

Исследование начальных стадий роста Pb на поверхности Si(7710) методом сканирующей туннельной микроскопии

© Р.А. Жачук, С.А. Тийс, Б.З. Ольшанецкий[†]

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

(Получена 21 сентября 2006 г. Принята к печати 3 октября 2006 г.)

Методом сканирующей туннельной микроскопии исследован рост островков свинца на поверхности Si(7710), содержащей ступени высотой в три межплоскостных расстояния $d_{(111)}$, и на сингулярной поверхности Si(111) при комнатной температуре. Показано, что тройные ступени определяют форму и ориентацию островков свинца, формирующихся на поверхности Si(7710). Обнаружено влияние предварительной выдержки образца кремния в вакуумной камере на размер и плотность растущих островков. Исходя из данных электронной оже-спектроскопии это влияние обусловлено адсорбцией кислорода на поверхности подложки из остаточной атмосферы вакуумной камеры.

PACS: 61.30.Hn, 61.46.Df, 68.37.Ef

1. Введение

Исследование формирования и квантово-размерных свойств нанобъектов типа нанопроволок и наноточек на поверхностях кремния вызывает неослабевающий интерес. Одним из способов получения упорядоченных нанобъектов является процесс самоорганизованного роста с использованием подложек, поверхности которых содержат системы регулярных ступеней [1–8]. Такими поверхностями являются вицинальные поверхности. Поверхности кремния, отклоненные на малые углы от плоскости (111) в направлении $[\bar{1}\bar{1}2]$, при комнатной температуре содержат ступени высотой в одно и три межплоскостных расстояния $d_{(111)}$ (тройные ступени) [9–13]. При увеличении угла наклона к плоскости (111) доля тройных ступеней на поверхности увеличивается. Перспективной для создания наноструктур является поверхность кремния, состоящая из регулярно расположенных ступеней высотой в три межплоскостных расстояния, разделенных террасами (111), шириной в одну ячейку поверхностной структуры Si(111)– 7×7 . Ранее считалось, что эта поверхность имеет ориентацию (557) [9], но недавно было установлено, что ее характеризуют индексы (7710) [14]. Период системы регулярных ступеней на поверхности Si(7710), определяющий размер формируемых наноструктур, составляет 5.33 нм [14]. Наноструктуры из металла, имеющие подобные характерные размеры, могут проявлять квантово-размерные эффекты при комнатной температуре.

Цель данной работы — исследование возможности формирования наноструктур Pb на поверхности Si(7710). Работа была выполнена в сверхвысоком вакууме методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и электронной оже-спектроскопии (ЭОС). Результаты, полученные на поверхности Si(7710), сопоставлялись с результатами таких же экспериментов на сингулярной грани Si(111).

2. Методика эксперимента

Эксперименты были выполнены в двух независимых сверхвысоковакуумных камерах. Одна из камер была оснащена оборудованием для методов дифракции медленных электронов и ЭОС. Давление остаточных газов в этой камере составляло $1.6 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. Вторая камера была оборудована аппаратурой СТМ (OMICRON). Все СТМ изображения были записаны в режиме постоянного тока с использованием вольфрамового острия. Давление остаточных газов во второй камере составляло $9 \cdot 10^{-11}$ мм рт. ст. и могло быть увеличено до $5 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. открыванием вентиля в шлюзовую камеру.

Для экспериментов мы использовали образцы с поверхностью Si(111) и образцы с вицинальными поверхностями, отклоненными от плоскости (111) на 10.0° в направлении $[\bar{1}\bar{1}2]$. Образцы прогревали прямым пропусканием постоянного тока. Направление пропускаемого тока было параллельно краям ступеней на поверхности Si(7710), чтобы избежать эшелонирования ступеней, вызванного электропереносом [15]. Температуру образца контролировали с помощью оптического пирометра. Чистую поверхность приготавливали способом, описанным в работе [9].

Свинец осаждали на поверхность кремния при комнатной температуре. Источником атомов свинца служили кусочки Pb в танталовой лодочке, прогреваемой электрическим током. Для калибровки потока атомов Pb мы напыляли субмонослойные количества Pb на поверхность Si(100) при комнатной температуре. После этого подсчитывали число светлых пятен в образовавшихся цепочках на поверхности Si(100). Согласно данным, опубликованным в работе [16], каждое светлое пятно на этой поверхности соответствует двум атомам Pb. Скорость напыления в наших экспериментах составляла 0.05 МС/мин (МС — монослой).

[†] E-mail: olshan@isp.nsc.ru

3. Результаты исследований и их обсуждение

Если осаждать Pb на поверхность Si(7710) сразу же после ее очистки, то формируются вытянутые широкие островки Pb, перекрывающие несколько соседних террас Si(111). Тем не менее эти островки ориентируются преимущественно вдоль краев тройных ступеней на поверхности Si(7710) (рис. 1, *a*). На поверхности, изображенной на рис. 1, *a*, края ступеней, имеющих направление $[\bar{1}10]$, ориентированы вертикально. При данном масштабе изображения тройные ступени на поверхности не видны. Горизонтальные неровные полосы, видимые на изображении, — изломы ступеней (кинки), связанные с небольшой разориентацией поверхности образца относительно плоскости (7710) в азимутальном направлении. При покрытии свинца, равном примерно 1.5 МС, плотность массива островков составляет $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, высота островков около 40 нм, а характерный латеральный размер 400 нм. Низкая плотность островков свинца свидетельствует о высокой подвижности атомов Pb на поверхности Si при комнатной температуре. При напылении Pb на поверхность Si(111) при комнатной температуре формируются островки свинца с аналогичными размерами и с характерной кольцевой формой: в центре островка под воздействием острия образуется углубление примерно на половину высоты островка (рис. 1, *b*). Островки такой формы наблюдались при исследовании адсорбции свинца на поверхности Si(111) ранее [17]. На островках Pb, сформированных на поверхности Si(7710), образования углубления мы не наблюдали.

При исследовании формирования островков свинца на поверхности Si(7710) при комнатной температуре с помощью СТМ было обнаружено влияние предварительной выдержки образца в вакуумной камере на размер и плотность формирующихся островков. Выдержка образцов в вакуумной камере перед напылением Pb

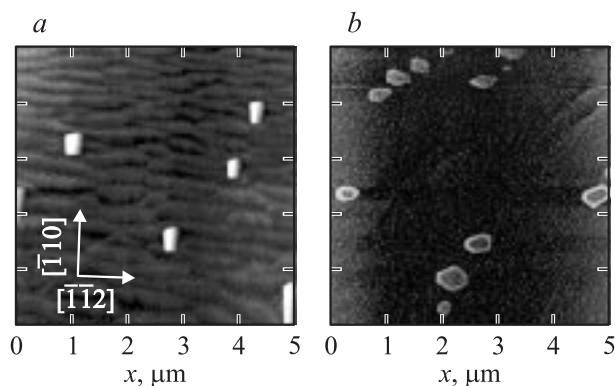


Рис. 1. СТМ изображения поверхностей Si после адсорбции 1.5 МС свинца на подложке при комнатной температуре. Условия осаждения Pb: *a* — поверхность Si(7710), $U = +1.2 \text{ В}$, $I = 0.03 \text{ нА}$; *b* — поверхность Si(111), $U = +1.1 \text{ В}$, $I = 0.05 \text{ нА}$.

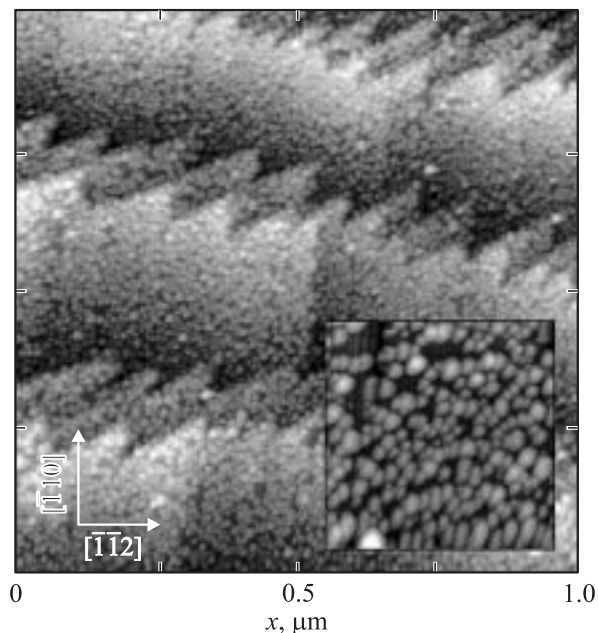


Рис. 2. СТМ изображение наноточек свинца на поверхности Si(7710), полученных после адсорбции 0.05 МС кислорода и напыления 1.5 МС свинца на подложку при комнатной температуре, $U = +1.5 \text{ В}$, $I = 0.02 \text{ нА}$. На вставке — увеличенный фрагмент поверхности размером $200 \times 200 \text{ нм}$, на котором между островками Pb можно видеть ступени Si.

приводит к тому, что островки свинца становятся более округлыми, их размеры становятся меньше, а плотность островков на поверхности увеличивается. Так, если перед напылением Pb выдержать поверхность кремния в вакуумной камере при давлении остаточной атмосферы $5 \cdot 10^{-10} \text{ мм рт.ст.}$ в течение 4 ч, то характерный латеральный размер образующихся при этом островков Pb составляет 10 нм, высота 3 нм, а плотность $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (рис. 2). Так как длина волны электронов на уровне Ферми в свинце в направлении $[111]$ составляет примерно 1 нм [18], нанокластеры Pb с такими характерными размерами могут обладать квантово-размерными свойствами. Но мы не смогли подобрать условия, при которых образовывались бы островки свинца в виде нанопроволок и наноточек, расположенных на террасах (111) поверхности Si(7710), подобно тому как это имело место при адсорбции Ag [7,8].

Очевидной причиной влияния предварительной выдержки образца в вакууме на размер и плотность островков свинца является адсорбция на поверхности кремния примесей из остаточных газов в вакуумной камере. По данным ЭОС, после выдержки чистой поверхности кремния при давлении остаточных газов $1.6 \cdot 10^{-10} \text{ мм рт.ст.}$ в течение суток в спектрах от поверхности Si(7710) наблюдалось появление только примеси кислорода, соответствующее покрытию примерно 0.1 МС. Величина концентрации адсорбированного на поверхности кислорода пропорциональна экспозиции pt ,

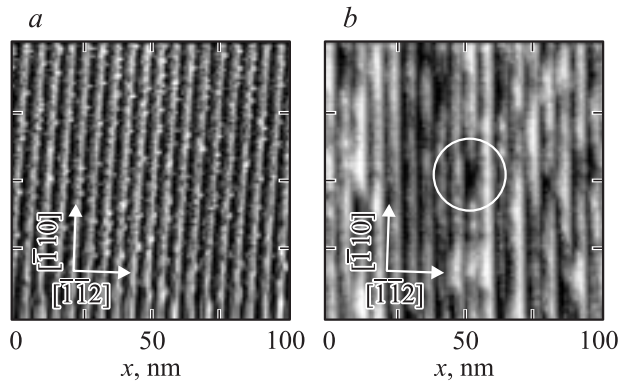


Рис. 3. Полученные с помощью СТМ изображения поверхности Si(7710): *a* — после напыления 0.8 МС свинца при комнатной температуре, $U = +2.0$ В, $I = 0.03$ нА; *b* — после прогрева при $T = 400^\circ\text{C}$ в течение 10 мин. $U = +0.9$ В, $I = 0.02$ нА. Окружностью выделена область, где хорошо видно сдвигание тройных ступеней Si.

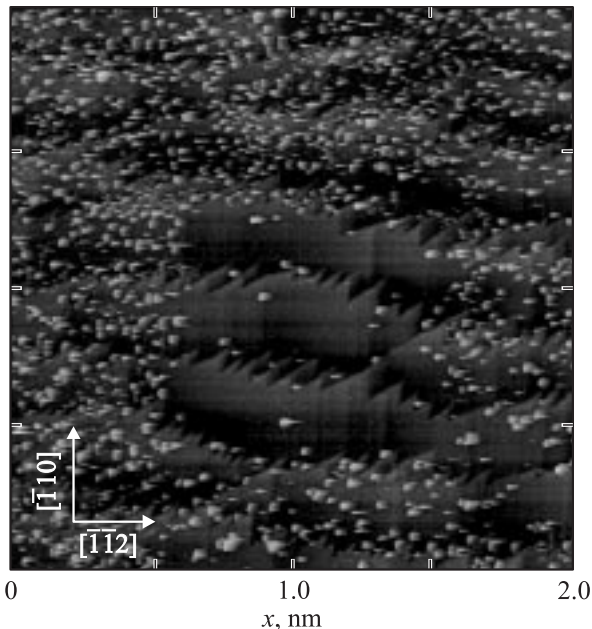


Рис. 4. СТМ изображение поверхности Si(7710) после адсорбции 0.02 МС кислорода и напыления 1.5 МС свинца на подложку при комнатной температуре. В центре рисунка видна область с низкой концентрацией островков Pb, сканированная ранее. $U = +1.5$ В, $I = 0.03$ нА.

где p — давление остаточных газов в вакуумной камере, а t — время выдержки при условии, что эта концентрация является малой. Поэтому можно оценить концентрацию атомов кислорода на поверхности Si(7710), необходимую для формирования массива наноточек свинца, показанного на рис. 2. Она составляет 0.05 МС. Возможными механизмами воздействия кислорода на размер и плотность островков Pb являются уменьшение смачиваемости поверхности кремния свинцом и уменьшение

коэффициента диффузии атомов Pb по поверхности в присутствии атомов кислорода.

Отжиг поверхности Si(7710) с адсорбированным Pb при температуре 400°C приводит к смещению ступеней кремния, в результате чего часть тройных ступеней на поверхности сдвигается, т.е. высота таких ступеней становится равной $6d_{(111)}$ (рис. 3).

В целом это приводит к разупорядочению поверхности Si(7710).

Нами было обнаружено, что в процессе получения СТМ изображений поверхности кремния с адсорбированным Pb уменьшается плотность островков в области сканирования. Хорошо видно, что при увеличении области сканирования в центре СТМ изображения выделяется область, сканированная ранее, с меньшей плотностью островков (рис. 4). Такой эффект в первую очередь связан с переходом атомов свинца на острие при работе СТМ. Действительно, последующее сканирование чистой поверхности образца молибдена этим же острием показало наличие на поверхности кольцевых островков, характерных для Pb [17]. Эти островки могли появиться на поверхности молибдена только в результате переноса свинца острием иглы СТМ. Обнаруженный эффект приводит к ошибке в определении плотности малых островков Pb, а также существенно затрудняет получение СТМ изображений с атомным разрешением.

4. Заключение

Показано, что тройные ступени на поверхности Si(7710) определяют форму и ориентацию растущих островков свинца. Обнаружено влияние предварительной выдержки образца в вакуумной камере на размер и плотность островков свинца на поверхности Si(7710). Данные электронной оже-спектроскопии свидетельствуют о том, что это влияние вызвано адсорбцией кислорода из остаточной атмосферы вакуумной камеры.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-02-16138) и федеральной программы Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

- [1] F.J. Himpsel, A. Kirakosian, J.N. Crain, J.-L. Lin, D.Y. Petrovykh. Sol. St. Commun., **117**, 149 (2001).
- [2] J. Viernov, D.Y. Petrovykh, J.-L. Lin, F.K. Men, A. Kirakosian, F.D. Himpsel. Appl. Phys. Lett., **74**, 2125 (1999).
- [3] H. Omi, T. Ogino. Phys. Rev. B, **59**, 7521 (1999).
- [4] M. Kawamura, N. Paul, V. Cherepanov, B. Voigtlaender. Phys. Rev. Lett., **91**, 096 102 (2003).
- [5] M. Jalochowski, E. Bauer. Surf. Sci., **480**, 109 (2001).
- [6] I.K. Robinson, P.N. Bennett, F.J. Himpsel. Phys. Rev. Lett., **88**, 096 104 (2002).
- [7] R.A. Zhachuk, S.A. Teys, A.E. Dolbak, B.Z. Olshanetsky. Surf. Sci., **565**, 37 (2004).

- [8] P.A. Жачук, С.А. Тийс, Б.З. Ольшанецкий. Письма ЖЭТФ, **79**, 467 (2004).
- [9] A. Kirakosian, R. Bennewitz, J.N. Crain, Th. Fauster, J.-L. Lin, D.Y. Petrovykh, F.J. Himpsel. Appl. Phys. Lett., **79**, 1608 (2001).
- [10] В.И. Машанов, Б.З. Ольшанецкий. Письма ЖЭТФ, **36**, 290 (1982).
- [11] B.Z. Olshanetsky, S.A. Teys. Surf. Sci., **230**, 184 (1990).
- [12] R.J. Phaneuf, Ellen D. Williams. Phys. Rev. B, **41**, 2991 (1990).
- [13] Jian Wei, X.-S. Wang, J.L. Coldberg, N.C. Bartelt, Ellen D. Williams. Phys. Rev. Lett., **68**, 3885 (1992).
- [14] S.A. Teys, K.N. Romayuk, R.A. Zhachuk, B.Z. Olshanetsky. Surf. Sci., in press.
- [15] A.V. Latyshev, A.L. Aseev, A.B. Krasilnikov, S.I. Stenin. Surf. Sci., **213**, 157 (1989).
- [16] L. Juré, L. Magaud, J.-M. Cómez-Rodriguez, P. Mallet, J.-Y. Veullen. Phys. Rev. B, **61**, 16 902 (2000).
- [17] Hiroshi Okamoto, Dongmin Chen, Toshishige Yamada. Phys. Rev. Lett., **89**, 256 101-1 (2001).
- [18] K. Horn, B. Reihl, A. Zarter, D.E. Eastman, K. Hermann, J. Noffke. Phys. Rev. B, **30**, 1711 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

STM study of the initial stage of Pb growth on Si(7710) surface

R.A. Zhachuk, S.A. Teys, B.Z. Olshanetsky

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Science,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The formation of Pb islands on the Si(7710) surface containing steps with the height of three interplanar distances $d_{(111)}$ and on the singular Si(111) surface at room temperature has been studied by the scanning tunneling microscopy. It has been shown that the triple steps determine the shape and orientation of the Pb islands forming on the Si(7710) surface. It has been established that the preliminary exposure of a sample in the vacuum chamber affects the size and density of the formed Pb islands. According to the Auger electron spectroscopy data this is caused by the oxygen adsorption on the Si substrate from residual atmosphere of the vacuum chamber.