

06;11

**Адсорбция Со на реконструированные  
поверхности кремния:****Si(100)–c(4 × 12)–Al****и Si(111)–5.55 × 5.55–Cu**

© Д.А. Олянич, Д.Н. Чубенко, Д.В. Грузнев, В.Г. Котляр,  
В.В. Устинов, Н.И. Солин, А.В. Зотов, А.А. Саранин

Институт автоматки и процессов управления ДО РАН, Владивосток

E-mail: olyanich@mail.dvo.ru

Институт физики материалов УрО РАН, Екатеринбург

*В окончательной редакции 22 сентября 2009 г.*

Использование поверхностных реконструкций для модификации свойств подложек кремния с целью создания на них новых структур нанометрового масштаба является перспективным направлением развития нанотехнологий. Среди стабильных реконструкций выделяются реконструкции Si(100)–c(4 × 12)–Al и Si(111)–5.55 × 5.55–Cu, возможность использования которых в качестве шаблонных поверхностей продемонстрирована в недавних исследованиях. В настоящей работе методом сканирующей туннельной микроскопии исследовалась адсорбция Со на этих реконструкциях при различных температурах подложки. Показано, что при комнатной температуре формируется слабоупорядоченный слой металлического Со с сохранившимися реконструкциями на границе раздела Со/Si. Повышение температуры приводит к формированию ограниченных островков силицида кобальта на обеих поверхностях.

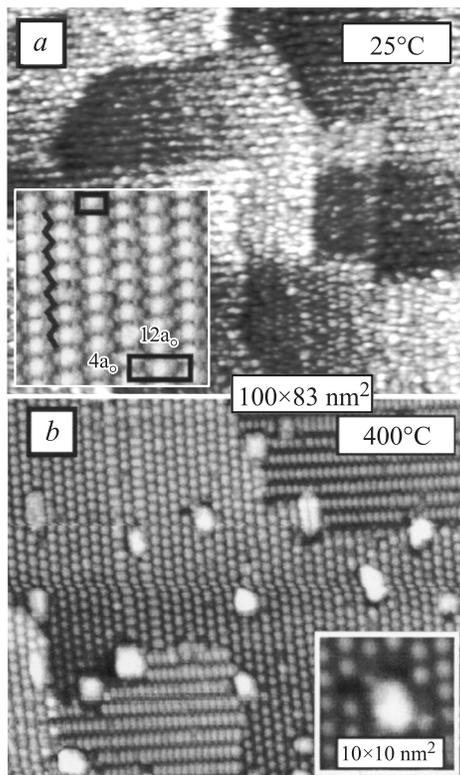
В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям объектов пониженной размерности вследствие наличия у них физических свойств, отличных от соответствующих свойств объемного материала [1]. Большую роль при формировании таких структур играет стабильность поверхности подложки, ее потенциальный рельеф и т.д. Известно, что основные свойства поверхности могут быть изменены, иногда существенно, созданием на ней субмонослойных поверхностных реконструкций. В ряде случаев такая модификация поверхности приводит к изменению режимов роста пленок адсорбата на ней и, как следствие, к формированию наноструктур, которые на обычной

поверхности кремния не наблюдаются. Так, модификация Si(100) реконструкцией Si(100)- $c(4 \times 12)$ -Al приводит к росту ограниченных наноразмерных островков некоторых металлов [2,3]. При модификации поверхности Si(100) реконструкцией Si(111)- $5.55 \times 5.55$ -Cu в отличие от атомно-чистой поверхности Si(111) $7 \times 7$  при прочих равных условиях наблюдалось формирование нанопроволок Cu вдоль атомных ступеней [4].

В настоящей работе исследовалось формирование нанообъектов Co при субмонослойных покрытиях на поверхностных фазах Si(100)- $c(4 \times 12)$ -Al и Si(111)- $5.55 \times 5.55$ -Cu (обозначенных далее как  $c(4 \times 12)$ -Al и „ $5 \times 5$ “-Cu соответственно). Кобальт был выбран в качестве исследуемого материала благодаря его магнитным свойствам.

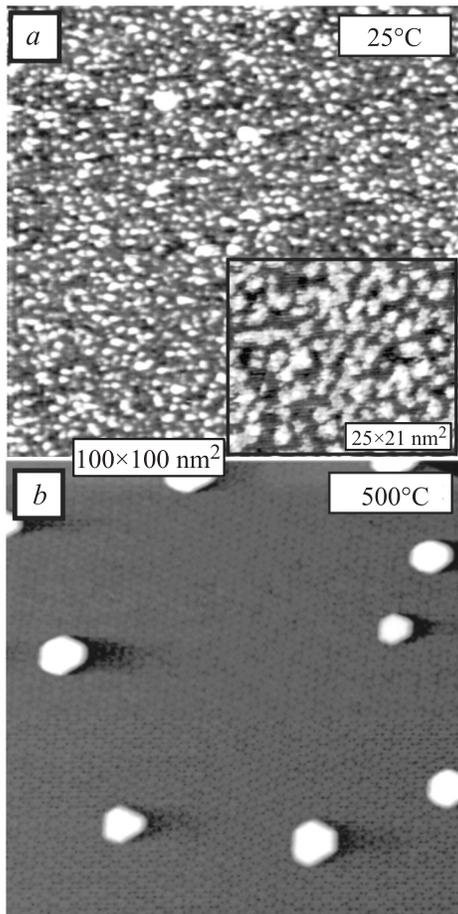
Эксперимент выполнен в СВВ установке STM-VT25 производства фирмы „Omicron Nanotechnology“ с базовым давлением  $2 \cdot 10^{-10}$  Торг. Чистую поверхность образца получали дегазацией при температуре  $600^\circ\text{C}$  с последующим отжигом при температуре  $1280^\circ\text{C}$ . Исходные поверхности  $c(4 \times 12)$ -Al и „ $5 \times 5$ “-Cu, используемые в качестве подложек для дальнейшей адсорбции Co, получали осаждением 0.5 ML Al на атомно-чистую поверхность Si(100) при температуре  $600^\circ\text{C}$  [4] и осаждением  $\sim 2$  ML Cu на поверхность Si(111) при температуре  $550^\circ\text{C}$  [5], соответственно (1 монослой (ML) =  $7.8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  для Si(111) и  $6.8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  для Si(100)). Все изображения были получены с помощью метода сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) при комнатной температуре, равной  $25^\circ\text{C}$  (КТ).

На рис. 1 представлено два СТМ-изображения, полученных после осаждения 0.2 ML кобальта на поверхностную фазу  $c(4 \times 12)$ -Al при КТ и  $400^\circ\text{C}$ . При КТ осаждение Co на поверхность  $c(4 \times 12)$ -Al приводит к формированию сплошной неупорядоченной пленки с шероховатым рельефом. Однако, начиная уже с  $T \approx 200^\circ\text{C}$ , наблюдается рост островковой пленки Co. Можно отметить, что при данной температуре не наблюдается признаков преимущественного зародышеобразования островков на ступенях или дефектах. Островки зарождаются между рядами кластеров Al в области зигзагообразных канавок, которые, в соответствии с моделью [6], представляют собой чередующиеся кремниевые димеры и не содержат атомов Al (на вставке на рис. 1, а черной изломанной линией отмечена зигзагообразная канавка, маленьким и большим прямоугольником отмечены Al кластер и элементарная ячейка реконструкции  $c(4 \times 12)$ -Al соответственно).



**Рис. 1.** СТМ-изображения заполненных состояний поверхности  $c(4 \times 12)$ -Al после осаждения 0.20 ML Co при температуре: 25°C (*a*) и 400°C (*b*).

Начиная с  $\sim 400^\circ\text{C}$  островки приобретают прямоугольную форму и ориентированы преимущественно вдоль кристаллографических направлений  $[0\bar{1}1]$  и  $[011]$ . С изменением температуры роста от 200 до 400°C наблюдается увеличение размеров островков от 2 до 5 nm и уменьшение их концентрации от  $2.6 \cdot 10^{12}$  до  $1.4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Осаждения Co на поверхность  $c(4 \times 12)$ -Al при 400°C приводит к разрушению исходной поверхности непосредственно вокруг островков, как показано на вставке на рис. 1, *b*. Разрушение реконструкции  $c(4 \times 12)$ -Al означает неизбежное перемешивание Co с материалом подложки (Si), т.е.



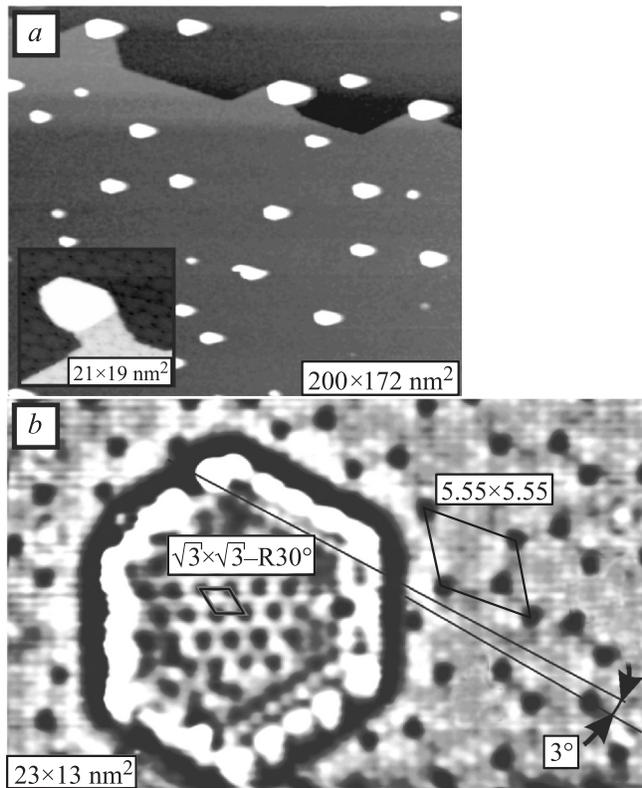
**Рис. 2.** СТМ-изображения заполненных состояний поверхности  $5.55 \times 5.55$ -Cu после осаждения 0.25 ML Co при температуре 25°C (a) и последующего отжига при температуре 500°C (b).

формирование островков силицида кобальта ввиду высокой реактивной способности Co [7].

На Si(111) модификация поверхности производилась формированием на ней реконструкции „5 × 5“-Cu, которая, как было показано

ранее [5], предотвращает образование силицида в системе Cu/Si(111), формирующегося при осаждении Cu на атомно-чистую поверхность Si(111) при КТ [8,9]. Границу раздела Co/„5 × 5“-Cu формировали путем осаждения Co на „5 × 5“-Cu при КТ с последующим отжигом. На рис. 2 показаны СТМ-изображения, полученные после осаждения 0.25 ML Co на „5 × 5“-Cu при КТ и последующего отжига при температуре 500°C. На вставке на рис. 2, *a* показано СТМ-изображение с более высоким разрешением участка поверхности ( $25 \times 21 \text{ nm}^2$ ). Детальный анализ показал, что исходная поверхность „5 × 5“-Cu не претерпевает значительных изменений. При КТ на поверхности формируется неупорядоченная шероховатая пленка. Прогрев при повышенных температурах полученной таким способом поверхности приводит к образованию шестигранных островков с ярко выраженной кристаллической огранкой. Можно отметить, что при увеличении температуры отжига с 300 до 400°C концентрация островков уменьшается почти в 2 раза, дальнейшее повышение температуры отжига с 400 до 500°C не приводит к значительному изменению концентрации островков. При повышении температуры отжига с 300 до 500°C средняя высота островков увеличивается примерно с 0.5 до 1.75 nm, а средний латеральный размер островков изменяется с 8 до 15 nm соответственно.

На рис. 3, *a* приведено СТМ-изображение, записанное вблизи края террасы после отжига при 500°C. Как видно, формирование шестигранных островков сопровождается изменением формы атомных ступеней. Изначально ровная ступень приобретает „зазубренную“ форму с островком на каждом „зубе“, при этом поверхность, примыкающая к ступени как снизу, так и сверху, сохраняет реконструкцию „5 × 5“-Cu (вставка рис. 3, *a*). Такие изменения формы атомных ступеней могут происходить в результате как перемещения атомных ступеней под действием температуры, так и массопереноса кремния из террасы в объем островка. Минимальная температура, при которой начинается перемещение атомных ступеней по поверхности кристалла Si(111), составляет около 830°C [10], что существенно выше температур отжига. Следовательно, изменение формы атомных ступеней должно свидетельствовать о массопереносе кремния, из чего следует косвенный вывод о силицидной природе островков. Островки, выросшие на краю ступеней, ничем, кроме размеров, не отличаются от остальных островков, расположенных на террасах вдали от ступеней. Однако для последних отсутствуют какие-либо свидетельства массопереноса (обычно проявляющиеся как пары „островок–ямка“). Это относится



**Рис. 3.** СТМ-изображения заполненных состояний поверхности  $5.55 \times 5.55$ –Cu после осаждения 0.15 ML Co при  $25^\circ\text{C}$  (a) и последующего отжига при температуре  $500^\circ\text{C}$  (b).

также и к островкам, полученным при низких температурах. Отсутствие массопереноса может быть объяснено эндотаксиальным механизмом роста, что характерно для системы  $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$  [11].

Исследование СТМ-изображений высокого разрешения сформированных островков показало наличие на их поверхности реконструкции с периодичностью  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ – $\text{R}30^\circ$  (рис. 3, b). Структура с периодичностью  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  соответствует силициду  $\text{Co}_2\text{Si}$  [12], что также

подтверждает факт формирования на поверхности островков силицида кобальта. На рис. 3, *b* двумя линиями показано, что островок разориентирован относительно поверхности подложки на  $3^\circ$ . Верхняя линия соответствует ориентации островка, а нижняя проведена сквозь светлые выступы на поверхности, соответствующие верхним атомам меди поверхности „ $5 \times 5$ “–Cu [8]. Из работы [8] известно, что домены реконструкции „ $5 \times 5$ “–Cu сами развернуты на тот же угол  $3^\circ$  относительно основных кристаллографических направлений кремния, т.е. формирующийся островок игнорирует ориентацию поверхностной фазы и ориентируется относительно подложки. Это предполагает разрушение исходного поверхностного силицида меди под островками и высвобождению несвязанных атомов Cu на поверхности. Следует отметить, что из условий формирования реконструкции „ $5 \times 5$ “–Cu [5] температуры образца более  $300^\circ\text{C}$  достаточно для десорбции несвязанных атомов Cu с поверхности образца.

В заключение, методом СТМ исследован рост Со, на поверхностях Si(100) и Si(111), модифицированных реконструкциями  $c(4 \times 12)$ –Al и „ $5 \times 5$ “–Cu. Показано, что при комнатной температуре формируется слабоупорядоченный слой металлического Со с сохранившимися реконструкциями в границе раздела Со/Si. При повышении температуры в системе Со/ $c(4 \times 12)$ –Al наблюдалось формирование островков Со между рядами кластеров исходной поверхности. В системе Со/„ $5 \times 5$ “–Cu происходит формирование ограниченных эндотаксиальных островков силицида кобальта с латеральными размерами порядка 15 nm и высотой от 0.5 до 1.75 nm в зависимости от температуры роста.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 08-02-00190) и выполнена в рамках научного сотрудничества УрО РАН и ДВО РАН.

## Список литературы

- [1] Eberhardt W. // Surf. Sci. 2002. V. 500. P. 242–270.
- [2] Gruznev D.V., Olyanich D.A., Avilov V.A., Zotov A.V., Saranin A.A. // Surf. Sci. 2006. V. 600. P. 4986–4991.
- [3] Олянич Д.А., Чубенко Д.Н., Грузнев Д.В., Зотов А.В., Саранин А.А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 21. С. 31–35.
- [4] Ide T., Nishimori T., Ichinokawa T. // Surf. Sci. 1989. V. 209 (3). P. 335–344.

- [5] *Zotov A.V., Gruznev D.V., Utas O.A., Kotlyar V.G., Saranin A.A.* // Surf. Sci. 2008. V. 602. P. 391–398.
- [6] *Shimizu N., Kitada H., Ueda O.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 5550.
- [7] *Chen Y., Ohlberg D.A.A., Williams R.S.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. P. 3213–3218.
- [8] *Nogami J., Liu B.Z., Katkov M.V., Ohbuchi C., Birge N.O.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 233305(1-4).
- [9] *Okino K., Matsuda L., Hobara R., Hosomura Y., Hasegawa S., Bennet P.A.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 233108 (1-3).
- [10] *Zegenhagen J., Fontest E., Grey F., Patel J.R.* // Phys. Rev. B. 1992. V. 46. P. 1860.
- [11] *Daugy E., Mathiez P., Salvan F., Layet J.M.* // Surf. Sci. 1985. V. 154. P. 267.
- [12] *Косолобов С.С., Латышев А.В.* // Вестник НГУ. 2007. Т. 2. В. 2. С. 40–50.
- [13] *Zhian He, David J., Smith, Bennet P.A.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 256102.
- [14] *Pirri C., Peruchetti J.C., Gewinner G., Bolmont D.* // Solid State Commun. 1986. V. 57. P. 361.