

# Формирование цепочек атомов Sr на сингулярной и ступенчатой поверхностях Si(111)

© Р.А. Жачук<sup>1,2</sup>, С.А. Тийс<sup>1</sup>, Б.З. Ольшанецкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> CICECO, University of Aveiro, Campus Santiago, Aveiro, Portugal

E-mail: olshan@isp.nsc.ru

(Поступила в Редакцию 18 марта 2010 г.  
В окончательной редакции 7 мая 2010 г.)

Методом сканирующей туннельной микроскопии исследованы поверхностные структуры  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$ , формирующиеся на грани Si(111) при адсорбции субмонослойного количества Sr. Полученные экспериментальные данные согласуются с моделями реконструкций поверхности, предложенными ранее для структур, индуцированных адсорбцией атомов двухвалентных металлов. Важным элементом этих структур являются цепочки атомов Sr в направлениях  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ . На грани Si(111) формируются три типа доменов поверхностных структур, соответствующих вращательной симметрии  $C_3$  этой поверхности. Понижение симметрии подложки до  $C_1$  путем использования ступенчатой поверхности Si(7710) позволяет сформировать цепочки атомов Sr, ориентированные относительно подложки одинаковым образом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 10-02-00199 и 08-02-01101) и FCT Португалии (N SFRH/BPD/38291/2007).

## 1. Введение

Изучение реконструкции поверхности, индуцированной адсорбцией инородных атомов на поверхности кремния, является интересной и важной областью исследований, так как структура поверхности непосредственно влияет на диффузию адатомов, формирование наноструктур и рост тонких пленок [1]. В этой работе мы исследовали влияние адсорбции субмонослойного количества Sr на структуру поверхности Si(111) с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). В частности, была исследована возможность формирования индуцированных атомами Sr одномерных (1D) структур. Интерес к подобным структурам вызван специфическими физическими явлениями, наблюдаемыми в них, такими как нестабильность Пайерлса [2,3] и переключение между одно- и двумерной проводимостью [4].

Формирование 1D-структур на поверхности Si(111) при адсорбции атомов металлов исследовали ранее. Так, было найдено, что адсорбция Ag на поверхности Si(111) приводит к формированию 1D-структуры  $3 \times 1$  [5]. Адсорбция же Ba приводит к формированию ряда 1D-поверхностных структур:  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$  [6].

В последующих работах было обнаружено, что аналогично Ag и другие одновалентные атомы металлов, такие как Li, Na, K, Rb, Cs, также способны индуцировать формирование структуры  $3 \times 1$ . Более того, аналогично Ba многие двухвалентные атомы металлов, такие как Mg, Ca, Sm, Eu, Yb, также индуцируют поверхностные структуры  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$  и  $9 \times 2$  на поверхности Si(111). Таким образом, конфигурация внешних электронных оболочек адсорбируемых атомов оказалась жестко связана с индуцируемой ими реконструкцией поверхности Si(111) [7,8].

Однако до проведения представленной далее работы в литературе отсутствовали данные СТМ по влиянию адсорбции Sr на структуру поверхности Si(111), а имевшиеся сведения, полученные с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ) [9], не могут быть интерпретированы однозначно [10]. Поэтому целью настоящей работы было исследование возможности формирования структур  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$  и, таким образом, выяснение справедливости гипотезы о связи формируемой поверхностной структуры с валентностью адатомов.

## 2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на подложках Si(111) и Si(7710) (отклонение  $10.0^\circ$  в направлении  $[\bar{1}\bar{1}2]$  от плоскости Si(111)) в сверхвысоковакуумной камере СТМ (OMICRON) с давлением остаточных газов  $9 \cdot 10^{-11}$  Torr. Были использованы высокоомные образцы кремния *p*-типа с сопротивлением 5–10  $\Omega \cdot \text{cm}$  и размерами  $15 \times 3 \times 0.3$  mm.

Образцы прогревали прямым пропуском тока. Калибровку температуры образца осуществляли с помощью оптического пирометра. После стандартной химической обработки образцы прогревали в вакууме при температуре  $600^\circ\text{C}$  около 4h, затем в течение нескольких секунд прогревали при  $T = 1250^\circ\text{C}$  для удаления защитного окисла. Охлаждение образцов Si(111) и Si(7710) до комнатной температуры проводили по разным сценариям. После короткого отжига при  $T = 1250^\circ\text{C}$  образцы Si(111) охлаждали со скоростью примерно  $50^\circ\text{C}/\text{min}$  в диапазоне температур 900–400 $^\circ\text{C}$  путем ступенчатого уменьшения величины прогревающего тока. Образцы Si(7710) охлаждали по методу,

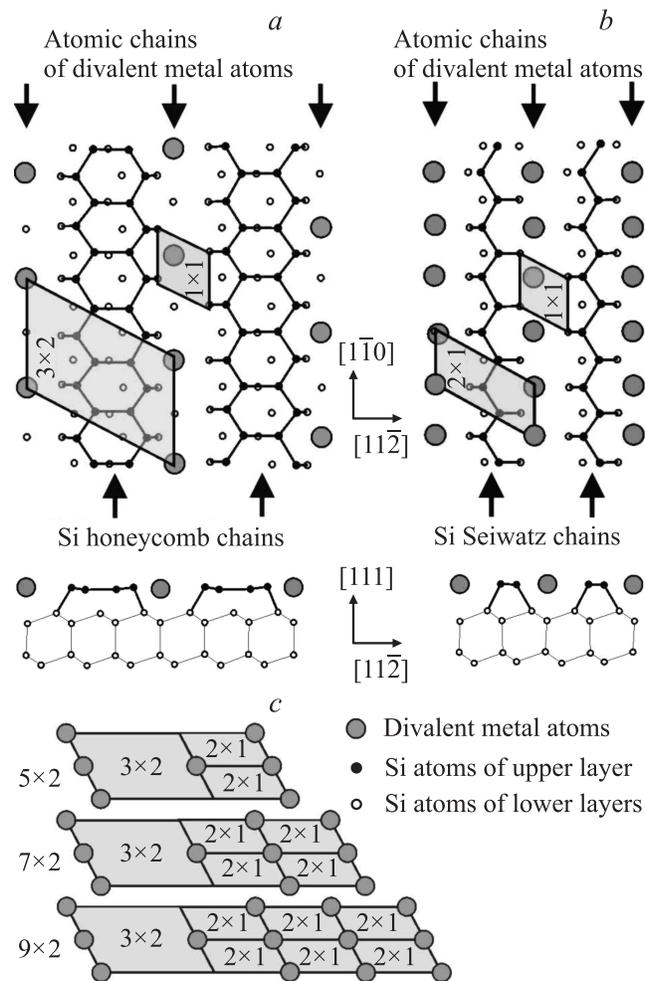
описанному в [11]. После отжига при  $T = 1250^\circ\text{C}$  температуру образцов Si(7710) быстро понижали до  $1060^\circ\text{C}$  и отжигали при этой температуре 30 с. Затем образец быстро охлаждали до  $830^\circ\text{C}$  и отжигали при этой температуре 15 min. После этого образец охлаждали со скоростью примерно  $50^\circ\text{C}/\text{min}$  в диапазоне температур  $830\text{--}400^\circ\text{C}$ .

Источником Sr служили кусочки стронция, инкапсулированные в прогреваемую Ta-трубку. Осаждение Sr проводили в камере СТМ при давлении около  $2 \cdot 10^{-10}$  Torr со скоростью примерно  $0.001 \text{ ML}/\text{min}$  (ML — монослой). Поток атомов стронция калибровали, подсчитывая количество атомов Sr на СТМ-изображениях после напыления на образец Si(111) при комнатной температуре. Отдельные атомы Sr, адсорбированные на поверхности Si(111)  $7 \times 7$ , были идентифицированы как яркие пятна на СТМ-изображениях, вызванные их быстрым тепловым движением в пределах половины ячейки  $7 \times 7$  [12]. Большая часть экспериментов была проведена при напылении Sr на нагретый образец в диапазоне температур  $400\text{--}800^\circ\text{C}$ . Напыление Sr на образец при комнатной температуре и последующий отжиг приводили к менее упорядоченной поверхности и меньшим размерам доменов поверхностных структур.

Изображения СТМ записывали в режиме постоянного туннельного тока после остывания образцов до комнатной температуры. В качестве зондов СТМ использовали вольфрамовые иглы, полученные электролитическим травлением в растворе щелочи.

### 3. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены разработанные атомные модели 1D-структур на поверхности Si(111), формирующихся при адсорбции атомов металлов. При их разработке использованы результаты многочисленных исследований, проведенных взаимодополняющими методами. На рис. 1, *a, b* показаны атомные модели поверхностных структур  $3 \times 2$  и  $2 \times 1$  [7,8]. В модели структуры  $3 \times 2$  атомы Si верхнего слоя образуются шестиугольники в виде пчелиных сот, формирующие цепочки с периодом 1 в направлении  $[1\bar{1}0]$ . Цепочки отделены друг от друга траншеями, которые заполнены атомами металла с периодом 2 в направлении  $[1\bar{1}0]$ . Единственное отличие структуры  $3 \times 1$  от  $3 \times 2$ , представленной на рис. 1, *a*, состоит в периоде расположения атомов металла в направлении  $[1\bar{1}0]$ , который для этой структуры равен 1. В структуре  $2 \times 1$  атомы Si верхнего слоя образуют так называемые цепочки Сейваца (рис. 1, *b*). Траншеи между ними заполнены атомами металла с периодом 1 в направлении  $[1\bar{1}0]$ . Как показано на рис. 1, *c*, элементарные ячейки структур  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$  состоят из подъячеек  $3 \times 2$  и  $2 \times 1$ . Согласно представленным на рис. 1 моделям, покрытие атомов металлов в них составляет  $\Theta_{3 \times 2} = 1/6 \text{ ML}$ ,  $\Theta_{3 \times 1} = 1/3 \text{ ML}$ ,  $\Theta_{2 \times 1} = 1/2 \text{ ML}$ ,  $\Theta_{5 \times 2} = 3/10 \text{ ML}$ ,  $\Theta_{7 \times 2} = 5/14 \text{ ML}$ ,  $\Theta_{9 \times 2} = 7/18 \text{ ML}$ .



**Рис. 1.** Вид сверху (вверху) и сбоку (внизу) на модели структур  $3 \times 2$  (*a*) и  $2 \times 1$  (*b*), индуцируемых двухвалентными атомами металлов. Большие серые кружки — атомы металла, черные — атомы Si верхнего слоя, белые — атомы Si нижележащих слоев. Атомы металла образуют цепочки в направлении  $[1\bar{1}0]$ , расположенные в траншеях между атомами Si. *a* — структура  $3 \times 2$ ,  $\Theta_{3 \times 2} = 1/6 \text{ ML}$ . Атомы Si верхнего слоя образуют шестиугольники в виде пчелиных сот (honeycomb chains). *b* — структура  $2 \times 1$ ,  $\Theta_{2 \times 1} = 1/2 \text{ ML}$ . Атомы Si верхнего слоя образуют цепочки Сейваца (Seiwatz chains). *c* — схематическое изображение, поясняющее структуру ячеек  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$ .  $\Theta_{5 \times 2} = 3/10 \text{ ML}$ ,  $\Theta_{7 \times 2} = 5/14 \text{ ML}$ ,  $\Theta_{9 \times 2} = 7/18 \text{ ML}$ .

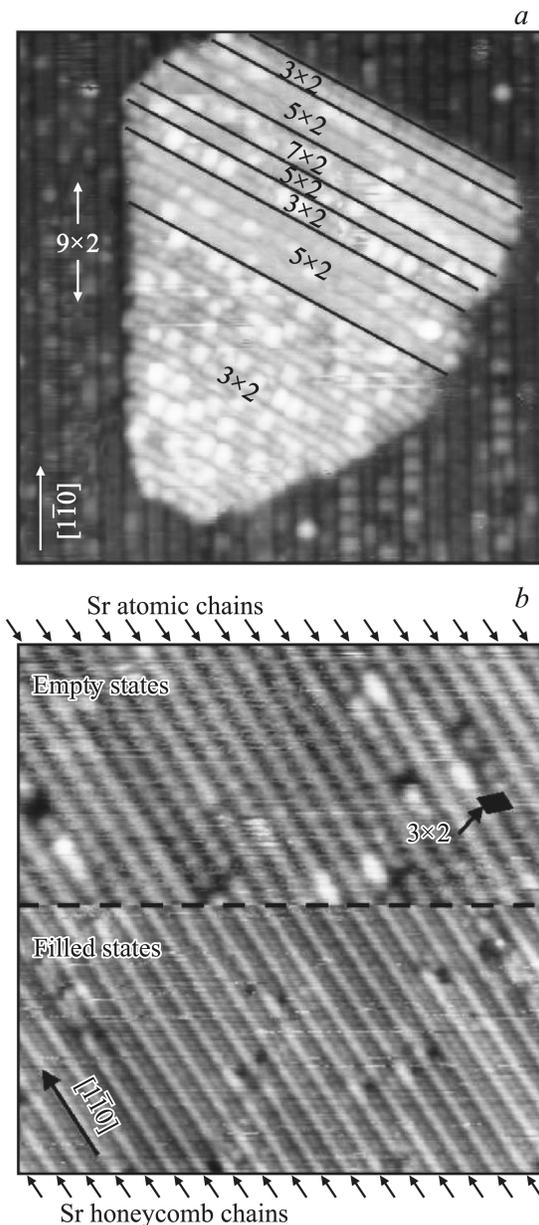
В отличие от ожидаемого слоя Sr/Si(111) формирования структур  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$  и  $9 \times 2$  имеющиеся в литературе данные, полученные с помощью ДБЭ, свидетельствуют о том, что на поверхности формируются структуры  $3 \times 1$ ,  $5 \times 1$ ,  $7 \times 1$ ,  $9 \times 1$  [9]. Однако ранее было показано, что в случае формирования на поверхности доменов поверхностных структур возможна ошибочная интерпретация данных дифракции, так как некоторые из дифракционных рефлексов могут отсутствовать из-за того, что часть электронных волн рассеивается на них в противофазе [10]. В частности, было продемонстрировано, что соседние ряды цепочек ярких пятен в структуре

$3 \times 2$ -Sr на картинках СТМ поверхности Si(111) часто не скоррелированы. Это указывает на формирование ячеек  $3 \times 2$ , расположенных в двойниковых положениях (антифазных доменов структуры  $3 \times 2$ ). Кроме того, на картинах СТМ часто можно видеть случайно расположенные дефекты структуры  $3 \times 2$  в виде нарушения периодичности 2 вдоль ряда светлых пятен. Обе эти причины приводят к ослаблению рефлекса порядка  $1/2$  от структур  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$  при использовании дифракции электронов.

На рис. 2, *a* показан фрагмент поверхности Si(111) с однослойным островком кремния после осаждения Sr на образец при  $T_{\text{ads}} = 500^\circ\text{C}$ . Поверхность островка и вокруг него покрыта индуцированными стронцием 1D-поверхностными структурами. Исходя из размеров ячеек образующихся структур была определена их периодичность:  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$ . Таким образом, наблюдение последовательности индуцированных Sr поверхностных структур  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$  свидетельствует в пользу атомных моделей реконструкции поверхности Si(111), представленных на рис. 1. На рис. 2, *a* можно также заметить несколько ярких пятен на структуре  $3 \times 2$ -Sr. Это могут быть адсорбированные атомы Sr или Si.

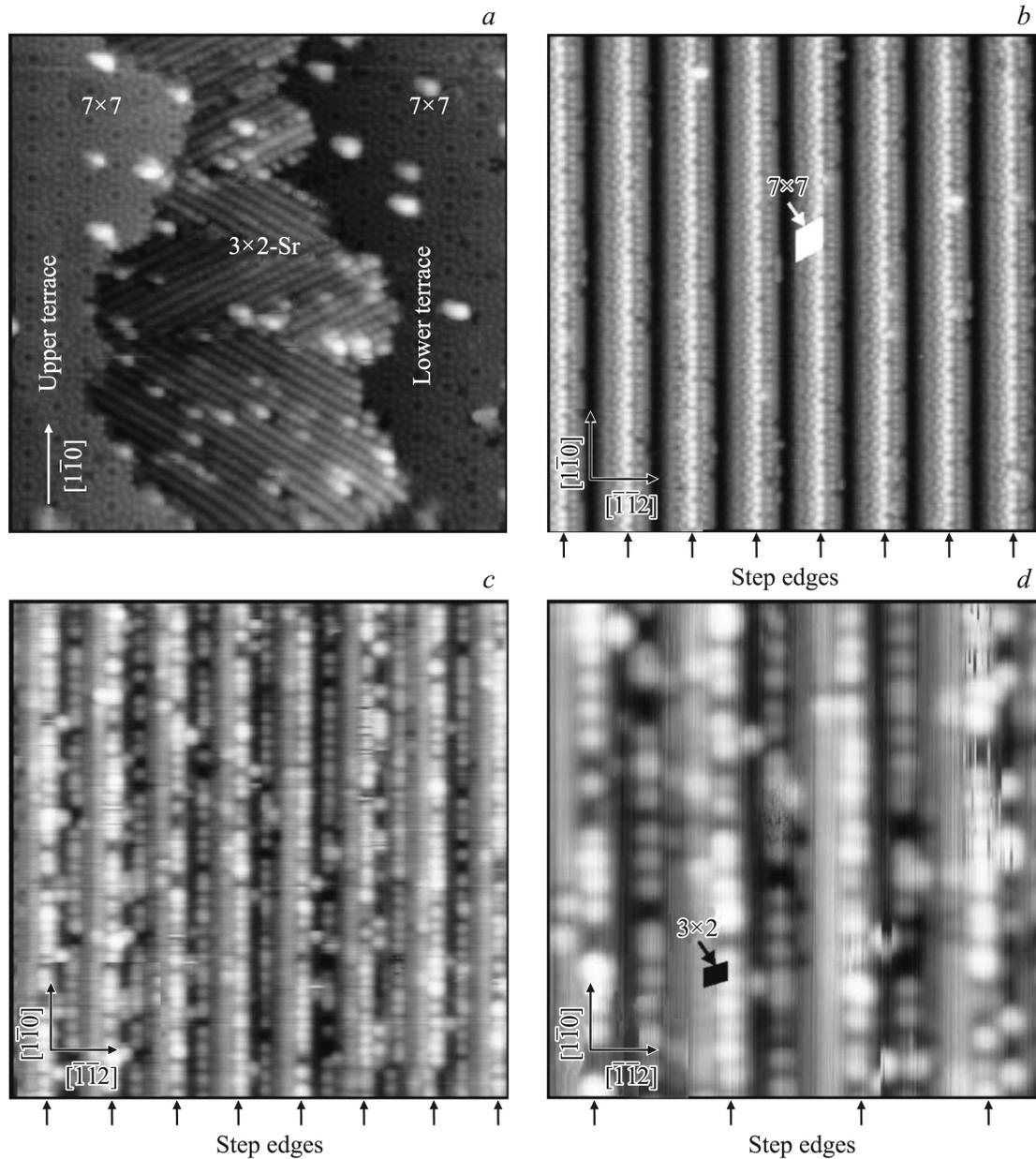
Вторым фактом, свидетельствующим в пользу атомной модели, представленной на рис. 1, *a*, является определенное с помощью СТМ покрытие Sr в структуре  $3 \times 2$ -Sr. Источник Sr калибровали так, как указано выше: на образец при комнатной температуре осаждали примерно 0.001 ML Sr и затем подсчитывали количество ярких пятен на СТМ-изображениях, обусловленных быстрым тепловым движением атомов Sr в пределах половины ячейки  $7 \times 7$  [12]. Далее, на чистую поверхность Si(111) при  $T_{\text{ads}} = 700\text{--}800^\circ\text{C}$  осаждали некоторое количество Sr. При этих температурах структуры  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$  не формируются. Таким образом, на поверхности присутствовали области со структурой  $3 \times 2$ -Sr и области чистой поверхности Si(111) кремния со структурой  $7 \times 7$ . Измеряя долю поверхности, занятую доменами структуры  $3 \times 2$ -Sr и зная количество напыленного Sr, мы определили, что покрытие Sr в структуре  $3 \times 2$ -Sr близко к  $1/6$  ML, т.е. на одну ячейку  $3 \times 2$  приходится один атом Sr, как в модели на рис. 1, *a*. Небольшие отличия от покрытия  $1/6$  ML могут быть вызваны дефектами в структуре  $3 \times 2$ , связанными с нарушением периодичности в направлении  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ . В области дефекта покрытие отличается от  $1/6$  ML.

В работе [13] показаны смоделированные СТМ-изображения структуры Si(111)- $3 \times 2$ , индуцированной адсорбцией атомов Mg, Ca, Sr, Ba. Изображения, приведенные в работе [13], смоделированы на основе модели структуры  $3 \times 2$ , представленной на рис. 1, *a*, с применением расчетов на основе теории функционала плотности и приближения Терсофа–Хамана [14,15]. На изображениях структуры  $3 \times 2$ -Sr ([13], на рис. 2) видно, что при положительной полярности приложенного напряжения яркими пятнами выделяются атомы Sr с периодом 2 в



**Рис. 2.** *a*) СТМ-изображение ( $40 \times 40$  nm) доменов поверхностных структур  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$ , сосуществующих на поверхности Si(111).  $U = +1.4$  V,  $T_{\text{ads}} = 500^\circ\text{C}$ . *b*) СТМ-изображение ( $20 \times 20$  nm) пустых (вверху,  $U = +2.8$  V) и занятых (внизу,  $U = -1.5$  V) электронных состояний поверхности Si(111)- $3 \times 2$ -Sr.  $T_{\text{ads}} = 600^\circ\text{C}$ .

направлении  $[1\bar{1}0]$ . При отрицательной же полярности выделяются атомы Si, образующие шестиугольники в виде пчелиных сот и расположенные с периодом 1 в направлении  $[1\bar{1}0]$ . Причина такой зависимости состоит в следующем. В соответствии с работой [16] электроотрицательность стронция равна  $\chi_{\text{Sr}} = 2.0$  eV, а кремния  $\chi_{\text{Si}} = 4.8$  eV. Так как  $\chi_{\text{Si}} - \chi_{\text{Sr}} > 0$ , то Sr — донор электронов, а Si — акцептор. Следовательно, в структуре Si(111)- $3 \times 2$ -Sr будет происходить смещение электронной плотности от атомов Sr к атомам Si.



**Рис. 3.** СТМ-изображения ( $40 \times 40$  nm) поверхности Si(111) после напыления Sr на образец при комнатной температуре и отжига в течение 20 min при  $500^\circ\text{C}$  (a) и чистой поверхности Si(7710),  $U = +1.9$  V (b). c, d — СТМ-изображения ( $40 \times 40$  и  $20 \times 20$  nm соответственно) поверхности Si(7710) после адсорбции около 0.5 ML стронция.  $U = +2.2$  V,  $T_{\text{ads}} = 600^\circ\text{C}$ .

В результате этого пустые электронные состояния, отображаемые в СТМ при  $U > 0$ , будут сосредоточены на атомах Sr, а заполненные ( $U < 0$ ) на атомах Si верхнего слоя. Аналогичный эффект наблюдался нами ранее при адсорбции Sr в половинках ячеек Si(111)- $7 \times 7$  [17]. Экспериментальные СТМ-изображения структуры  $3 \times 2$ -Sr на рис. 2, b, полученное при обеих полярностях приложенного напряжения, обладает значительным сходством со смоделированными изображениями, приведенными в работе [13]. А именно при  $U > 0$  (верхняя часть рис. 2, b) видны отдельные светлые пятна с периодом 2 в направлении  $[1\bar{1}0]$ , которые можно ассоциировать с

атомами Sr. При  $U < 0$  (нижняя часть рис. 2, b) видны лишь непрерывные светлые полосы в направлении  $[1\bar{1}0]$ . Эти полосы связаны с атомами Si верхнего слоя с периодом 1 в направлении  $[1\bar{1}0]$  и являются неразрешенными в СТМ. Следовательно, наблюдаемая зависимость вида СТМ-картин от полярности приложенного напряжения также свидетельствует в пользу модели структуры  $3 \times 2$ , представленной на рис. 1, a.

При малых покрытиях Sr структура  $3 \times 2$  преимущественно либо формируется на мождоменных границах структуры Si(111)- $7 \times 7$ , либо примыкает к краю ступеней со стороны нижней террасы Si(111) (рис. 3, a).

При увеличении покрытия Sr край верхней террасы отступает, освобождая атомы Si, которые в свою очередь встраиваются в структуру  $3 \times 2$ -Sr нижней террасы, увеличивая площадь, занятую ею. Из-за вращательной  $C_3$ -симметрии поверхности Si(111) при напылении Sr образуются три возможных типа доменов структуры  $3 \times 2$ , два из которых видны на рис. 3, *a*. Если понизить симметрию поверхности до  $C_1$ , например, используя ступенчатые поверхности и Si(111), то можно ожидать формирования однодоменной структуры  $3 \times 2$ . Для этого в качестве подложки мы использовали поверхность Si(7710), состоящую из равномерно расположенных террас Si(111) и ступеней высотой в три межплоскостных расстояния  $d_{(111)}$  [18,19]. СТМ-изображение чистой поверхности Si(7710) приведено на рис. 3, *b*.

Высокоупорядоченная поверхность кремния, состоящая из равномерно расположенных террас Si(111) и тройных ступеней, была описана Киракосяном в [11]. Сделан вывод, что указанная поверхность имеет ориентацию (557), а край тройной ступени образует плоскость с ориентацией (112). Каждая терраса в составе ступени вмещает ровно одну половину ячейки структуры  $7 \times 7$  в ширину. Позже на основании исследований этой поверхности с помощью высокоразрешающей дифракции медленных электронов и моделирования процесса дифракции было сделано предположение, что край ступени имеет ориентацию (113) [20]. Дальнейшие исследования с применением СТМ привели к разработке атомной модели поверхности с равномерно расположенными ступенями, а также уточнению, что ориентация этой поверхности соответствует (7710), а не (557) [18,19]. Было также показано, что использование этой поверхности в качестве подложки перспективно для формирования наноструктур типа нанопроволок и наноточек [21–24].

На рис. 3, *c, d* показаны СТМ-изображения поверхности Si(7710) после напыления примерно 0.05 ML стронция на образец при  $T_{\text{ads}} = 600^\circ\text{C}$ . Можно видеть, что период расположения ступеней, а следовательно и их высота сохранились. Однако вместо структуры  $7 \times 7$  на террасах Si(111) сформировалась некая другая структура, индуцированная атомами Sr. На СТМ-изображении высокого разрешения, представленном на рис. 3, *d*, можно видеть, что структура  $3 \times 2$ -Sr с периодом 2 вдоль краев ступеней является составным элементом реконструированной под воздействием адсорбции Sr поверхности Si(7710). В соответствии с моделью структуры  $3 \times 2$  на рис. 1, *a* это означает, что сформировались цепочки атомов Sr вдоль краев ступеней на поверхности Si(7710). Однако разработка детальной модели поверхности Si(7710)-Sr требует ее дальнейшего изучения.

#### 4. Заключение

Методом СТМ исследовано формирование цепочек атомов Sr в составе поверхностных структур  $3 \times 2$ ,  $5 \times 2$ ,  $7 \times 2$ ,  $9 \times 2$  на грани Si(111), формирующихся

при адсорбции стронция. Полученные экспериментальные данные согласуются с атомными моделями поверхностных структур, предложенными ранее. На грани Si(111) формируются три типа доменов поверхностной структуры  $3 \times 2$ , соответствующие вращательной симметрии третьего порядка этой поверхности. Показано, что на поверхности Si(7710), состоящей из равномерно расположенных террас Si(111) и ступеней высотой в три межплоскостных расстояния  $d_{(111)}$ , формируются одинаково ориентированные домены структуры  $3 \times 2$  на террасах, образующие цепочки атомов Sr вдоль краев ступеней.

#### Список литературы

- [1] F. Bechstedt. Principles of surface physics. Springer, Berlin (2003). 342 p.
- [2] A. Houselt, T. Gnielka, J.M.J.A. Brugh, N. Oncel, D. Kockmann, R. Heid, K.-P. Bohnen, B. Poelsema, H.J.W. Zandvliet. Surf. Sci. **602**, 1731 (2008).
- [3] J.R. Ahn, H.W. Yeom, H.S. Yoon, I.-W. Lyo. Phys. Rev. Lett. **91**, 196 403 (2003).
- [4] C. Tegenkamp, Z. Kallasy, H. Pfnuer, H.-L. Guenter, V. Zialasek, M. Henzler. Phys. Rev. Lett. **95**, 176 804 (2005).
- [5] S.C. Erwin, H.H. Weiering. Phys. Rev. Lett. **81**, 2296 (1998).
- [6] G. Lee, S. Hong, H. Kim, D. Shin, J.-Y. Koo, H.-I. Lee, D.W. Moon. Phys. Rev. Lett. **87**, 056 104 (2001).
- [7] C. Battaglia, H. Cercellier, C. Monney, L. Despont, M.G. Garnier, P. Aebi. J. Phys. Conf. Ser. **100**, 052 078 (2008).
- [8] C. Battaglia, P. Aebi, S.C. Erwin. Phys. Rev. B **78**, 075 409 (2008).
- [9] F. Shimokoshi, I. Matsuda, S. Hasegawa. e-J. Surf. Sci. Nanotech. **2**, 178 (2004).
- [10] S. Teys, B. Olshanetsky, R. Zhachuk, S. Pereira, G. Norga. Appl. Phys. Lett. **93**, 161 912 (2008).
- [11] A. Kirakosian, R. Bennewitz, J.N. Crain, Th. Fauster, J.-L. Lin, D.Y. Petrovykh, F.J. Himpsel. Appl. Phys. Lett. **79**, 1608 (2001).
- [12] R. Zhachuk, S. Teys, B. Olshanetsky, S. Pereira. Appl. Phys. Lett. **95**, 061 901 (2009).
- [13] S. Hong, G. Lee, H. Kim. Surf. Sci. **600**, 3606 (2006).
- [14] J. Tersoff, D.R. Hamman. Phys. Rev. Lett. **50**, 1998 (1983).
- [15] J. Tersoff, D.R. Hamman. Phys. Rev. B **31**, 805 (1985).
- [16] R.G. Pearson. Inorg. Chem. **27**, 734 (1988).
- [17] R. Zhachuk, B. Olshanetsky, J. Coutinho, S. Pereira. Phys. Rev. B **81**, 165 424 (2010).
- [18] S.A. Teys, K.N. Romanyuk, R.A. Zhachuk, B.Z. Olshanetsky. Surf. Sci. **600**, 4878 (2006).
- [19] R. Zhachuk, S. Pereira. Phys. Rev. B **79**, 077 401 (2009).
- [20] M. Henzler, R. Zhachuk. Thin Solid Films **428**, 129 (2003).
- [21] R.A. Zhachuk, S.A. Teys, A.E. Dolbak, B.Z. Olshanetsky. Surf. Sci. **565**, 37 (2004).
- [22] P.A. Жачук, С.А. Тийс, Б.З. Ольшанецкий. Письма в ЖЭТФ **79**, 467 (2004).
- [23] P.A. Жачук, С.А. Тийс, Б.З. Ольшанецкий. ФТП **41**, 580 (2007).
- [24] P.A. Жачук, К.Н. Романюк, С.А. Тийс, Б.З. Ольшанецкий. ФТТ **51**, 189 (2009).