменьшения воздействия электромагнитных помех. Для контроля толщины слоя адсорбированной на поверхности воды, которая оказывает существенное влияние на получаемую информацию, микроскоп был дополнен ячейкой управления влажностью, которая обеспечивала постоянную влажность воздуха в зоне образец–зонд посредством контролируемого пропускания через камеру осушенного азота. Относительная влажность во всех экспериментах составляла величину менее 10 %, что позволяло говорить о минимизации влияния адсорбированного слоя влаги на поверхности на результаты измерений сбоя фазы колебаний зонда АСМ [12].

Образцы представляли собой пластины кремния (111) размером $0.25 \times 1 \times 8$ мм³. Чистая ступенчатая поверхность кремния подготавливалась в сверхвысоковакуумной камере высокотемпературным отжигом посредством пропускания через образец электрического тока. Средняя модульная шероховатость полученных террас между моноатомными ступенями по АСМ-измерениям составила величину менее 0.5 \AA [1].

3. КОЛЕБАНИЯ ЗОНДА АСМ В ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим сбой фазы осциллирующего зонда АСМ-кантилевера в одномерной модели, когда взаимодействие зонда с поверхностью происходит в направлении z , нормальном к поверхности (рис. 1а). 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 m^* — эффективная масса кантилевера, z — координата кантилевера, k — его жесткость, q — коэффициент демпфирования, t — время, L и ω — соответственно амплитуда и частота вынуждающей силы.

Смещение фазы колебаний зонда АСМ, обусловленное взаимодействием иглы с поверхностью в направлении нормали к этой поверхности, назовем нормальным сбоем фазы колебаний, а распределение величины такого сбоя фазы колебаний по поверхности — нормальным фазовым контрастом.

В работах [13–15] было предложено решение уравнения (1) в виде соотношения, связывающего собой фазы φ колебаний кантилевера при взаимодействии с поверхностью и диссипацию его кинетической энергии E_{diss} в каждом цикле колебаний зонда АСМ:

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

где A_0 и ω_0 — амплитуда и частота свободных колебаний зонда, A и ω — амплитуда и частота, регистрируемые при подведенном к поверхности зонде, Q — добротность кантилевера.

На рис. 1б демонстрируется типичная экспериментальная зависимость нормального сдвига фазы колебаний кантилевера АСМ от его прижима к поверхности A . Из величины нормального сбоя фазы определяется величина диссипации кинетической энергии E_{diss} в каждом цикле колебаний зонда АСМ, для чего необходимо зафиксировать амплитуду свободных колебаний зонда и его прижим к поверхности.

Например, для типичного случая амплитуда свободных колебаний балки зонда составила величину $A_0 = 27.5$ нм при частоте колебаний зонда, равной 156 кГц. Максимальная величина сбоя фазы составила 57° на расстоянии до поверхности $A_0 - A = 3.5$ нм (относительный прижим $(A_0 - A)/A_0 = 0.9$). Следует отметить, что при сильных прижимах увеличивается сила взаимодействия зонда и поверхности, что вызывает необратимые изменения как поверхности, так и зонда [16]. При слабых прижимах зонда к поверхности сбой фазы колебаний чувствителен к малым отклонениям величины прижима, что затрудняет измерения сбоя фазы. Поэтому для регистрации фазового сбоя нами была выбрана промежуточная амплитуда $A = 10$ нм (относительный прижим $(A_0 - A)/A_0 = 0.6$), когда сбой фазы был равен 38° .

4. КИНЕТИЧЕСКИЙ ФАЗОВЫЙ КОНТРАСТ

На рис. 2 представлены 5×5 мкм² топографическое (а) и фазовое (б) АСМ-изображения ступенчатой поверхности Si(111) после извлечения из сверхвысоковакуумной камеры. Диагональная кривая на топографическом изображении схематически показывает профиль рельефа вдоль данного направления, на котором выявляются моноатомные ступени высотой 0.31 нм. Аналогичный профиль на фазовом изображении демонстрирует относительную величину сбоя фазы колебаний кантилевера. Пики соответ-

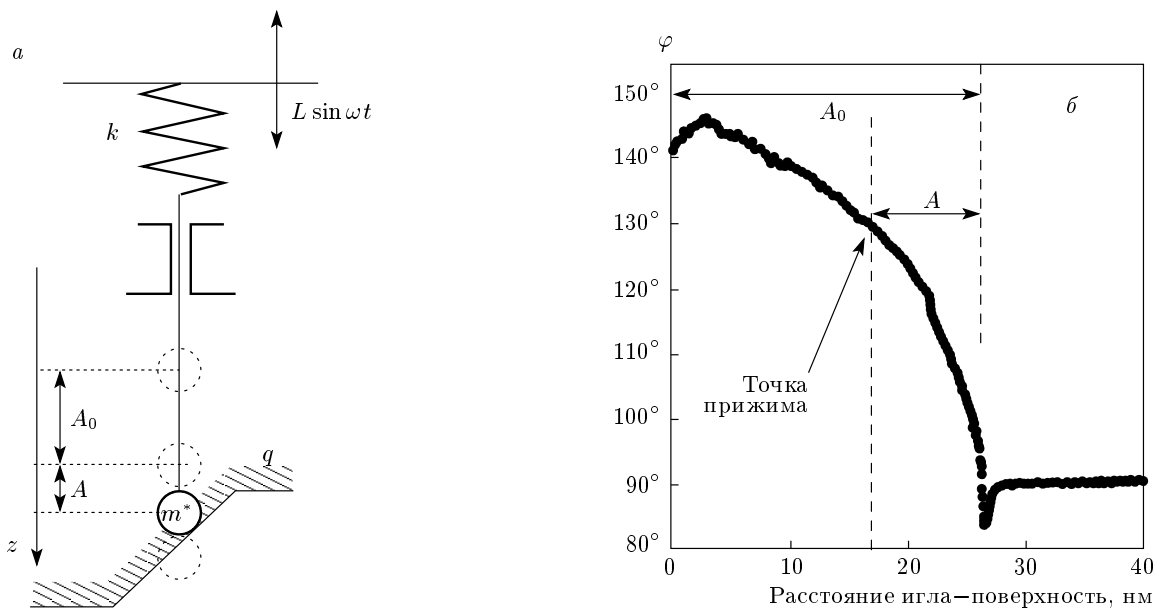


Рис. 1. а) Схематическое представление взаимодействия зонда с поверхностью в модели осциллятора с вынуждающей силой и трением. б) Зависимость сдвига фазы осциллирующего кантилевера от расстояния от иглы до поверхности

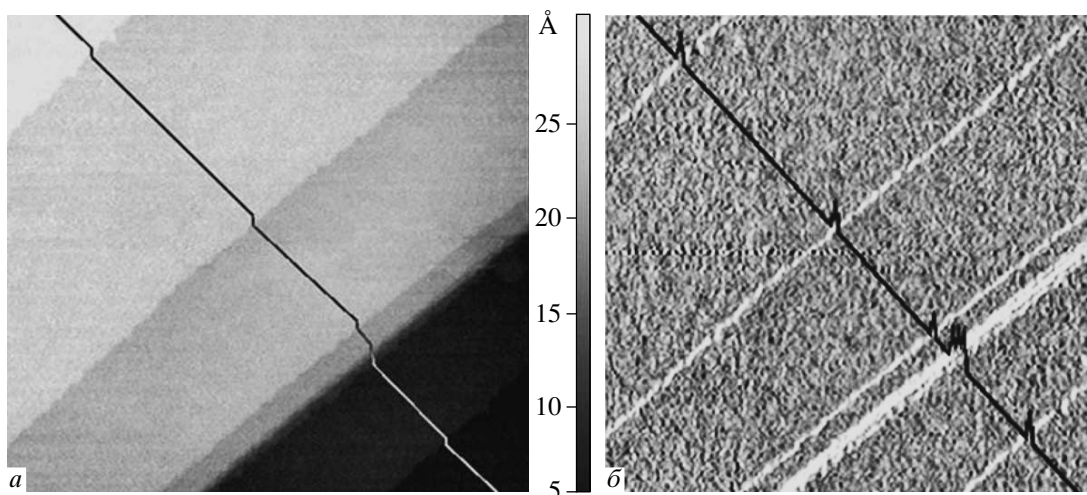


Рис. 2. Типичное топографическое (а) и фазовое (б) размером 5 × 5 мкм² АСМ-изображения ступенчатой поверхности кремния (111): диагональные кривые показывают профили рельефа (а) и сбоя фазы (б)

ствуют сбоям фазы колебаний кантилевера на топографических особенностях поверхности — моноатомных ступенях. Прямые измерения нормального фазового сдвига АСМ в любой точке сканируемого пространства не обнаружили разницы на террасах и моноатомных ступенях. Однако на рис. 2б наблюдается более значительный сбой фазы на моноатомных ступенях по сравнению со сбоям фазы на

террасах, что регистрируется по появлению белых полос, соответствующих моноатомным ступеням на фазовом изображении при латеральном сканировании. Контраст, обусловленный латеральным взаимодействием конца иглы зонда АСМ с рельефом изучаемой поверхности при его движении по ней, будем называть кинетическим фазовым контрастом. Экспериментальное подтверждение регистрации ла-

теральных сил в контактной методике сканирования АСМ при движении зонда АСМ по поверхности представлено в работе [17]. Это также подтверждено наблюдением фазового контраста при сканировании поверхности Si(111), частично покрытой сверхструктурными доменами, инициированными субмонослойным осаждением металлов [18].

Наличие латеральных сил при сканировании зондом поверхности приводит к зависимости коэффициента q демпфирования в уравнении (1) от скорости движения по поверхности и рельефа поверхности:

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

где $q(x, y)$ — поверхностное распределение коэффициента демпфирования, а $g(V(x, y), f(x, y))$ — добавочный коэффициент демпфирования, связанный с потерями энергии иглы 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, $f(x, y)$.

Модель, описываемая уравнением (3), хотя и учитывает латеральный фактор взаимодействия иглы и поверхности, однако описывает только единичный одноточечный контакт взаимодействия иглы с поверхностью, как показано на рис. 1а. В реальных условиях эксперимента из-за своей шероховатости зонд и поверхность одновременно взаимодействуют друг с другом множеством точек.

5. МНОГОТОЧЕЧНЫЙ КОНТАКТ ЗОНДА АСМ И КВАЗИПЕРИОДИЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим контакт иглы атомно-силового микроскопа и шероховатой поверхности в нанометровом масштабе. Например, при радиусе кривизны иглы АСМ около 20 нм и характерном размере шероховатости ее поверхности 0.3 нм диаметр пятна контакта иглы с поверхностью может составлять величину до 7 нм (рис. 3а). Следовательно, из-за шероховатостей соприкасающихся поверхностей в контакте будут участвовать множество точек поверхности иглы и образца одновременно, т. е. реализуется многоточечный контакт. В работе [19] авторы доказали, что при прижмем одной шероховатой поверхности к другой существует некоторая площадь контакта, которая определяется давлением, модулями упругости данных поверхностей и практически не зависит

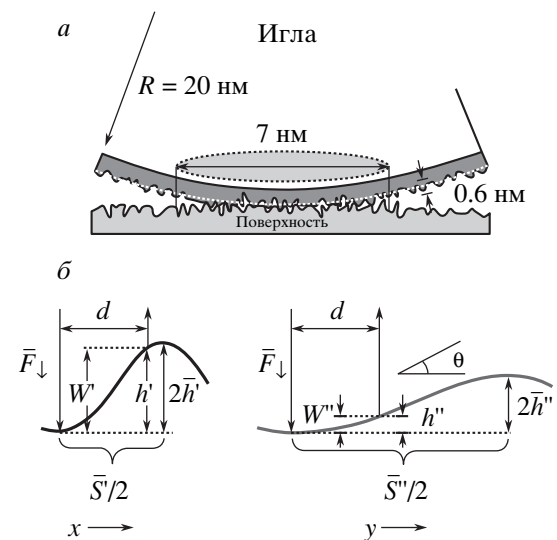


Рис. 3. а) Схематическое представление наноконтакта между зондом АСМ и шероховатой квазипериодической поверхностью с выделенными направлениями x и y . б) Схема преодоления зондом АСМ потенциальных барьеров на поверхности при латеральном движении, объясняющая потери энергии колебаний зонда на трение

от характеристик шероховатостей данных поверхностей. Это объясняет эквивалентный сбой фазы колебаний зонда АСМ в стационарном режиме в области моноатомных ступеней и между ними: площадь контакта и упругие характеристики в обоих измерениях эквивалентны.

При рассмотрении движущегося по поверхности зонда АСМ в прижатом к ней состоянии необходимо учитывать взаимное трение и потери энергии вследствие этого. В основополагающих работах по трибологии трение между двумя шероховатыми поверхностями на микро- и наномасштабе рассматривается как процесс диссипации энергии при движении одного набора объектов в потенциальном поле другого [20, 21]. Если предположить, что исследуемая нами поверхность содержит элементы неоднородности поверхности, расположенные с периодом \bar{S} (квазипериодичность), то движение зонда описывается как преодоление множества барьеров в квазипериодичном потенциальном поле. Понятие квазипериодичности рельефа эквивалентно понятию корреляционной длины на данной поверхности, т. е. средней длины, на которой встречаются перепады рельефа, большие или равные одному межплоскостному расстоянию для этой поверхности. В этом случае период такой квазипериодичности и высота барьеров (параметры

шероховатости) будут определять процессы потери энергии колебаний зондом АСМ при его движении. Так, если на поверхности имеется структура рельефа с выделенными направлениями (например, период \bar{S}' в x -направлении и период \bar{S}'' в y -направлении), то и сбой фазы колебаний зонда АСМ, отвечающий за потери на трение, будет различаться для разных направлений сканирования.

6. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ЗОНДА АСМ НА ТРЕНИЕ: МОДЕЛЬ И ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 3б схематически показано изменение энергии одного из выступов иглы атомно-силового микроскопа при движении вдоль периодических потенциалов, происходящее в каждом отдельном цикле колебаний иглы АСМ. Стрелками показаны точки касания поверхности при подводе зонда к ней и точки отрыва при отводе зонда от поверхности. Расстояние между ними равно скорости кантилевера, умноженной на время касания зондом поверхности, что определяется частотой колебаний и величиной прижима зонда к поверхности. Видно, что на преодоление участка с более крутым профилем рельефа (потенциала) иглой будет затрачено больше энергии W' , чем в случае с более пологим рельефом, W'' . Диссипативность силы трения в данном случае соответствует невозвращению энергии, затраченной на преодоление таких барьеров, при спуске по их обратной стороне. Заметим, что в нормальном режиме сбой фазы колебаний зонда АСМ на такой поверхности будет одинаков при любой ее ориентации относительно зонда АСМ.

Пусть вдоль направления x имеется поверхность с квазипериодом — корреляционной длиной \bar{S}' — и модульной шероховатостью — амплитудой рельефа (средним расстоянием от минимумов до максимумов по высоте) $2\bar{h}'$. Скорость V движения кантилевера вдоль этой координаты такая, что за время касания поверхности (все процессы рассматриваются для одного цикла колебаний) он проходит латеральный путь d . Обозначим среднюю силу, с которой зонд давил на поверхность, как \bar{F}_\downarrow (рис. 3б). Тогда изменение энергии иглы $W' = \bar{F}_\downarrow h'$, где h' — эффективная высота, на которую поднимется по этому барьеру игла. Квазипериодичность рельефа вводится в нулевом приближении, поэтому упрощенно предположим, что нарастание рельефа — потенциального барьера — происходит монотонно и будет линейным, а следовательно, эффективную высоту можно выразить через угол наклона поверхности: $h' = d \operatorname{tg} \theta$, т. е.

через отношение модульной шероховатости и корреляционной длины, так как $\operatorname{tg} \theta = 4\bar{h}'/\bar{S}'$. Отсюда имеем

$$W' = \bar{F}_\downarrow d \frac{4\bar{h}'}{\bar{S}'} \approx \bar{F}_\downarrow V \frac{\gamma}{\nu} \frac{\bar{h}'}{\bar{S}'}, \quad (4)$$

где ν — частота колебаний кантилевера, а γ — часть периода колебаний, в которой игла давит на поверхность. Следует заметить, что данное выражение применимо в случае, когда выполняется следующее соотношение:

$$\frac{\gamma}{\nu} < \frac{\bar{S}'}{2V},$$

т. е. когда игла не успевает пройти половину корреляционной длины за время касания поверхности. Назовем безразмерный параметр \bar{h}'/\bar{S}' коррелированной шероховатостью R'_{cor} . Данный параметр определяется для одного направления вдоль поверхности и является характеристикой среза профиля поверхности в данном направлении.

Для разности энергетических потерь иглы при сканировании с одинаковыми скоростями в двух различных направлениях поверхности с различными коррелированными шероховатостями получаем

$$E_{diss} = W'' - W' \approx \bar{F}_\downarrow V \frac{\gamma}{\nu} (R''_{cor} - R'_{cor}). \quad (5)$$

На рис. 4а представлено модельное (размером $5.1 \times 5.1 \text{ нм}^2$) топографическое АСМ-изображение поверхности с квазипериодическим рельефом. Корреляционная длина (период рельефа) в x -направлении составила величину $\bar{S}' = 0.58 \text{ нм}$, в y -направлении — $\bar{S}'' = 1.16 \text{ нм}$ (рис. 4б). Амплитуда рельефа в обоих направлениях одинакова и равна $2\bar{h}' = 2\bar{h}'' = 0.63 \text{ нм}$, что соответствует межплоскостному расстоянию для поверхности кремния (111). Таким образом, корреляционная шероховатость для x -направления составила $R'_{cor} = 0.543$, а для y -направления — $R''_{cor} = 0.272$. На рис. 4в представлены результаты численного моделирования энергии, теряемой кантилевером АСМ на трение о поверхность, в зависимости от направления сканирования такой модельной поверхности. Для моделирования были выбраны следующие параметры: $\bar{F}_\downarrow = 10^{-9} \text{ Н}$, $\nu = 10^5 \text{ Гц}$, $\gamma = 0.3$, $V = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$. С учетом того, что параметры коррелированной шероховатости для x -направления R'_{cor} приближаются к минимально возможным (амплитуда рельефа и корреляционная длина), при расчетах изменялись параметры только для y -направления. При бесконечном периоде рельефа, т. е. гладкой поверхности, в y -направлении предсказывается отсутствие потерь на трение (кривая 1). Такие потери

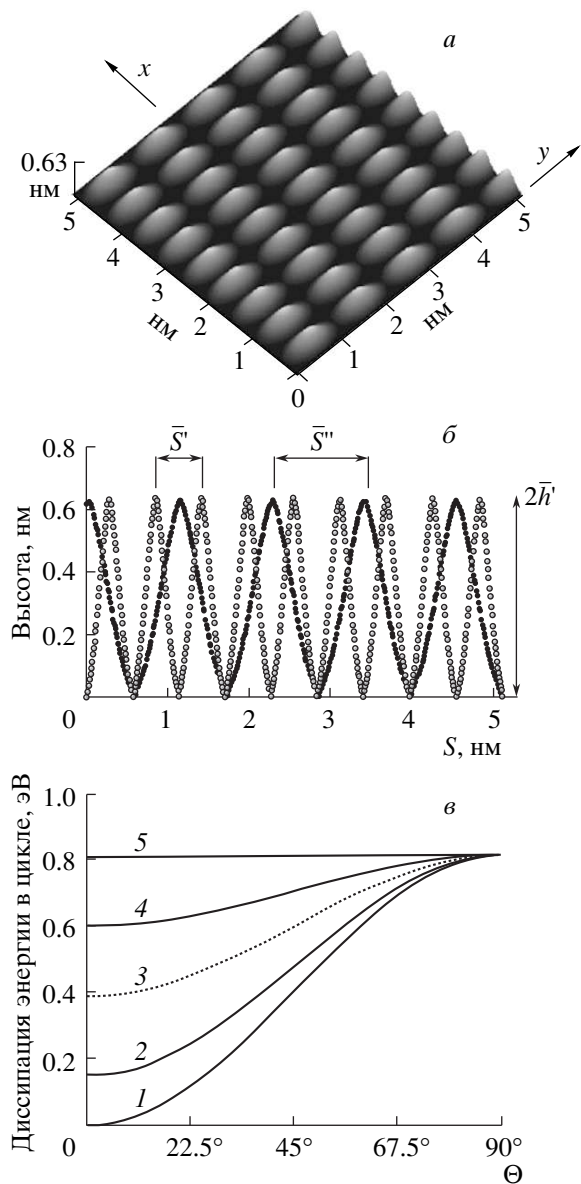


Рис. 4. а) Модельное топографическое АСМ-изображение рельефа поверхности с двумя выделенными направлениями, различающимися периодом расположения характерных особенностей рельефа. б) Профили рельефа вдоль выделенных направлений x и y : $\bar{S}' = 0.58$ нм, $\bar{S}'' = 1.16$ нм, $2\bar{h}' = 2\bar{h}'' = 0.63$ нм. в) Зависимости теряемой на трение энергии колебаний зонда АСМ от направления сканирования для различных коррелированных шероховатостей в выделенных направлениях: $R' = 0.543$; $R'' = 0$ (1), 0.1 (2), 0.27 (3), 0.4 (4), 0.54 (5); направление y соответствует $\Theta = 0$, направление $x - \Theta = 90^\circ$

начинают вносить заметный вклад при отношении периода и амплитуды рельефа поверхности порядка 10 (кривая 2). Кривая 3 показывает зависимость энергии диссипации от направления для модельной поверхности, представленной на рис. 4а. Разница в потерях энергии на трение для двух выделенных направлений составила величину $\Delta E_{diss} = 0.44$ эВ. При отсутствии разницы в периоде и амплитуде рельефа поверхности энергия диссипации не меняется при повороте образца относительно направления сканирования.

Рисунок 5а демонстрирует экспериментальное АСМ-изображение рельефа поверхности кремния (111) со сверхструктурными доменами, образовавшимися после субмонослойного напыления меди в сверхвысоковакуумной камере [3, 22, 23]. АСМ-изображение в режиме регистрации фазового сдвига выявило не только положение ступеней, но и три вида контраста на поверхности кремния (111), покрытой медью. Темная, светлая и промежуточная серая области, помеченные буквами А, В и С, соответствуют участкам поверхности кремния (111), покрытым сверхструктурой $[5 \times 5]$, инициированной медью [24]. Различие в кинетическом фазовом контрасте АСМ для сверхструктурных доменов, образованных субмонослойным осаждением меди, объясняется различной ориентацией доменов относительно направления сканирования зондом поверхности [25].

Формирование кинетического фазового контраста АСМ определяется дополнительным диссипативным параметром, который активируется при латеральном движении зонда по поверхности и который зависит от его скорости. В данном случае таким параметром является сила трения. На основе соотношений (3) и (5) для проверки данного предположения были проведены эксперименты по измерению величины разности сбоев фазы на реконструированной и нереконструированной поверхностях в зависимости от скорости сканирования поверхности зондом АСМ (рис. 5б). С увеличением скорости сканирования до 20 мкм/с происходил рост разности фазового сдвига на реконструированной и нереконструированной медью поверхности кремния. Это согласуется и с моделью, представленной выше, и с моделью Бхушана – Тамбе [26], связывающей диссипативную силу и скорость в предположении о затратах энергии на «асферическую» неупругую деформацию:

$$F_{fr} = \beta V^{7/3}, \tag{6}$$

где коэффициент β определяется силой нормально-го давления на поверхность и ее упругими характе-

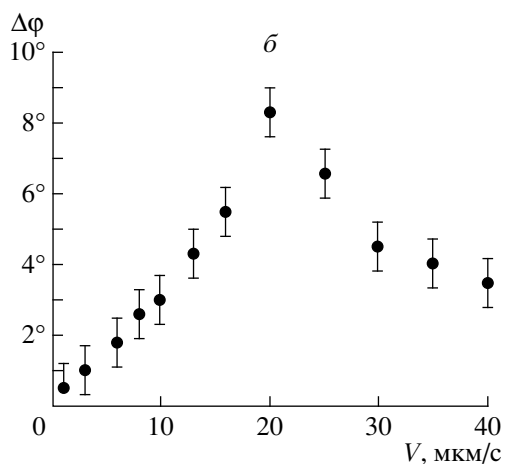
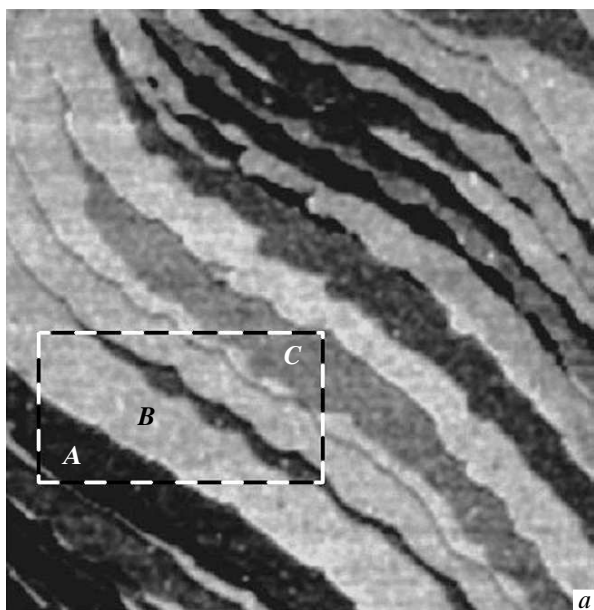


Рис. 5. а) АСМ-изображение кинетического фазового контраста участка 8 × 8 мкм² поверхности кремния (111), содержащей сверхструктурные домены [5 × 5], инициированные осаждением меди в сверхвысоковакуумной камере, буквами отмечены области с разным сбоем фазы на участках с различной ориентацией сверхструктурных доменов относительно направления сканирования. б) Разность сдвигов фаз осциллирующего кантилевера на различных доменах в зависимости от скорости сканирования

ристиками. Основываясь на изложенном выше предположении о зависимости сбоя фазы от ориентации сверхструктурных доменов относительно направления сканирования, можно заключить, что основным фактором, влияющим на сбой фазы, является диссипация энергии в каждом цикле колебаний кантилеве-

ра вследствие трения иглы о поверхность. При дальнейшем увеличении скорости сканирования до значений, больших 20 мкм/с, происходит резкое уменьшение разницы сдвигов фазы на реконструированных и нереконструированных областях до некоторой постоянной величины. Наличие порога и уменьшение разности сдвигов фазы может быть объяснено в рамках многоточечного контакта между иглой и поверхностью с рельефом, состоящим из холмов и долин, за счет уменьшения взаимодействия в случае, когда выполняется условие [27, 28]

$$\frac{\gamma}{\nu} \geq \frac{\bar{S}'}{2V}$$

Предполагается, что выступы иглы кантилевера при увеличении скорости движения по поверхности не успевают достигнуть дна долин поверхности в вертикальном направлении за время прохождения между ними в латеральном направлении, что приводит к уменьшению эффективной «глубины» взаимодействия зонда и поверхности.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализирован сдвиг фазы колебаний резонирующего зонда АСМ при его взаимодействии с поверхностью подложки в условиях изменения скорости передвижения зонда АСМ вдоль поверхности. Выявлен и обоснован кинетический механизм формирования фазового контраста АСМ, инициирующийся при увеличении скорости передвижения зонда АСМ по поверхности подложки вследствие увеличения силы трения. В рамках многоточечного контакта зонд–поверхность рассмотрены процессы диссипации энергии при латеральном взаимодействии зонда АСМ и поверхности при передвижении зонда по этой поверхности. Обнаружена зависимость интенсивности кинетического контраста АСМ от эффективной шероховатости поверхности. Методом кинетического фазового контраста АСМ получены изображения распределения примесей меди по поверхности кремния в атмосферных условиях. Различие в фазовом контрасте АСМ для сверхструктурных доменов, инициированных субмонослойным осаждением меди, объяснено в предположении о различной ориентации доменов относительно направления сканирования зондом поверхности. Проведено сравнение результатов с моделью Бхушана–Тамбе, что подтвердило трибологическую природу формирования кинетического фазового контраста в АСМ.

Авторы выражают признательность С. С. Косообову, Е. Е. Родякиной и Е. А. Сергеевой за помощь в создании тестовых структур и обсуждении результатов. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 07-02-01003) и Программы поддержки ведущих научных школ (грант № НШ-8401.2006.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. S. S. Kosolobov, D. A. Nasimov, D. V. Sheglov, E. E. Rodyakina, and A. V. Latyshev, *Phys. Low-Dim. Struct.* **5/6**, 231 (2002).
2. E. E. Rodyakina, S. S. Kosolobov, D. V. Sheglov, D. A. Nasimov, Se Ahn Song, and A. V. Latyshev, *Phys. Low-Dim. Struct.* **1/2**, 9 (2004).
3. D. A. Nasimov, D. V. Sheglov, E. E. Rodyakina, S. S. Kosolobov, L. I. Fedina, S. A. Teyss, and A. V. Latyshev, *Phys. Low-Dim. Struct.* **3/4**, 157 (2003).
4. Q. Zhong, D. Iniss, and V. B. Elings, *Surf. Sci.* **290**, L688 (1993).
5. J. Tamayo and R. Garcia, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2374 (1997).
6. J. P. Cleveland, B. Anczykowski, E. Schmid, and V. Elings, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2926 (1998).
7. B. Anczykowski, B. Gotsmann, H. Fuchs, J. P. Cleveland, and V. Elings, *Appl. Surf. Sci.* **140**, 376 (1999).
8. F. Dubourg, J. P. Aime, S. Marsaudon, R. Boisgard, and P. Leclere, *Eur. Phys. J. E* **6**, 49 (2001).
9. J. Tamayo and R. Garcia, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2926 (1998).
10. J. Tamayo and R. Garcia, *Langmuir* **12**, 4430 (1996).
11. N. W. Nelson, P. G. Schroeder, R. Shalf, B. A. Parkinson, C. W. Almgren, and A. N. Erickson, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 1421 (1999).
12. T. Nguyen, X. Gu, M. VanLaningham, M. Giraud, R. Dutruc-Rosset, R. Ryntz, and D. Nguyen, in *Proc. 24-th Annual Meeting of the Adhesion Society*, The Adhesion Society (2001), p. 68.
13. R. Garcia, J. Tamayo, and A. S. Paulo, *Surface and Interface Analysis* **27**, 312 (1999).
14. A. Berquand, O.-E. Mazeran, and J.-M. Caval, *Surf. Sci.* **523**, 125 (2003).
15. P. M. Hoffman, S. Jeffery, J. B. Pethica, H. Ö. Özer, and A. Oral, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 265502(4) (2001).
16. D. V. Sheglov, A. V. Latyshev, and A. L. Aseev, *Appl. Surf. Sci.* **243**, 138 (2005).
17. C. M. Mate, G. M. McClelland, R. Erlandsson, and S. Chiang, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 1942 (1987).
18. D. V. Sheglov, S. S. Kosolobov, E. E. Rodyakina, and A. V. Latyshev, *Microscopy and Analysis* **9**, 9 (2005).
19. N. Ren and S. C. Lee, *ASME J. Tribology* **116**, 804 (1994).
20. F. P. Bowden and D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, Part I, Clarendon Press, Oxford (1950).
21. F. P. Bowden and D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, Part II, Clarendon Press, Oxford (1964).
22. A. V. Latyshev, A. B. Krasilnikov, and A. L. Aseev, *Phys. Stat. Sol. A* **146**, 251 (1994).
23. A. B. Krasilnikov, A. V. Latyshev, A. L. Seev, and S. I. Stenin, *J. Crys. Growth* **116**, 178 (1992).
24. A. E. Dolbak, R. A. Zhachuk, and B. Z. Olshanetsky, *Semiconductors* **35**, 1018 (2001).
25. А. А. Крошков, Е. А. Баранова, О. А. Якушенко и др., *ПТЭ* № 1, 199 (1985).
26. N. S. Tambe and B. Bhushan, *Nanotechnology* **16**, 2309 (2005).
27. N. S. Tambe and B. Bhushan, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 764 (2005).
28. B. Bhushan, *Tribology Lett.* **4**, 1 (1998).