

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)- 5.55×5.55 -Cu в отличие от атомно-чистой поверхности Si(111) 7×7 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)- 5.55×5.55 -Cu (обозначенных далее как $c(4 \times 12)$ -Al и „ 5×5 “-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°C с последующим отжигом при температуре 1280°C . Исходные поверхности $c(4 \times 12)$ -Al и „ 5×5 “-Cu, используемые в качестве подложек для дальнейшей адсорбции Co, получали осаждением 0.5 ML Al на атомно-чистую поверхность Si(100) при температуре 600°C [4] и осаждением ~ 2 ML Cu на поверхность Si(111) при температуре 550°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°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°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).

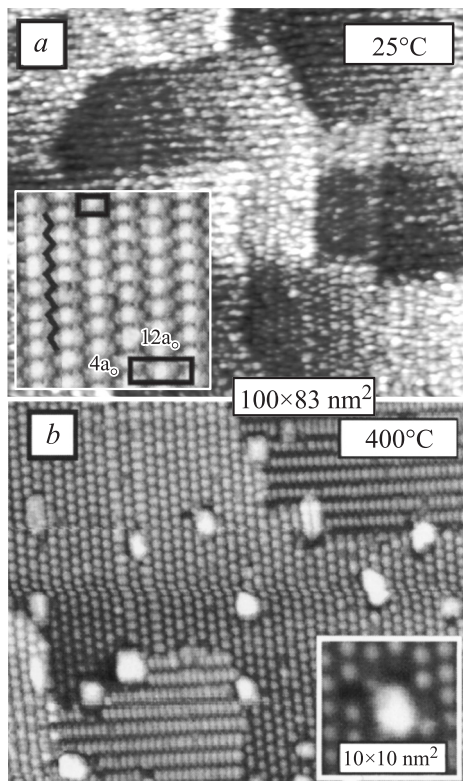


Рис. 1. СТМ-изображения заполненных состояний поверхности $c(4 \times 12)$ -Al после осаждения 0.20 ML Co при температуре: 25°C (*a*) и 400°C (*b*).

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.

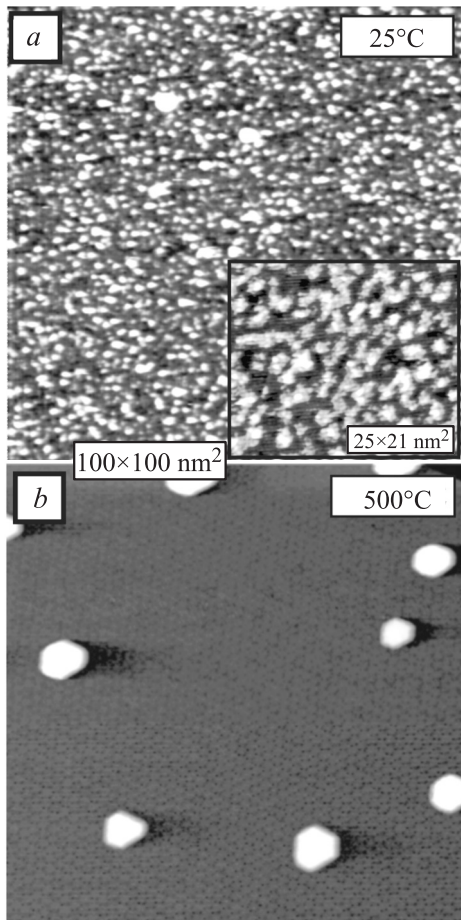


Рис. 2. СТМ-изображения заполненных состояний поверхности 5.55×5.55 -Cu после осаждения 0.25 ML Co при температуре 25°C (a) и последующего отжига при температуре 500°C (b).

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 Со на „5 × 5“-Cu при КТ с последующим отжигом. На рис. 2 показаны СТМ-изображения, полученные после осаждения 0.25 ML Со 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

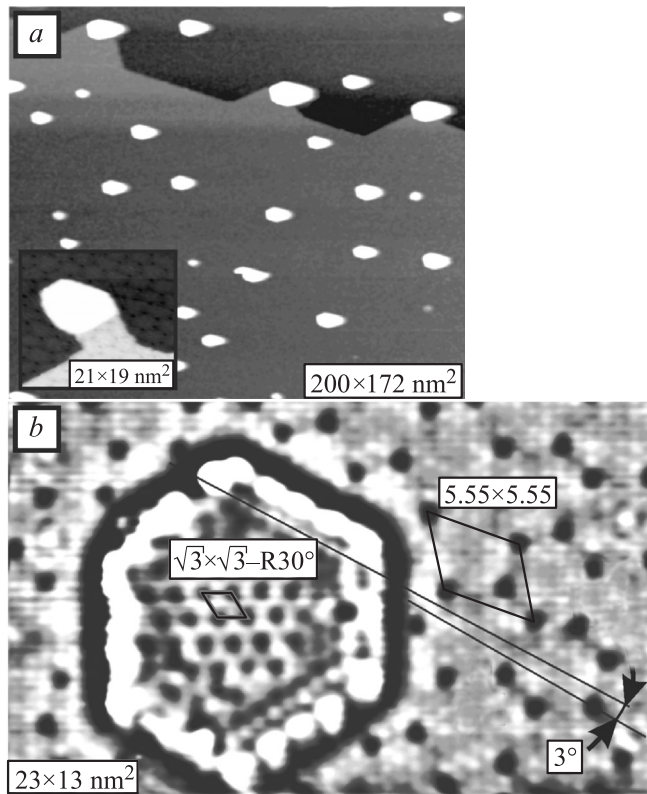


Рис. 3. СТМ-изображения заполненных состояний поверхности 5.55×5.55 –Cu после осаждения 0.15 ML Co при 25°C (a) и последующего отжига при температуре 500°C (b).

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 Co_2Si [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° . Верхняя линия соответствует ориентации островка, а нижняя проведена сквозь светлые выступы на поверхности, соответствующие верхним атомам меди поверхности „ 5×5 “–Cu [8]. Из работы [8] известно, что домены реконструкции „ 5×5 “–Cu сами развернуты на тот же угол 3° 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 „ 5×5 “–Cu [5] температуры образца более 300°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 „ 5×5 “–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/„ 5×5 “–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.