

УДК 53.083.98

Д. А. Насимов, Д. В. Щеглов, А. В. Латышев

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

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: sheglov@thermo.isp.nsc.ru

АТОМНЫЕ СТУПЕНИ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ КАК ТЕСТ-ОБЪЕКТ ВЫСОТЫ В АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ *

Для обеспечения единства измерений в нанотехнологиях разработан тест-объект для прецизионной калибровки z -координаты атомно-силового микроскопа в суб- и нанометровом диапазонах с точностью до 0,05 нм на основе системы атомных ступеней, высотой в одно межплоскостное расстояние, на vicинальной поверхности кремния. Предельно высокая точность тест-объекта обеспечена за счет сравнения его значения с параметром атомной решетки совершенного кристалла.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, метрология, сертификация, атомные ступени, поверхность.
PACS 06.20.fb, 68.37.Ps, 68.47.fg

Введение

Уменьшение геометрических размеров объектов современных технологий до нанометровых и даже сравнимых с атомными связано с проявлением принципиально новых функциональных свойств нанобъектов и обуславливает необходимость развития методов диагностики в нанометровом диапазоне. Кроме того, диагностика наноструктур на атомном уровне, в частности, на основе различных высокоразрешающих методов сканирующей зондовой и просвечивающей электронной микроскопии является необходимым сопровождением современных технологических процессов. Особенно велика роль диагностики атомного разрешения при создании сложных полупроводниковых структур и приборов для нанoeлектроники, нанофотоники, спинтроники и биосенсорике, где важным параметром является точность измерения этих структур [1]. Применение комплекса взаимодополняющих высокоразрешающих диагностических

методов обеспечивает получение принципиально новых знаний о процессах формирования структуры и морфологии эпитаксиальных и низкоразмерных систем и расширяет возможности управления их структурным совершенством [2]. Необходимость проведения комплексной диагностики низкоразмерных систем создала предпосылки для развития методов структурного анализа, которые позволяют наиболее полно характеризовать атомарную и химическую структуру новых материалов. В частности, в последние годы наблюдается существенный прогресс в области сканирующей зондовой микроскопии, возможности которой по трехмерному измерению линейных размеров нанорельефа поверхности внесли существенный вклад в физику конденсированных сред.

Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) основан на измерении сил взаимодействия между твердотельной иглой и поверхностью исследуемого объекта [3]. К числу достоинств АСМ относится способность

* Представленные результаты получены при выполнении интеграционных проектов Сибирского отделения РАН, ФЦП программ Министерства образования и науки РФ «Приоритетные направления развития науки и техники в РФ на 2007–2012 гг.», проектов Российского фонда фундаментальных исследований.

Авторы выражают благодарность С. С. Косолюбову и Е. Е. Родякиной за помощь в подготовке образцов и проведении эксперимента, Л. И. Фединой и А. К. Гутаковскому за любезно представленную микрофотографию высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии.

составления карт распределения по поверхности таких параметров, как электростатический потенциал, кулоновский заряд, электрическая емкость, уровень легирования, намагниченность, оптические характеристики, адгезия, твердость и др. [4–8]. Возможность получения трехмерного изображения рельефа поверхности без сложных расчетов, относительная простота интерпретации изображений, высокая разрешающая способность и прецизионная точность измерений зондовой микроскопии позволяют решать многочисленные задачи, которые невозможно решить другими экспериментальными методами.

Использование атомно-силовой микроскопии при измерении геометрических характеристик или создании нанообъектов требует обеспечения единства измерений таких объектов с повышенной точностью. Проблема единства измерений в нанотехнологиях может решаться посредством создания калибровочных мер нанометрового диапазона в виде специально подготовленных образцов с заданным периодическим геометрическим рельефом [9]. Уменьшение характерных размеров калибровочной меры до единиц или долей нанометров усложняет создание периодического рельефа с достаточной точностью и воспроизводимостью. В данной работе сообщается о создании тест-объектов нано- и субнанометрового диапазона для атомно-силовой микроскопии на основе эпитаксиальных полупроводниковых технологий.

Калибровка атомно-силового микроскопа

Метод атомно-силовой микроскопии позволяет прецизионно измерять трехмерный (в x -, y - и z -координатах) рельеф поверхностей кристаллов, диэлектриков, полимеров, биологических и других материалов посредством регистрации взаимодействия твердотельного острозаточенного зонда (иглы) с поверхностью. Перемещение иглы относительно поверхности во всех трех координатах происходит с помощью жестко связанных с ней прецизионных двигателей на основе пьезокерамики. При калибровке перемещений зонда с помощью пьезодвигателей используются тестовые структуры – меры, содержащие периодический искусст-

венно созданный рельеф с известными геометрическими размерами.

Для проведения калибровки растровых электронных и сканирующих зондовых микроскопов в латеральных координатах в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-6} м Тодуа и др.¹ разработали рельефные меры нанометрового диапазона, которые представляют собой пластины из монокристаллического кремния, на поверхности которых созданы элементы рельефа определенной геометрической формы с характерными размерами не более 10^{-6} м.

На рис. 1 представлено типичное сканирующее электронно-микроскопическое изображение тестовой структуры, созданной методом реактивного ионного травления поверхности кремния (001) через маску электронного резиста РММА 950К после экспонирования остросфокусированным электронным пучком на литографе высокого разрешения (Raith-150) [10]. Темные линии представляют собой протравленные в кремнии области глубиной 100 ± 2 нм. Период данной структуры составил величину 800 ± 5 нм, что позволяет использовать его в качестве тест-объекта для калибровки и проверки зондовых и электронных микроскопов в латеральных координатах.

Калибровка z -координаты атомно-силового микроскопа в суб- и нанометровом диапазонах с помощью подобных тест-объектов затруднена. Принимая во внимание практическую сложность создания мер для калибровки z -координаты в виде периодического рельефа нанометрового размера с достаточной точностью, представляется интересным применение в качестве такой меры межплоскостного расстояния в атомной решетке кристалла. На поверхности кристалла одному межплоскостному расстоянию соответствует высота моноатомной ступени. По этой причине, моноатомная ступень на поверхности кристалла может рассматриваться как кандидат в меры субнанометрового диапазона для калибровки z -координаты атомно-силового микроскопа.

Для создания ступенчатой калибровочной меры субнанометрового и нанометрового диапазона на поверхности кристалла требуется сформировать области с заданной плотностью моноатомных ступеней. Необ-

¹ ГОСТ Р 8.628-2007 (<http://www.nicpv.ru/stand/>).

ходимая плотность ступеней на единицу длины для тест-объекта задается геометрическим размером измерительного зонда (радиус кривизны иглы) и отношением размера зонда к ширине террас. При этом ошибка измерений складывается из систематической ошибки измерений в одной точке (ошибка прибора) и ошибки измерений, связанной с шероховатостью поверхности (для ступенчатой поверхности – шероховатостью террасы, истинная z -координата которой измеряется). Систематическая ошибка измерений прибора зависит от уровня виброакустического и электромагнитного шума и ошибки самого измерительного контура. В случае, если систематическая ошибка прибора (АСМ) мала по сравнению с измеряемой величиной, погрешность в измерение вносит шероховатость.

Модульной шероховатостью R_a (DIN 4768) называется среднее по модулю отклонение от линии (плоскости) расположения измеряемой поверхности по N измеренным точкам:

$$R_a = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} |z|. \quad (1)$$

Среднеквадратичная шероховатость R_q (ISO 4287/1) определяется среднеквадратичным отклонением от линии (плоскости) расположения измеряемой поверхности по N измеренным точкам:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (z)^2}. \quad (2)$$

В идеальном кристалле терраса на поверхности кристалла является абсолютно гладкой плоскостью, тогда как в реальном кристалле на террасах существуют различные неоднородности в виде поверхностных точечных дефектов, адсорбированного слоя воды и других нарушений атомной структуры, увеличивающих шероховатость. Следовательно, для уменьшения ошибки измерений, связанной с шероховатостью данной террасы, необходимо увеличить количество точек измерений. Отметим, что погрешность определения пространственного положения плоскости террасы относительно плоскости сканирования АСМ будет уменьшаться с увеличением количества измерений N для модульной шероховатости как $1/N$, а для среднеквадратичной как $1/\sqrt{N}$. Высота моноатомной ступени может быть опре-

делена по разности высот двух соседних террас, примыкающих к ступени:

$$h = h_1 - h_2 = \frac{1}{N_x^1 N_y^1} \sum_{i=1}^{N_x^1} \sum_{j=1}^{N_y^1} Z_{ij}^1 - \frac{1}{N_x^2 N_y^2} \sum_{i=1}^{N_x^2} \sum_{j=1}^{N_y^2} Z_{ij}^2. \quad (3)$$

Для уменьшения ошибки измерений следует увеличить количество измерений на каждой террасе, примыкающей к моноатомной ступени. Для проведения прецизионных измерений зонд атомно-силового микроскопа должен сдвигаться в латеральном направлении после каждого измерения на расстояние не меньше, чем его геометрический размер. Следовательно, увеличение количества измерений на каждой террасе достигается либо за счет увеличения ширины такой террасы, либо за счет улучшения остроты зонда атомно-силового микроскопа. Большинство современных атомно-силовых микроскопов использует зонды (кантилеверы) с эффективным радиусом кривизны острия 10–20 нм, а характерный размер области сканирования 10×10 мкм² (см. <http://www.ntmdt-tips.com/catalog/golden.html>). Так как значительное уменьшение радиуса зонда сопряжено с существенными трудностями, то предпочтительным на практике является увеличение количества измерений за счет увеличения ширины террас ($N \sim d$, где d – ширина террасы). Заметим, что ошибка при измерении высоты террасы в этом случае падает как $1/\sqrt{d}$.

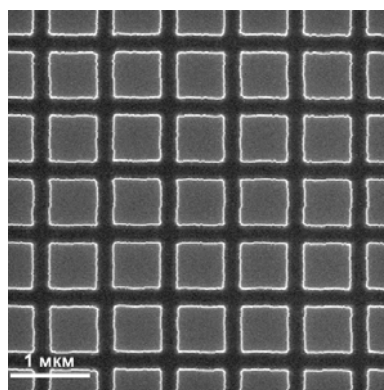


Рис. 1. Изображение в сканирующем электронном микроскопе тестовой структуры, созданной методом реактивного ионного травления поверхности кремния (001) через маску электронного резиста РММА 950 К после экспонирования остросфокусированным электронным пучком 10кВ на литографе Raith-150. Период структуры 800 нм, перепад высот 100 нм

Традиционно используемые меры для калибровки z -координаты в АСМ создаются методом скалывания слоя поверхности графита или слюды и не позволяют воспроизводимо получать отдельные моноатомные ступени с необходимой плотностью их распределения по поверхности [11]. На рис. 2, *a* показано АСМ-изображение рельефа поверхности высокоориентированного пиролиитического графита. Распределение точек скана по высоте не позволяет аккуратно идентифицировать моноатомные ступени или макроступени, тем более производить калибровку измерительной системы по полученному изображению (рис. 2, *б*). По этой причине прогресс в развитии калибровочных высотных мер нанометрового диапазона связывается с эпитаксиальными технологиями.

Атомная ступень как тест-объект

Е. D. Williams и др. [12–14] предложили для калибровки измерений в атомно-силовой микроскопии использование отожженной в сверхвысоком вакууме вицинальной поверхности кремния, где в качестве единицы меры задавалась высота моноатомной ступени 0,31 и 0,15 нм на поверхностях кремния с ориентацией (111) и (100), соответственно. Заметим, что параметр кристаллической решетки особо-чистого кремния изменяется не более чем на 1 %, так как коэффициент температурного линейного расширения кремния составляет величину по модулю до 10^{-5} K^{-1} во всем интервале температур его кристаллического существования [15].

На рис. 3 представлено топографическое изображение, полученное методом атомно-силовой микроскопии, типичной поверхности кремния (111) до (*a*) и после (*б*) термического отжига. Шероховатость на-

чальной поверхности составила величину 0,21 нм (рис. 3, *в*). После высокотемпературного отжига на поверхности кремния сформировалась система моноатомных ступеней, расположенных на расстоянии 100–200 нм друг от друга в соответствии с разориентацией пластины (рис. 3, *з*). Статистическое распределение высот моноатомных ступеней, показанное на рис. 3, *б* показывает разброс по высотам и характерную ошибку в определении точной высоты (шероховатость), равную 0,1 нм, что составляет около 30 % от высоты ступени. Такая ошибка характерна для большинства калибровочных мер, содержащих террасы между моноатомными ступенями шириной менее 100 нм. Применение подложек кремния (001) с моноатомными ступенями высотой 0,15 нм для калибровки z -координаты в АСМ тем более затруднительно.

Следовательно, для создания тест-объекта на основе вицинальной поверхности кремния для калибровки атомно-силовых микроскопов необходимо создание системы моноатомных ступеней, расположенных на расстояниях более одного микрона. Отметим, что ширина террас более 5 мкм, по-видимому, ограничит применение тест-объекта для калибровки профилометров и атомно-силовых микроскопов с размером сканера менее $10 \times 10 \text{ мкм}^2$.

Выглаживание поверхности кремния

Очищенная от примесных атомов и оксидов вицинальная поверхность кремния содержит систему периодически расположенных моноатомных ступеней, под которыми понимается непрерывная линия, разграничивающая две полуплоскости – террасы с разницей высот в одно межплоскостное расстояние. Резистивный нагрев кристалла электрическим током до температуры более $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в сверхвысоковакуумной камере сопровождается направленным перемещением моноатомных ступеней за счет сублимации атомов верхнего атомного слоя (адсорбированных на поверхности атомов). Движение ступеней по поверхности сопровождается изменением как их формы, так и расстояния между ними (ширины террасы). В зависимости от направления приложенного электрического поля и от температуры кристалла на поверхности присутствует или система эквидистантных

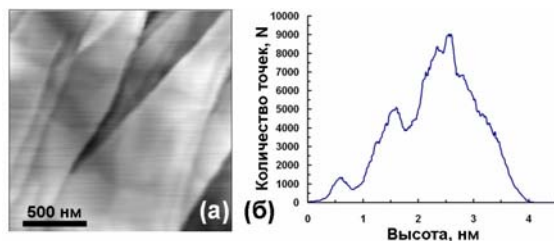


Рис. 2. Типичное топографическое АСМ-изображение поверхности высокоориентированного пиролиитического графита (HOPG) (*a*). Спектр высот, демонстрирующий распределение точек скана по высоте (*б*)

ступеней, или система эшелонов ступеней, т. е. участков поверхности с большой плотностью ступеней, разделенных участками с малой плотностью ступеней [16]. Установлено влияние направления постоянного электрического тока, нагревающего исследуемый кристалл, на температурные интервалы формирования эшелонов ступеней таким образом, что при смене полярности наблюдается переход от регулярной системы к эшелонам и наоборот [17]. Последнее указывает на существование эффективного заряда адсорбированных атомов (адатомов), обусловленного ионизацией и эффектами увлечения носителями зарядов в полупроводнике [18]. Количество ступеней в эшелоне и ширина террас между эшелонами зависят от температуры и времени отжига кристалла [19–22]. Важным представляется использование данного явления на vicинальных поверхностях кремния для формирования различного рода самоорганизованных систем без применения литографии, в том числе упорядоченных систем эшелонов ступеней [23], полосок примесно-индуцированных сверхструктур вдоль эшелонов ступеней [24] и латеральных поверхностных сверхрешеток [25].

Описанная выше методика получения широких террас, основанная на эффекте

кинетической нестабильности морфологии поверхности кремния в условиях прогрева прямым пропусканием электрического тока, может быть использована для создания калибровочной меры [26]. Большие террасы могут быть созданы на основе мезаструктурированной поверхности кремния [27; 28] или на основе эффекта нестабильности морфологии поверхности в условиях осаждения атомов золота [29; 30] или взаимодействия с кислородом [31].

Эксперименты по изменению морфологии поверхности кремния проводились в колонне сверхвысоковакуумного отражательного электронного микроскопа (СВВ ОЭМ) [32]. Метод СВВ ОЭМ позволяет получать информацию о таких поверхностных дефектах, как моноатомные ступени, реконструированные домены, точки выхода на поверхность дислокаций, двумерные и трехмерные островки роста, двумерные островки сублимации и др. Высокая чувствительность метода СВВ ОЭМ к структурному совершенству приповерхностного слоя обусловлена малым углом падения высокоэнергетичных (100 кэВ) электронов на анализируемую поверхность. Метод СВВ ОЭМ обладает большими возможностями по проведению *in situ* экспериментов: нагрев образца прямым пропусканием электрического тока

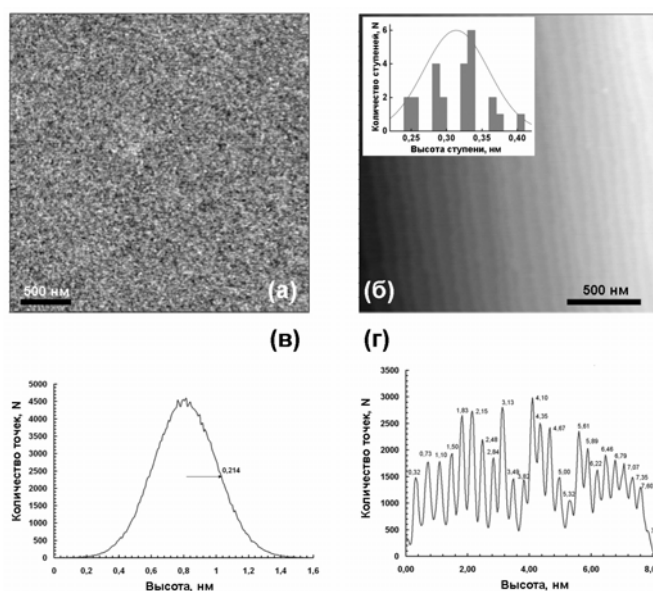


Рис. 3. Топографическое АСМ-изображение участка поверхности подложки кремния (111) до отжига (а) и статистика распределения точек на этом изображении по высоте (б) (цифра возле стрелки – значение полуширины статистического пика на полувысоте) и после отжига (б–д) для поверхности кремния, содержащей эквидистантно расположенные моноатомные ступени, полученной после термического отжига при высоких температурах; гистограмма демонстрирует распределение по высотам ступеней (б)

вплоть до температуры плавления, осаждение различных материалов [29], напуск газовой атмосферы [31] при одновременном наблюдении структурных процессов на поверхности.

Образец представлял собой полосу кремния $0,3 \times 1 \times 8$ мм³, вырезанную из кремниевой шайбы с углом разориентации от плоскости (111) менее 1°. После стандартной процедуры обезжиривания и химической очистки образец помещался в колонну СВВ ОЭМ и подвергался кратковременному отжигу при температуре 1 300 °С. В результате на поверхности кремния была сформирована система периодически расположенных моноатомных ступеней высотой 0,31 нм. Критериям чистоты поверхности служило наличие обратимого сверхструктурного перехода $(7 \times 7) \rightarrow (1 \times 1)$ при температуре 830 °С (для подложек с ориентацией (111)), отсутствие центров торможения ступеней при движении ступеней в процессе сублимации, а также отсутствие на дифракционной картине дополнительных рефлексов [33].

Процесс сублимации сопровождался тангенциальным перемещением моноатомных ступеней в сторону вышерасположенных террас, и скорость движения ступени была пропорциональна ширине примыкающих террас [34]. Количество монослоев, уходящих с поверхности кристалла за одну секунду, зависело от пересыщения σ и ширины террасы d :

$$V/d \sim \sigma v \exp(-W_s/k_B T), \quad (4)$$

где V – скорость движения ступени; v – частота атомных колебаний; W_s – энтальпия сублимации; T – температура; k_B – постоянная Больцмана. Из кинетики движения моноатомных ступеней при сублимации следует, что энергетический барьер для встраивания адатомов в ступень ниже со стороны нижней террасы по сравнению с барьером со стороны верхней террасы [35]. Важным для управления микроморфологией поверхности подложки представляется обнаружение эффектов самоорганизации в системе моноатомных ступеней, сопровождаемое формированием эшелонов ступеней при сублимации и гетероэпитаксиальном росте [36]. Установлено, что поверхность кремния (111) со структурой (1×1) при температурах выше температуры фазового перехода не является геометрически плоской и

содержит неупорядоченные кластеры адатомов со степенью заполнения $\approx 0,2$ монослоя [37; 33]. Непосредственные указания на существование на грани кремния (111) неупорядоченного слоя подвижных адатомов получены на основе количественного исследования интенсивности рефлексов на ДБЭ картинах и анализе изображений высокотемпературной СТМ [38; 39]. Важным представляется применение эффектов самоорганизации на вицинальных поверхностях кремния для формирования различного рода упорядоченных систем, в том числе эшелонов ступеней, без применения литографии. В частности, на основе эффекта кинетической нестабильности морфологии поверхности кремния в условиях прогрева прямым пропусканием электрического тока удалось получить участки поверхности размерами от 1 до 5 микрон без ступеней [40].

Естественный оксид на поверхности кремния

После создания системы моноатомных ступеней с заданным распределением на поверхности кремния образец извлекался из сверхвысоковакуумной камеры и исследовался на атомно-силовых микроскопах Solver P-47H и Ntegra (NT-MDT) с применением стандартных зондов. При экспозиции в воздушной атмосфере при комнатной температуре поверхность кремния покрывается слоем естественного окисла. Установлено, что оксидная пленка воспроизводит (реплицирует) структурные дефекты поверхности включая атомные ступени высотой в одно межплоскостное расстояние [41].

Современные представления о начальных стадиях окисления поверхности кремния предполагают, что окисление поверхности кремния происходит послойно, при этом, скорость окисления одинакова для любой террасы на данной поверхности [42–44]. В работе [41] проведены эксперименты по исследованию морфологии ступенчатой поверхности сразу после транспортировки из сверхвысоковакуумных условий (время окисления несколько минут) и через 5 лет экспозиции на воздухе. Толщины слоя окисла на образцах составляли 2 и 4 нм соответственно. При этом шероховатость поверхности обоих образцов составила величину 0,06 нм.

Дополнительным подтверждением однородности окисления поверхности служит ви-

зуализация методом АСМ сверхструктурных островков (7×7) на поверхности кремния (111), быстро охлажденной с 1200°C до комнатной температуры (закалка) в сверхвысоковакуумных условиях. На такой поверхности одновременно существуют сверхструктуры (1×1) и (7×7), обладающие различной упаковкой поверхностных атомов, при этом разница высот между областями с различной сверхструктурой составляет $0,8 \text{ \AA}$ [45]. Моноатомные ступени под пленкой естественного оксида также наблюдались на поверхности GaAs (100) [46]. Слоеое окисление следует также из отсутствия размытости на атомной границе раздела полупроводник-оксид, как показано на высокоразрешающем электронно-микроскопическом изображении поперечного среза атомной решетки кремния и диоксида кремния (рис. 4).

АСМ-изображение поверхности меры

На рис. 5, а представлено АСМ-изображение, полученное в режиме сбоя фазы колебаний кантилевера (фазовый контраст), поверхности кремния, содержащей области с высокой плотностью моноатомных ступеней (эшелоны ступеней) – широкие светлые линии, и области с низкой плотностью ступеней в виде тонких светлых линий, разделённых террасами шириной в несколько микрометров. Для калибровки был выбран участок (показан штриховой линией) с тремя моноатомными ступенями. На рис. 5, б показано АСМ-изображение топографии этого участка. Распределение точек скана по высотам показало идентичность расстояния между максимумами пиков, соответствующего разнице в уровнях террас. Погрешность измерения высоты моноатомных ступеней составила $0,04 \text{ нм}$ ($\sim 13\%$), что сравнимо с погрешностью измерения высоты атомно-силовым микроскопом (рис. 5, в). Прямое сравнение системы регулярных моноатомных ступеней (см. рис. 3) с системой ступеней, подготовленной в рамках предложенного стандарта, позволяет сделать вывод об уменьшении погрешности определения высоты ступени в ~ 3 раза.

Заключение

Представлена разработка высокоточного тест-объекта для измерения линейных размеров в диапазоне $0,1\text{--}100 \text{ нм}$ для обеспечения единства измерений в нанотехнологиях. Предельно высокая точность изготовления тест-

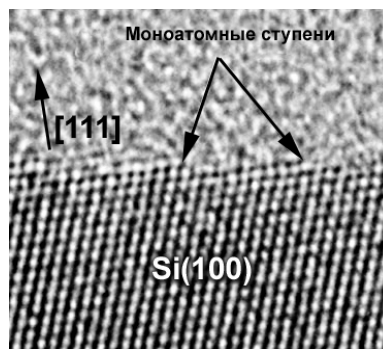


Рис. 4. Высокорастворяющее электронно-микроскопическое изображение границы раздела кремний-оксид кремния. Темные точки соответствуют рядам атомов (изображение предоставлено Л. И. Феединой и А. К. Гутаковским)

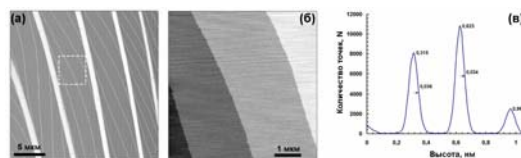


Рис. 5. АСМ-изображение (фазовый контраст) поверхности кремния (111), содержащей эшелоны близко расположенных моноатомных ступеней (широкие светлые полосы) и моноатомные ступени (тонкие светлые линии), разделенные террасами шириной в несколько микрометров (а); топографическое АСМ-изображение участка поверхности подложки кремния (111) со ступенями из области штрихованного квадрата (б), статистика распределения точек на этом изображении по высоте (в)

объектов обеспечена за счет привязки значений их параметров к термодинамически равновесным (при заданных температуре и давлении) параметрам кристаллической решетки совершенного кристалла, таким как высота моноатомных ступеней на атомно-гладкой поверхности, сертифицированных как нанометрический элемент («квант») рельефа поверхности. В основе «кванта» рельефа атомно-чистой поверхности кремния лежит высота моноатомной ступени, соответствующая межплоскостному расстоянию $0,31 \text{ нм}$ для $\{111\}$ плоскости кремния. Предлагаемый тест-объект для обеспечения единства измерений в нанометровом диапазоне получен на основе управляемой морфологической перестройки атомно-чистой гладкой поверхности совершенного кристалла.

Список литературы

1. *Нанотехнологии* в полупроводниковой электронике / Под ред. А. Л. Асеева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.

2. *Pchelyakov O. P., Toropov O. P., Popov V. P., Latyshev A. V., Litvin L. V., Nastaushev Yu. V., Aseev A. L.* Nanotechnologies in semiconductor electronics // SPIE. 2002. Vol. 4900. P. 247–256.
3. *Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch.* Atomic force microscope // Phys. Rev. Lett. 56. 1986. Vol. 9. P. 930–933.
4. *Дунаевский М. С., Красильник З. Ф., Лобанов Д. Н., Новиков А. В., Тутков А. Н., Laiho R.* Визуализация заросших наноструктур GeSi в кремниевых структурах методом атомно-силовой микроскопии сканов // ФТП. 2003. Т. 67 (6). С. 692–699.
5. *Anand S. et al.* Doping landscapes in the nanometer range by scanning capacitance microscopy // Applied Surface Science. 1999. Vol. 144–145. P. 525–529.
6. *Tomiyae 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. *Decossas S., Mazen F., Souift T., Bremond G.* Electric measurements by AFM on silicon nanocrystals // Physica. E. 2003. Vol. 17.
8. *Sheglov D., Kosolobov S., Rodyakina E., Latyshev A.* Application of atomic force microscopy in epitaxial nanotechnology // Microscopy and analysis. 2005. Sept. P. 9–11.
9. *Тодуа П. А.* Метрология в нанотехнологии // Рос. нанотехнологии. 2007. Т. 2, № 1–2. С. 61–69.
10. *Насимов Д. А., Латышев А. В.* Создание полупроводниковых наноструктур высокой плотности методом электронной литографии // Восьмая Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2007». Екатеринбург, 2007.
11. *Peachey N. M., Eckhardt C. J.* Structural studies of ordered monolayers using atomic force microscopy // Micron. 1994. Vol. 25. Is. 3. P. 271–292.
12. *Tsai V. W., Vorburget T. V., Dizson R., Fu J., Konig R., Silver R., Williams E. D.* Characterization and metrology for ULSI technology D. G. Seiler et al. // AIP PRESS. 1998. P. 839–842.
13. *Dixson R., Oji N. G., Fu J., Tsai V. W., Williams E. D., Kacker R., Vorburget T. V., Edwards H., Cook D., West P., Nyffenegger R.* Silicon single atom steps as AFM height standards // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4344. P. 157–168.
14. *Fu J., Tsai V. W., Konig R., Dixson R., Vorburget T. V.* Algorithms for calculating single-atom step heights // Nanotechnology. 1999. Vol. 10. P. 428–434.
15. *Wolf H. F.* Silicon semiconductor data. Oxford; N. Y., 1965.
16. *Латышев А. В., Асеев А. Л., Красильников А. Б., Стенин С. И., Ржанов А. В.* Поведение моноатомных ступеней на поверхности кремния (111) при сублимации в условиях нагрева электрическим током // Докл. РАН. 1988. Т. 300. С. 84–88.
17. *Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., Stenin S. I.* Transformation on clean Si(111) stepped surface during sublimation // Surface Science. 1989. Vol. 213. P. 157–169.
18. *Латышев А. В., Асеев А. Л.* Моноатомные ступени на поверхности кремния // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 10. С. 1117–1127.
19. *Stoyanov S.* Current Induced Conversion between 2×1 and 1×2 Domains at Vicinal (001) Si Surfaces – Can it be Explained by Electromigration of Si Adatoms? // Jpn. J. Appl. Phys. 1990. Vol. 29. P. L659–L662.
20. *Natori A., Fujimura H., Yasunaga H.* Step Structure Transformation of Si(001) Surface Induced by Current // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. Vol. 31. P. 1164–1169.
21. *Khare S. V., Einstein T. L., Bartelt N. C.* Dynamics of step doubling simulations for a simple model and comparison with experiment // Surface Science. 1995. Vol. 339. P. 353–362.
22. *Kandel D., Weeks J. D.* Step Motion, Patterns, and Kinetic Instabilities on Crystal Surfaces // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 72. P. 1678–1681.
23. *Latyshev A. V., Litvin L. V., Aseev A. L.* Peculiarities of step bunching on Si(001) surface induced by DC heating // Applied Surface Science. 1998. Vol. 130–132. P. 139–145.
24. *Latyshev A. V., Minoda H., Tanishiro Y., Yagi K.* Electromigration and gold-induced step bunching on the Si(111) surface // Surface Science. 1998. Vol. 401. P. 22–33.
25. *Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., Stenin S. I.* Reflection electron microscopy study of structural transformation on a clean silicon surface in sublimation, phase transition and homoepitaxy // Surface Science. 1990 Vol. 227. P. 24–34.
26. *Щеглов Д. В., Косолюбов С. С., Родякина Е. Е., Латышев А. В.* Способ изготовления ступенчатого высотного калибровочного стандарта для профилометрии и сканирующей зондовой микроскопии: Заявка на патент RU 2008125966/28.
27. *Suzuki M., Aoyama S., Fututsuki T., Kelly A. J., Osada T., Nakano A., Sakasibara Y., Suzuki Y., Takami H., Takenobu I., Yasutake M.* Standardized procedure for calibrating height scales in atomic force microscopy on the order of 1 nm // J. Vac. Sci. Technol. A. 1996. Vol. 14 (3). P. 1128–1232.

28. Lee D., Blakely J. Formation and stability of large step-free areas on Si(001) and Si(111) // *Surface Science*. 2000. Vol. 445. P. 32–40.
29. Косолюбов С. С., Латышев А. В. Атомные ступени на поверхности кремния (111) при субмонослойной адсорбции золота // *Изв. РАН. Серия физическая*. 2008. Т. 72. С. 193–197.
30. Косолюбов С. С. и др. Нестабильность распределения атомных ступеней на Si(111) при субмонослойных покрытиях золотом при высоких температурах // *Письма в ЖЭТФ*. 2005. Т. 81 (3). С. 149–153.
31. Kosolobov S. S., Aseev A. L., Latyshev A. V. In Situ Study of Interaction of Oxygen with the Si(111) Surface by Ultrahigh-Vacuum Reflection Electron Microscopy // *Semiconductors*. 2001. Vol. 35. P. 1038–1039.
32. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. Application of Ultrahigh Vacuum Reflection Electron Microscopy for the Study of Clean Silicon Surfaces In Sublimation, Epitaxy, and Phase Transitions // *Microscopy Research and Technique*. 1992. Vol. 20. P. 341–351.
33. Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., Sokolov L. V., Stenin S. I. Reflection electron microscopy study of clean Si(111) surface reconstruction during the (7×7)–(1×1) phase transition // *Surface Science*. 1991. Vol. 254. P. 90–96.
34. Latyshev A. V., Aseev A. L. Monatomic steps on silicon surfaces // *Physics-Uspokhi*. 1998. Vol. 41 (10). P. 1015–1023.
35. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. Self-diffusion on Si(111) surfaces // *Phys. Rev. B*. 1996. Vol. 54. P. 2586–2589.
36. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. UHV REM study of the anti-band structure on the vicinal Si(111) surface under heating by direct electron current // *Surface Science*. 1994. Vol. 311. P. 395–403.
37. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. UHV reflection electron microscopy investigation of the monoatomic steps on the silicon (111) surface at homo and heteroepitaxial growth // *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 306. P. 205–213.
38. Iwatsuki M., Kitamura S., Sato T., Sueyoshi T. Observation of surface reconstruction and nano-fabrication on silicon under high temperature using a UHV-STM // *Applied Surface Science*. 1992. Vol. 60/61. P. 580–586.
39. Yang Y.-N., Williams E. D. High atom density in 1x1 phase on Si(111) // *Phys. Rev. Lett*. 1994. Vol. 72. P. 1862–1865.
40. Sheglov D. V. et al. Peculiarities of nanooxidation on flat surface // *Phys. Low-Dim. Struct*. 2002. Vol. 5–6. P. 239–246.
41. Kosolobov S. S., Nasimov D. A., Sheglov D. V., Rodyakina E. E., Latyshev A. V. Atomic Force Microscopy of Silicon Stepped Surface // *Phys. Low-Dim. Struct*. 2002. Vol. 5–6. P. 231–238.
42. Watanabe H., Baba T., Ichikawa M. Reflection high-energy electron diffraction intensity oscillation during layer-by-layer oxidation of Si(001) surfaces // *Appl. Phys. Lett*. 1999. Vol. 74. P. 3284–3286.
43. Hasunuma R., Nishioka Y., Ando A., Miki K. Interface states of SiO₂/Si(111) observed by an atomic force microscope // *Surface Science*. 1999. Vol. 443. P. L1055–L1056.
44. Ando A., Sakamoto K., Miki K., Matsumoto K., Sakamoto T. Characterization of ultrathin SiO_x layers formed on a spatially controlled atomic-step-free Si 001 surface // *Applied Surface Science*. 1999. Vol. 144–145. P. 589–595.
45. Nasimov D. A. et al. AFM and STM Studies of Quenched Si(111) Surface // *Phys. Low-Dim. Struct*. 2003. Vol. 3–4. P. 157–166.
46. Alperovich V. L., Tereshchenko O. E., Rudaya N. S., Sheglov D. V., Latyshev A. V., Terekhov A. S. Surface passivation and morphology of GaAs(1 0 0) treated in HCl-isopropanol solution // *Applied Surface Science*. 2004. Vol. 235. P. 249–256.

Материал поступил в редколлегию 19.01.2009

D. A. Nasimov, D. V. Sheglov, A. V. Latyshev

ATOMIC STEPS ON A SILICON SURFACE AS IS TEST-OBJECT IN ATOMIC FORCE MICROSCOPY

To ensure uniformity of measurements in nanotechnology test-object have been developed. It provide precise calibration of z-coordinates of the atomic force microscope in the sub-and nanometer bands with an accuracy of 0.05 nm on the basis of a system of atomic steps, one interplanar distance in height, at the vicinal surface of silicon. Extremely high precision of the test-object is provided by comparing its values with the atomic lattice parameter of the perfect crystal.

Keywords: atomic-force microscopy, metrology, certification, atomic steps, surface.