

Визуализация зарощенных наностроек GeSi в кремниевых структурах методом атомно-силовой микроскопии на сколах

© М.С. Дунаевский, З.Ф. Красильник*, Д.Н. Лобанов*, А.В. Новиков*, А.Н. Титков, R. Laiho[†]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603600 Нижний Новгород, Россия

[†] Wihury laboratory, University of Turku, Turku, Finland

(Получена 21 ноября 2002 г. Принята к печати 3 декабря 2002 г.)

Методом атомно-силовой микроскопии в атмосферных условиях исследовались топографические характеристики сколов структур Ge/Si, содержащих зарощенные слои наностроек GeSi. Показано, что релаксация упругих напряжений островков и прилегающих к ним областей матрицы Si на свободной поверхности скола приводит к проявлению локальных топографических особенностей на сколах структур. Обнаружено, что островки могут проявляться на поверхности скола в виде двух типов топографических особенностей: в виде бугорков, когда плоскость скола непосредственно пересекает островок, упруго сжатый в матрице Si, или в виде ямки, когда плоскость скола пересекает прилегающую к островку область Si-матрицы, подвергнутую растяжению. Выполненные исследования продемонстрировали возможности нового метода изучения зарощенных наностроек в целях их обнаружения, оценки размеров, распределений по размерам, эффектов взаимодействия в многослойных структурах, а также выявления связанных с ними деформаций.

1. Введение

Полупроводниковые слои со встроенными самоорганизующимися нанометровыми островками другого полупроводникового материала, получившими название квантовые точки (КТ), являются важными структурными элементами перспективных приборов полупроводниковой электроники [1]. Среди многих задач, возникающих при формировании и характеристике полупроводниковых структур с встроенными слоями КТ, весьма важной является непосредственная визуализация зарощенных КТ. Решение этой проблемы нужно для определения размеров и форм КТ, распределений по размерам и корреляции во взаимном положении в одном слое, а также в близко лежащих слоях в многослойных структурах. Корреляция во взаимном положении КТ обуславливается наличием упругих деформаций вокруг них из-за несовпадения постоянных решеток материалов КТ и окружающей матрицы.

В настоящее время визуализация зарощенных КТ обычно осуществляется методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) при наблюдении в двух геометриях: планарной и поперечной. Метод ТЕМ является надежным, высоко чувствительным и информативным методом изучения зарощенных КТ [1]. Однако его применение заметно сдерживается сложностью и большой длительностью процедуры приготовления необходимых для ТЕМ-исследований тонких образцов толщиной в сотни и даже десятки нанометров. При этом размеры получаемых участков нужной толщины оказываются малыми, что дополнительно затрудняет проведение подробных, с большой статистикой, исследований свойств КТ.

Современные методы сканирующей зондовой микроскопии — сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) [2] и атомно-силовая микроскопия

(AFM) [3] — открывают новые интересные возможности исследования зарощенных КТ путем исследования сколов структур, пересекающих слои с КТ. При этом выявляются КТ, выходящие на поверхность скола, т.е. наблюдение КТ ведется „в профиль“, вдоль плоскости их выращивания. Обнаружение КТ на поверхности скола методом СТМ основано на отличии электронных свойств КТ от свойств окружающей матрицы, а также на выявлении локальных особенностей в топографии гладкого скола, возникающих из-за релаксации упругих напряжений КТ. Метод AFM чувствителен преимущественно к изменениям в топографических характеристиках (в дальнейшем — топографии) сколов, связанным с присутствием КТ.

Известны несколько СТМ-исследований структур с зарощенными КТ [4–7]. Все они были посвящены изучению одной системы — КТ InGaAs в матрице GaAs. Размеры КТ InGaAs характеризуются средними величинами диаметров оснований около 15 нм и высот в 3–4 нм. Постоянная решетки InAs на 7% больше, чем GaAs, что вызывает появление упругих деформаций сжатия КТ InAs и растяжения примыкающих к КТ областей GaAs. При таких параметрах системы СТМ-исследования сколов структур обнаружили КТ InAs на поверхности сколов в виде бугорков высотой до 0.3 нм. В упомянутых работах была получена подробная информация о линейных размерах, плотности и корреляции в распределении КТ InAs. Чувствительность метода СТМ к электронным свойствам КТ позволила также получить уникальные данные о распределении плотности электронных состояний в объеме индивидуальных КТ InAs [5].

При всей своей успешности СТМ-исследования зарощенных КТ являются очень сложными и вряд ли могут иметь широкое применение. Среди объективных трудностей можно отметить необходимость проведения

STM-исследований в сверхвысоком вакууме для избежания окисления поверхностей сколов, которые также надо делать в вакууме, сложность приготовления зондирующих игл, спонтанную модификацию окончаний игл в ходе сканирования поверхности, а также общую сложность метода STM.

В этой связи представляется, что гораздо более простым и оперативным для изучения выращенных КТ могло бы стать применение метода AFM, который в атмосферных условиях позволяет изучать топографии поверхностей с разрешением не хуже 0.1 нм по высоте и до нескольких нм в плоскости. При этом зондирующие иглы необходимой остроты могут быть получены в готовом виде от нескольких коммерческих фирм. Кроме того, окисление поверхностей не является препятствием для проведения AFM-исследований. Тем не менее авторам работы ничего не известно о существовании AFM-исследований выращенных КТ. Сдерживающим фактором может являться появление шероховатости изначально атомарно-гладких поверхностей сколов при их окислении в комнатных условиях, что может мешать наблюдению на поверхности отдельно расположенных нанобугорков, связанных с КТ. Однако известно, что шероховатость окисленных поверхностей сколов обычно не мешает наблюдать монокатомные ступеньки, высота которых для многих полупроводников составляет примерно 0.3 нм. Как представляется, более существенной помехой может являться общая загрязненность поверхностей в атмосферных условиях, к уменьшению которой требуется применять возможные меры.

Настоящая работа была направлена на выявление возможностей метода AFM в изучении выращенных КТ. В качестве объектов исследования были выбраны вызывающие сейчас повышенный интерес самоорганизующиеся наноструктуры в структуре GeSi/Si(001) (в дальнейшем — островки GeSi), встроенные в кремниевую матрицу [8–11]. Рассогласование постоянных решеток Ge и Si составляет 4.2%, что заметно меньше рассогласования кристаллических решеток InAs и GaAs. Размер островков GeSi существенно зависит от температуры роста и при температурах осаждения Ge $T_g \gtrsim 600^\circ\text{C}$ наноструктуры GeSi обладают на порядок большими линейными размерами по сравнению с КТ InAs [11]. Поэтому, учитывая, что величины деформаций вокруг КТ зависят как от разности постоянных решеток, так и от размеров КТ [12,13], можно ожидать, что более крупные островки GeSi также будут заметно выступать над плоскостью скола.

Проведенные в атмосферных условиях AFM-исследования топографии сколов кремниевых структур с выращенными островками GeSi действительно позволили обнаружить проявление островков в морфологии сколов. Оказалось, что наряду с островками, выходящими на плоскость скола и проявляющимися в виде локальных бугорков, могут также проявляться и островки, не выходящие на поверхность непосредственно, но лежащие близко от нее и вызывающие локальное понижение

поверхности над ними. Причиной этого является деформация наряду с островками GeSi также и Si-матрицы в окрестности островков. Деформация областей Si имеет характер растяжения и проявляется в виде локальных понижений поверхности скола над близко лежащими к ней островками. Исследования сколов многослойных структур Ge/Si позволили наблюдать характерные эффекты вертикального выстраивания островков GeSi в соседних слоях. Эти исследования также позволили охарактеризовать механические напряжения в слоях Si, разделяющих островки GeSi.

2. Эксперимент

Структуры с островками GeSi были выращены на подложках Si(001) методом молекулярно-пучковой эпитаксии при температурах осаждения Ge $T_g = 600$ и 700°C . Кремний и германий испарялись с помощью электронно-лучевых испарителей. Скорость роста составляла 0.15 нм/с для Ge. Были выращены одно- и многослойные (5 слоев) структуры с островками GeSi. Эквивалентная толщина осажденного Ge составляла 7–9 монослоев (МС, $1 \text{ МС} \approx 0.14 \text{ нм}$). В качестве тестовой структуры была выращена структура, состоящая из 5 периодов квантовых ям $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ толщиной 9 нм, разделенных слоями Si толщиной 30 нм.

Атомно-силовые исследования топографии сколов полученных структур проводились на приборе P-47 SEMI (производитель — фирма NT-MDT) в полуконтактной (*tapping*) моде. В качестве зондов применялись кремниевые кантилеверы с радиусом закругления вершин зондирующих пирамид 15–20 нм (SCNC12, NT-MDT), а также висеры, отличительной особенностью которых является завершение зондирующей пирамиды вытянутым узким и более острым конусом из материала на основе углерода (NCC05, NT-MDT). Применение висеров заметно улучшало контраст изображений островков GeSi, особенно в случае многослойных структур при уменьшении расстояний между слоями с островками GeSi. Сколы структур проводились вдоль кристаллических направлений [111] и [110]. Для получения атомарно-гладких поверхностей сколов, свободных от ступенчатых образований, структуры до скальвания утоньшались полировкой со стороны подложки до толщины менее 100 мкм.

3. Результаты наблюдений и их обсуждение

Проведенные AFM-исследования поверхностей Si(001) с осажденными слоями Ge свидетельствуют, как показано на рис. 1, а, что при температуре роста 700°C и эффективной толщине осажденного Ge $d_{\text{Ge}} = 7\text{--}9 \text{ МС}$ на поверхности структур формируются островки GeSi, имеющие преимущественно куполообразную форму (так называемые островки „dome“). Латеральный размер и высота незарощенных островков, определенных из

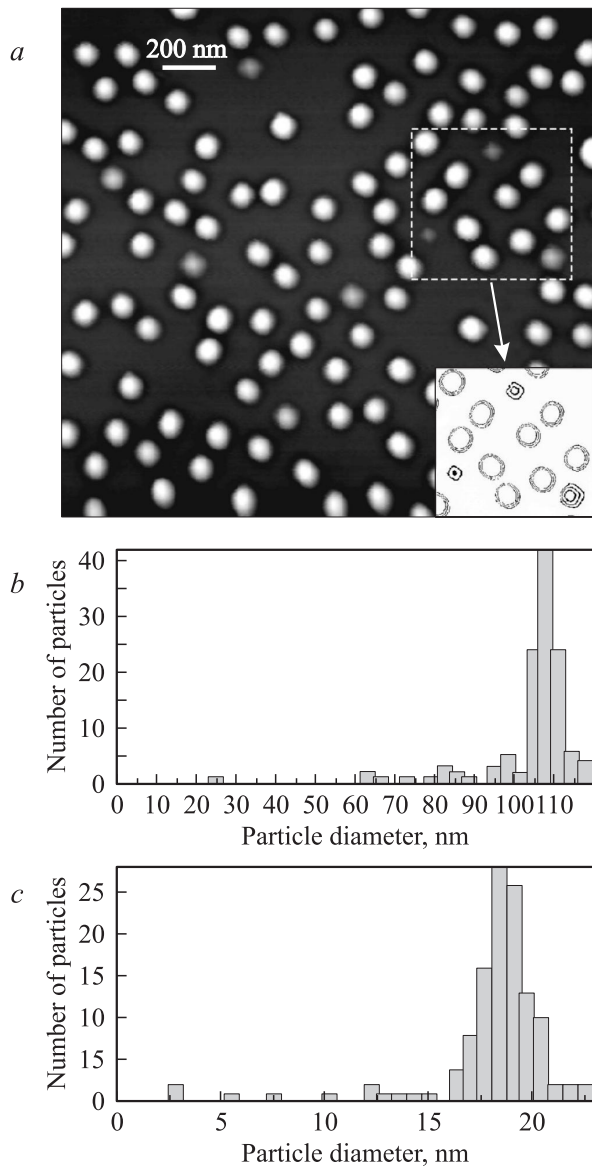


Рис. 1. *a* — AFM-изображение образца с незарощенными самоорганизующимися островками GeSi, выращенными при $T_g = 700^\circ\text{C}$; *b, c* — гистограммы распределения латерального размера и высоты островков, полученные в результате обработки изображения *a*.

статистического анализа AFM-изображений, составляют 100–110 и 15–20 нм соответственно (см. распределения, приведенные на рис. 1, *b*). Данные размеры исследуемых наноструктур на порядок превосходят типичные размеры КТ InAs, что связано с исходно меньшим расогласованием кристаллических решеток в гетеропаре Ge/Si по сравнению с гетеропарой InAs/GaAs. Кроме того, при температурах осаждения Ge $T_g \geq 600^\circ\text{C}$ в островках происходит образование сплава GeSi с содержанием Si до 60 ат% [11], что приводит к дальнейшему уменьшению расогласования кристаллических решеток островка GeSi и Si-матрицы до уровня 1–2%.

На рис. 2 показаны AFM-изображения сколов однослойных структур с зарощенными островками GeSi, выращенными при 700°C и отличающихся только толщиной покровного слоя Si. На изображениях обеих структур наблюдается присутствие на поверхности сколов локальных приподнятий (бугорков) и понижений (ямок), выстроившихся в линию параллельно ростовой поверхности структур и отстоящих от нее на величину толщины покровного слоя Si для каждой из структур. AFM-изображения на рис. 2, *b, c*, которые были получены при большем увеличении, позволяют рассмотреть, что бугорки и ямки вытянуты вдоль линии выстраивания (150–200 нм) лишь несколько больше среднего значения диаметра основания незарощенных островков GeSi (110 нм). Эти наблюдения позволяют связать появление данных особенностей в сколах с релаксацией упругих напряжений в слое самоорганизующихся островков GeSi и их окрестностях. Детальное рассмотрение AFM-изображений и профилей, проведенных через выявленные особенности, показывает, что они имеют сложную форму: бугорки окружены понижениями (рис. 2, *b*), а ямки, наоборот, возвышениями окружающей поверхности (рис. 2, *c*).

Предлагаемое объяснение происхождения обнаруженных особенностей на сколах структур с островками GeSi и их связи с релаксацией упругих деформаций островков GeSi и окружающей Si-матрицы схематически представлено на рис. 3. В случае, когда скол структуры прошел непосредственно через островок GeSi, релаксация упругих напряжений сжатия в объеме островка приводит к локальному его возвышению над изначально гладкой поверхностью скола. В то же время релаксация упругих деформаций растяжения в примыкающих к островку областях матрицы Si приводит к опусканию прилегающих к островку участков поверхности скола. В результате в случае прохождения скола непосредственно через островок GeSi релаксация упругих деформаций вызывает образование на поверхности скола локального повышения поверхности, окруженного с двух сторон локальными понижениями поверхности (рис. 3, *a* и 2, *b*).

В том случае, когда островок GeSi располагается вблизи от поверхности скола, релаксация упругих напряжений слоя Si, сжатого в окрестностях островка, приводит к появлению на поверхности скола особенности в виде ямки, окруженной компенсирующими деформацию локальными возвышениями поверхности (рис. 3, *b* и 2, *c*). Такие же возвышения в принципе должны следовать за понижениями уровня матрицы Si и в случае непосредственного выхода островка GeSi на поверхность. В настоящей работе они не обсуждаются, так как уверенно не детектировались. В качестве оценки максимального углубления островка GeSi относительно поверхности скола, когда он еще может быть замечен в топографии скола, можно, очевидно, принять значение 50–60 нм, соответствующее расстоянию спада деформации матрицы Si по мере удаления от островка GeSi [14].

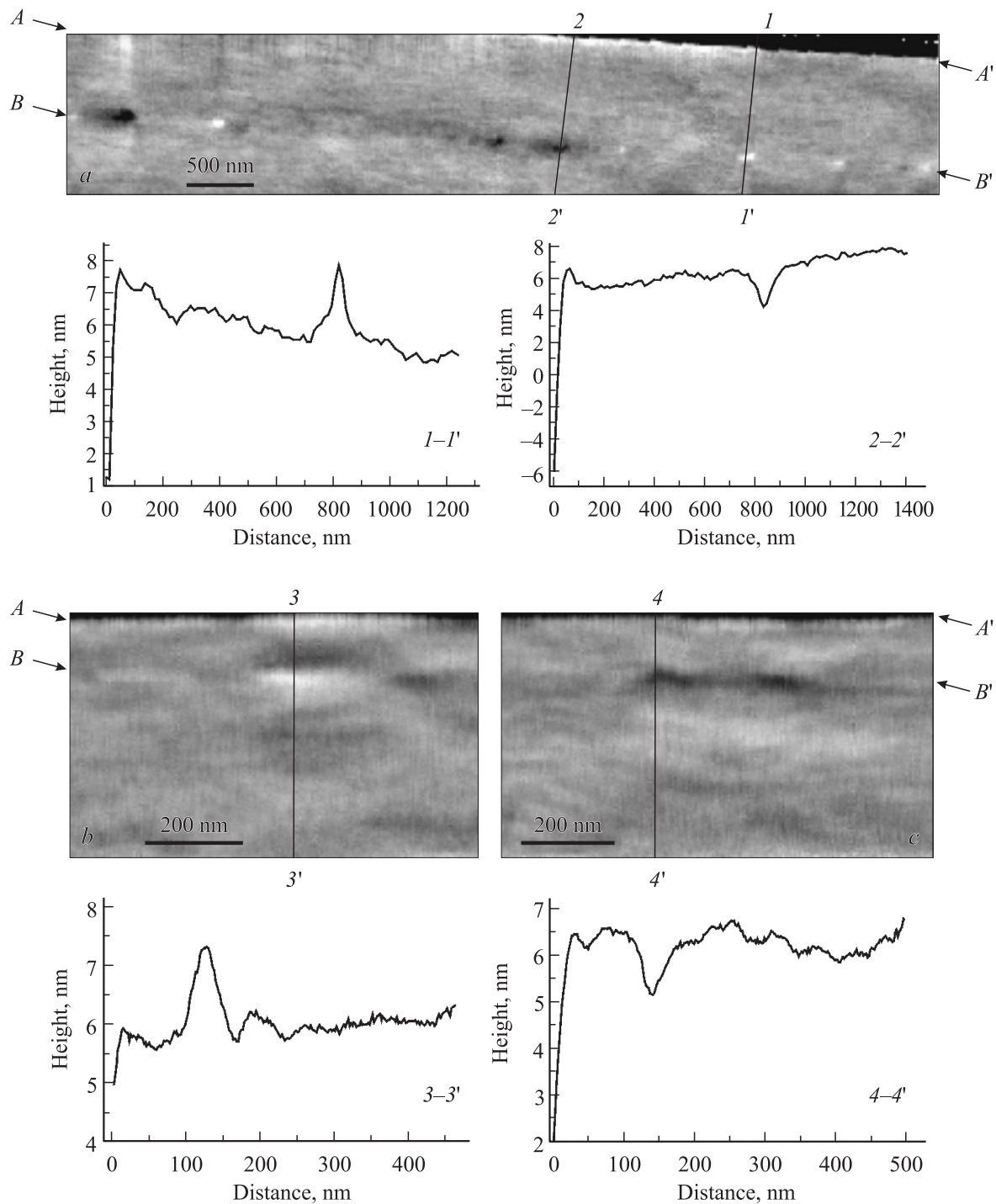


Рис. 2. AFM-изображения и топография сколов однослойных структур с островками GeSi, выращенными при 700°C и имеющих толщину покровного слоя Si 760 (a) и 110 нм (b, c).

Согласно предлагаемой модели образования особенностей на поверхности сколов, вызванных релаксацией упругих напряжений в островках GeSi и вокруг них, размер особенностей вдоль направления роста структуры должен быть связан с высотой зарощенных островков, а протяженность особенностей вдоль плоскости роста — с латеральным размером островков. Измерения выявляемых особенностей сколов в перспективе могут

позволить контролировать интересующие размеры зарощенных наностроек. Выполненные первые наблюдения показывают, что латеральные размеры особенностей несколько превосходят средние значения высот и диаметров незарощенных островков GeSi. Увеличение латерального размера островков при зарощивании наблюдалось ранее [15] и связано с изменением формы островка при зарощивании. Согласно модели из рабо-

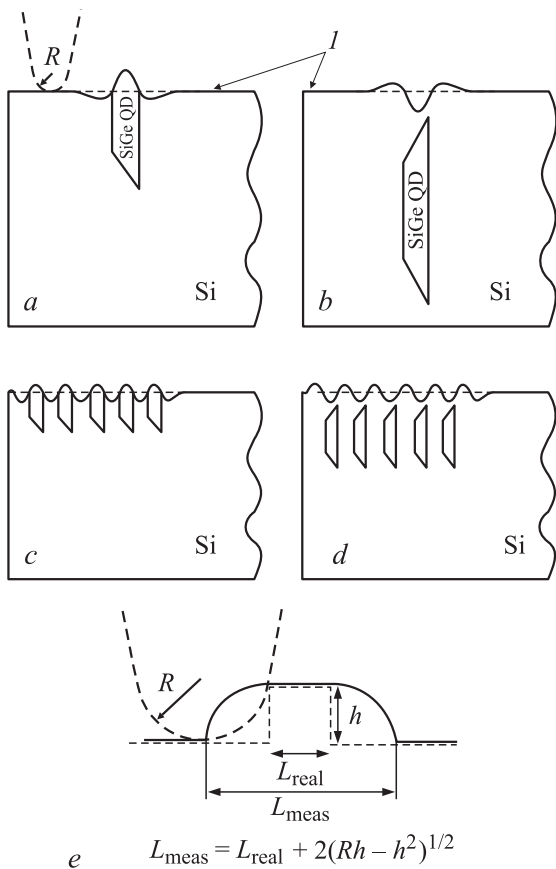


Рис. 3. Схематическое представление происхождения топографических особенностей на поверхности скола, связанных с релаксацией упругих деформаций в островках SiGe и Si-матрице: для однослойных (*a, b*) и многослойных (*c, d*) структур при прохождении скола через островки (*a, c*) или вблизи от них (*b, d*); *e* — оценка увеличения размеров топографических особенностей в плоскости скола за счет конечного размера иглы AFM-микроскопа.

ты [15] при высокотемпературном зарощивании высота островков уменьшается. Однако AFM-измерения сколов структур дают оценку 50–60 нм для высоты островков, что значительно больше средней высоты незарощенных островков (20 нм). Одной из естественных причин обнаруженного расхождения является конечный размер иглы AFM-микроскопа и связанное с этим увеличение размеров регистрируемых особенностей в плоскости скола. Этот вклад в уширение может быть оценен с помощью следующего из геометрии измерений выражения:

$$L_{\text{meas}} = L_{\text{real}} + 2(2Rh - h^2)^{1/2},$$

где L_{meas} — измеренное значение, L_{real} — истинное значение, R — радиус зондирующей пирамиды и h — высота особенности на сколе. В нашем случае $R = 20$ нм и $h = 1$ нм, откуда получается приборный вклад в уширение высоты островков около 15 нм, что недостаточно для объяснения обнаруженного расхождения. Возможно, что размер неровностей на сколах вдоль направления роста

может существенно превосходить высоту зарощенных островков за счет того, что вместе с островком приподнимается и часть Si-матрицы в окрестности островка. Представляется, что для выяснения причин сохраняющегося расхождения необходимо получить представление о точной форме рассматриваемых поверхностных особенностей. Такая информация может быть получена в дальнейшем при рассмотрении релаксации упругих деформаций на сколах структур с зарощенными наноструктурами, например методом анализа конечных элементов (FE analysis).

Теперь рассмотрим топографию сколов структур Ge/Si, содержащих несколько слоев островков GeSi. Первоначально для сравнения на рис. 4 приведено AFM-изображение тестовой многослойной структуры с квантовыми ямами $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$, не содержащей островки. Для этой структуры наблюдается локальный подъем поверхности скола в виде пяти гряд, расположенных параллельно плоскости роста. Количество гряд и период их следования совпадают с числом осажденных слоев GeSi и заданным периодом выращенной многослойной структуры. Эти наблюдения позволяют связать появление обнаруженных локальных возвышений поверхности с релаксацией упругих деформаций сжатия в слоях $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ в местах их выхода на поверхность скола. Обращает на себя внимание меньшая высота гряд, менее 0.5 нм, по сравнению с высотой особенностей для островков GeSi, что можно отнести за счет большего содержания Si в слоях $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$, т.е. меньшего рассогласования решеток слоев и Si-матрицы.

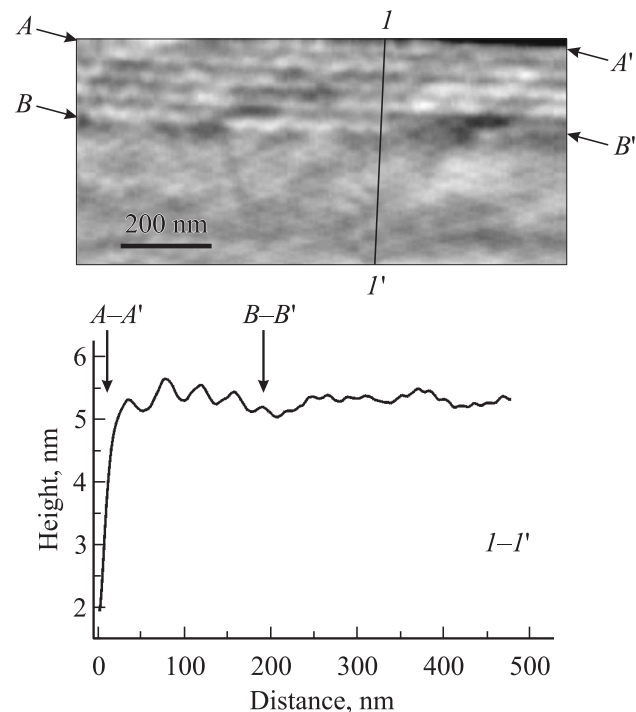


Рис. 4. AFM-изображение и топография скола многослойной структуры с квантовыми ямами $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$.

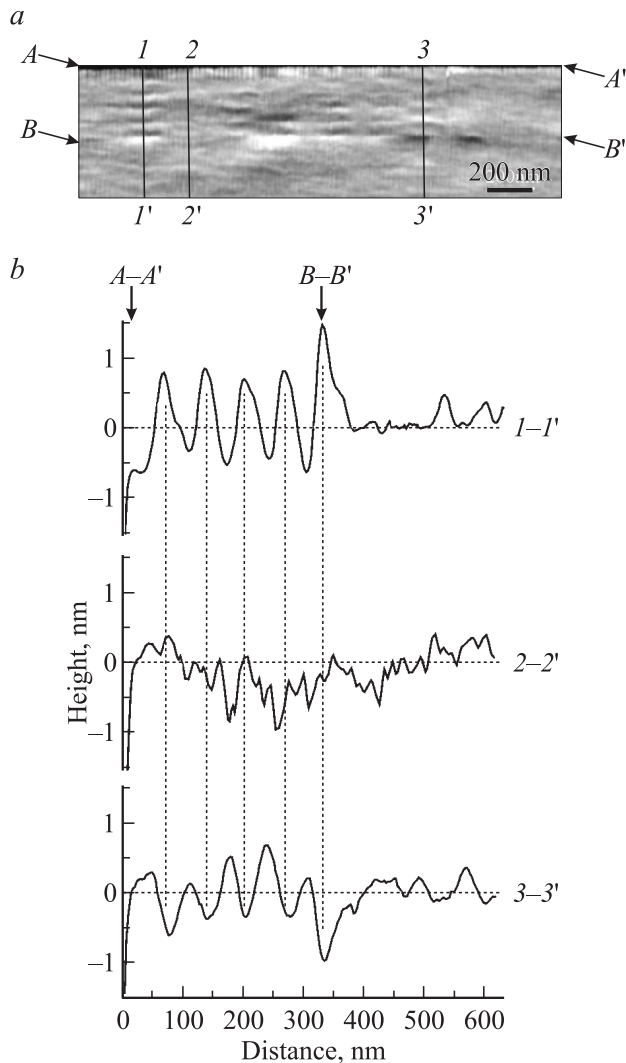


Рис. 5. *a* — AFM-изображение скола многослойной структуры с самоорганизующимися наностройками GeSi, выращенными при 700°C; *b* — топография сколов вдоль линий, показанных на AFM-изображении.

Для многослойных структур с островками топография поверхности сколов носит существенно более сложный характер по сравнению со структурами со слоями GeSi (рис. 5 и 6). На поверхности сколов структур с островками также наблюдается чередование локальных подъемов и понижений поверхности вдоль оси роста с периодом многослойной структуры, а число чередований совпадает с числом осажденных слоев Ge. Однако модуляция топографии поверхности не является сплошной и однородной вдоль плоскости роста и одновременно характеризуется существенно большим перепадом высот до 2 нм по сравнению с 0.5 нм для случая структуры без островков GeSi (см. рис. 4). Из анализа топографии сколов структур с островками можно сделать вывод о существовании двух типов модуляции топографии. Для первого типа модуляции в местах, соответствующих выходу слоев островков на поверхность скола, наблюда-

ется локальный подъем поверхности, а в местах выхода слоев Si, разделяющих слои с островками, — локальное понижение поверхности (рис. 5, сечение 1–1').

Особенности топографии второго типа имеют тот же период, что и особенности первого типа, но находятся с ними в противофазе: в местах выхода слоев островков на поверхность наблюдается понижение поверхности, а слоев Si — подъем (рис. 5, сечение 3–3'). Аналогично сколам однослойных структур с островками GeSi можно связать появления данных двух типов неровностей с релаксацией упругих деформаций в островках и Si-матрице. Первый тип особенностей реализуется при прохождении плоскости скола непосредственно через островки (рис. 3, *c*), а второй — в непосредственной близости к островкам (рис. 3, *d*). Наличие периодичности в топографии поверхности скола вдоль оси роста связано с корреляцией в вертикальном расположении островков в соседних слоях многослойных структур. Данная корреляция вызывается распространением полей упругих напряжений от островков в нижних слоях многослойной структуры в верхние слои и связанным с этим преимущественным зарождением островков в верхних слоях многослойной структуры над островками в нижележащих слоях [12]. Вертикальная корреляция в расположении наностроек GeSi в многослойных структурах наблюдалась при исследовании структур с островками методами ТЕМ [14,16].

Количественный анализ амплитуд особенностей на поверхности сколов, связанных с островками GeSi, показывает, что наибольшая амплитуда как подъема, так и понижения поверхности скола соответствует первому выращенному слою островков (рис. 5). Для островков верхних слоев многослойной структуры наблюдается уменьшение амплитуд особенностей, свидетельствующее о меньшей исходной величине упругих деформаций островков в этих слоях. Уменьшение деформации островков может происходить за счет передачи части напряжений разделяющим слоям Si. На сильную деформацию слоев Si между островками указывает существенное отклонение уровня их поверхности от общего уровня поверхности подложки Si. Еще одной причиной зависимости амплитуд особенностей от номера островков может быть различие в составе островков в различных слоях многослойной структуры. Недавно было показано [17], что содержание Si в островках GeSi увеличивается с увеличением номера слоя островков в структуре. Это связано с усилением диффузии Si в островки из упругонапряженных разделяющих слоев Si. Островки с большим содержанием Si имеют меньшее рассогласование кристаллической решетки с Si-матрицей, и, следовательно, особенности на поверхности скола, возникающие при их релаксации, должны иметь меньшую амплитуду.

Предлагается важным отметить существенную пространственную неоднородность деформации разделяющих слоев Si, которая для мест, различно расположенных относительно островков GeSi, может меняться как

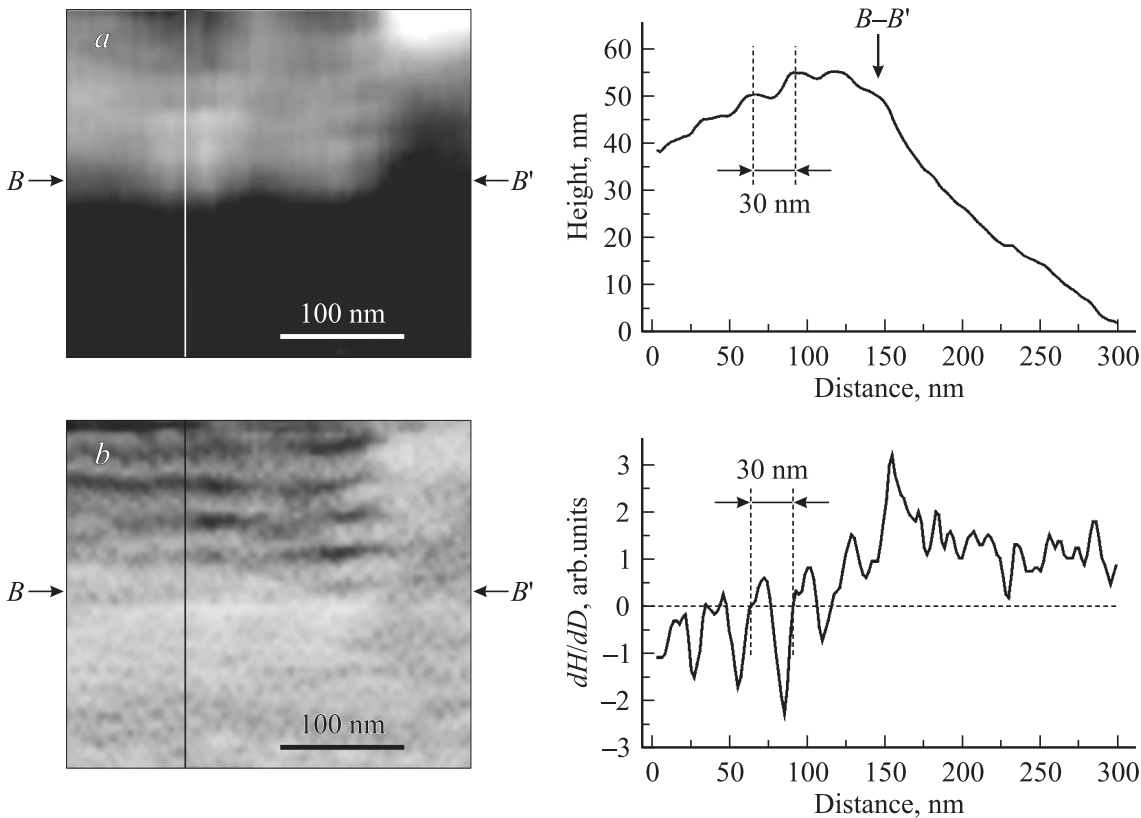


Рис. 6. *a* — AFM-изображение и поперечное сечение скола многослойной структуры с самоорганизующимися наноструктурами GeSi, выращенными при 600°C; *b* — изображение и поперечное сечение скола, полученное в результате дифференцирования AFM-изображения (*a*) по вертикальной координате D : dH/dD (H — height, D — distance).

по величине, так и по характеру, переходя от растяжения к сжатию. Критерием величины и характера начальных (до скола) деформаций разных участков барьерных слоев может служить смещение уровня их поверхности на сколе относительно уровня поверхности ненапряженной Si-подложки. Так, например, на рис. 5 профиль 2–2' показывает наличие общего растяжения слоев Si на участке поверхности скола даже без наблюдаемых островков GeSi.

На рис. 6 приведено AFM-изображение и топография скола многослойной структуры с островками, выращенной при более низкой температуре (600°C) и с расстоянием между слоями островков 30 нм. Незарощенные островки GeSi, выращенные при этой температуре, характеризовались меньшими средними размерами: диаметром основания 50–60 нм и высотой 10–12 нм. При получении AFM-изображения скола данной структуры использовался вискер. На рис. 6 видно, что и в случае этой существенно более мелкой структуры островки GeSi и эффект их вертикального выстраивания были уверенно зарегистрированы. Удобной возможностью увеличение контраста особенностей, связанных с островками, является дифференцирование AFM-изображений по вертикальной координате, результат которого приведен на рис. 6, *b*.

4. Заключение

На примере структур с самоорганизующимися островками GeSi/Si (001) показана новая возможность выявления и изучения зарощенных наноструктур в кристаллических полупроводниковых структурах при исследовании топографии их сколов методом атомно-силовой микроскопии, обладающей высоким пространственным разрешением. Механизм проявления наноструктур в топографии первоначально гладких поверхностей скола связан с релаксацией упругих деформаций наноструктур и прилегающих к ним областей матрицы на свободной поверхности скола. В работе подробно рассмотрены основные типы топографических особенностей, соответствующие проявлению наноструктур как в случае одиночных слоев, так и многослойных структур с наноструктурами.

Поскольку проявление наноструктур в топографии сколов обусловлено релаксацией связанных с ними упругих деформаций, анализ формы и размеров соответствующих топографических особенностей сколов может быть использован для характеристики напряжений в структурах с наноструктурами. Развитие методов такого анализа представляется весьма актуальным.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 00-02-16948, № 02-02-16792), INTAS (№ NANO-0444) и программ Министерства промышленности, науки и технологий РФ.

Список литературы

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. *Quantum Dot Heterostructures* (N.Y., 1998).
- [2] *Scanning Tunneling Microscopy I: General Principles and Applications to Clean and Adsorbate-Covered Surfaces*, Springer Ser. Surf. Sci. 20, ed. by H.-J. Güntherodt, R. Wiesendanger (Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992).
- [3] *Scanning Tunneling Microscopy II: Further Applications and Related Scanning Techniques*, Springer Ser. Surf. Sci. 28, ed. H.-J. Güntherodt, R. Wiesendanger (Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992).
- [4] W. Wu, J.R. Tucher, G.S. Solomon, J.S. Harris. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1083 (1997).
- [5] B. Legrand, B. Grandidier, J.P. Nys, D. Stivenard, J.M. Gerard, V. Thierry-Mieg. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 96 (1998).
- [6] H. Eisele, O. Flebbe, T. Kalka, M. Dahne-Prietsch. *Surf. Interface Anal.*, **27**, 537 (1999).
- [7] B. Legrand, J.P. Nys, B. Grandidier, D. Stivenard, A. Lemaitre, J.M. Gerard, V. Thierry-Mieg. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2608 (1999).
- [8] G. Abstreiter, P. Schittenhelm, C. Engel, E. Silveira, A. Zrenner, D. Meertens, W. Jager. *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 1521 (1996).
- [9] Н.В. Востоков, С.А. Гусев, И.В. Долгов, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, Л.Д. Молдавская, А.В. Новиков, В.В. Постников, Д.О. Филатов. *ФТП*, **34**, 8 (2000).
- [10] A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, Yu.Yu. Proskuryakov, A.I. Nikiforov, O.P. Pchelyakov, S.A. Teys, A.K. Gutakovskii. *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1413 (1999).
- [11] Z.F. Krasil'nik, P. Lytvin, D.N. Lobanov, N. Mestres, A.V. Novikov, J. Pascual, M.Ya. Valakh, V.A. Yukhymchuk. *Nanotechnology*, **13**, 81 (2002).
- [12] J. Tersoff, C. Teichert, M.G. Lagally. *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 1675 (1996).
- [13] A.A. Maradudin, R.F. Wallis. *Surf. Sci.*, **91**, 423 (1980).
- [14] O. Kienzle, F. Ernst, M. Rühle, O.G. Schmidt, K. Eberl. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 269 (1999).
- [15] P. Sutter, E. Matveeva, J.S. Sullivan, M.G. Lagally. *Thin Sol. Films*, **336**, 262 (1998).
- [16] C.J. Huang, D.Z. Li, B.W. Cheng, J.Z. Yu, Q.M. Wang. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2852 (2000).
- [17] O.G. Schmidt, U. Denker, S. Christiansen, F. Ernst. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2614 (2002).

Редактор Т.А. Полянская

Visualization of buried nano-islands of GeSi in silicon structures by a method of atomic-force microscopy on crystal cleavages

M.S. Dunaevsky, Z.F. Krasilnik*, D.N. Lobanov*, A.V. Novikov*, A.N. Titkov, R. Laiho⁺

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences
603600 Nizhny Novgorod, Russia

⁺ Wihury Laboratory,
University of Turku,
Turku, Finland