

06;11

Исследование электрической проводимости поверхностной фазы $\text{Si}(100)c(4 \times 12)\text{-Al}$ при напылении In и Al

© М.В. Лавринойтис, Д.В. Грузнев, Д.А. Цуканов, С.В. Рыжков

Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

E-mail: ryzhkov@iacp.dvo.ru

Поступило в Редакцию 15 июня 2005 г.

Методами дифракции медленных электронов, сканирующей туннельной микроскопии, четырехзондовым методом измерения электрической проводимости впервые изучена зависимость проводимости поверхностной фазы $\text{Si}(100)c(4 \times 12)\text{-Al}$ от морфологии поверхности. Показано, что образование островков адсорбата (индия и алюминия), которые действуют как центры рассеяния носителей заряда, уменьшает электрическую проводимость образцов.

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию корреляции электрической проводимости поверхностных фаз с их кристаллической структурой. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что поверхностные фазы и сверхтонкие пленки адсорбата на поверхности кремния оказывают заметное влияние на электрические свойства образца [1–4].

В настоящей работе методами дифракции медленных электронов (ДМЭ), сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), а также четырехзондовым методом измерения проводимости изучена связь проводимости и морфологии поверхности $\text{Si}(100)c(4 \times 12)\text{-Al}$ после напыления субмонослойных слоев индия и алюминия. Данная поверхностная фаза представляет собой ряды кластеров Al, расположенных вдоль направления (011) и разделенных зигзагообразными бороздами [5–7]. Покрытие алюминия в поверхностной фазе $\text{Si}(100)c(4 \times 12)\text{-Al}$ составляет 0.5 монослоя (МС) (1 монослой равен концентрации атомов верхнего слоя нереконструированной грани Si(100), т. е. 6.8×10^{14} ат./см²). Работа посвящена исследованию влияния дефектов на поверхности, а именно островков адсорбата на проводимость поверхностной фазы. Выбор для исследования поверхностной фазы $\text{Si}(100)c(4 \times 12)\text{-Al}$ продикто-

ван тем, что данная фаза характеризуется высокой проводимостью, достигающей 25% от всей проводимости образца [8], в то время как это значение для поверхностных фаз в системах Au/Si, Ag/Si, In/Si, Na/Si [9–11] составляет менее 10%, поэтому корреляция изменений проводимости и морфологии поверхности будет сильнее выражена.

Эксперименты проводились в сверхвысоковакуумной установке с базовым давлением $5 \cdot 10^{-10}$ Торг, оснащенной системой ДМЭ и устройством для измерения электрической проводимости четырехзондовым методом. В качестве подложки использовались пластины Si(100) *n*-типа ($15 \times 5 \times 0.5$) mm, легированные фосфором, с удельным сопротивлением $20 \Omega \cdot \text{cm}$. Перед помещением в камеру образцы очищали в органических растворителях. Окончательную очистку проводили в вакууме кратковременным отжигом при температуре 1550 К. Очищенные образцы показывали четкие картины ДМЭ 2×1 , характерные для чистой поверхности Si(100). Для анализа структуры и морфологии поверхности также использовали СТМ фирмы „Омикрон“. Индий осаждали из танталовой ячейки. Напыление алюминия осуществляли путем нагрева вольфрамовой проволоки, покрытой Al. Скорость напыления адсорбатов в обоих случаях составляла 0.1 монослоя в минуту. Электрическую проводимость образца измеряли четырехзондовым методом при комнатной температуре *in situ* пропусканием постоянного тока в диапазоне $10\text{--}100 \mu\text{A}$. Расстояние между зондами составляло 1.3 mm. Поверхностная фаза Si(100)*c*(4×12)–Al была сформирована в условиях сверхвысокого вакуума путем осаждения 0.5 МС алюминия на поверхность Si(100) 2×1 при комнатной температуре и последующим отжигом образца при 950 К. Затем на образец порциями напыляли In или Al.

На рис. 1 показано изменение проводимости поверхностной фазы Si(100)*c*(4×12)–Al в зависимости от количества напыленного In при комнатной температуре. В этом случае уже на самых ранних стадиях напыления In наблюдалось резкое понижение проводимости образца до уровня проводимости образца с чистой поверхностью Si(100) 2×1 . В то же время при напылении индия с последующим отжигом образца при температуре 700 К проводимость уменьшается в гораздо меньшей степени (рис. 1). Исследование поверхности In/Si(100)*c*(4×12)–Al при помощи СТМ (рис. 2, *a*) показало высокую концентрацию трехмерных островков индия при его напылении при комнатной температуре — около $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (рис. 2, *b*). Причем островки индия расположены как

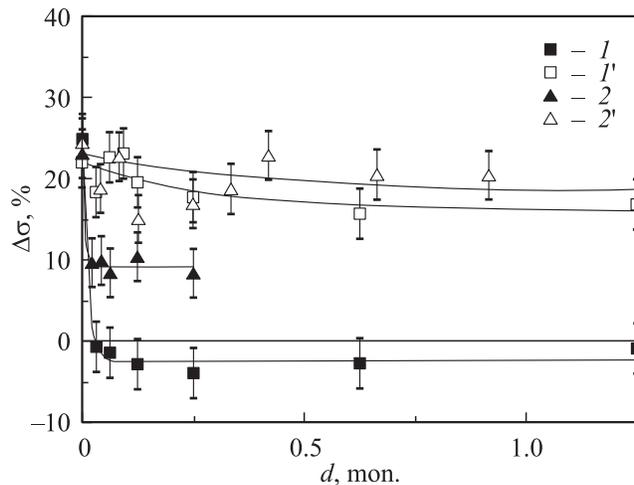


Рис. 1. Зависимость проводимости образца от количества напыленного адсорбата на поверхностную фазу $\text{Si}(100)c(4 \times 12)\text{-Al}$. Нулевое значение проводимости соответствует величине проводимости чистого кремния $\text{Si}(100)2 \times 1$ (d — покрытие, мон. — монослой). 1 — напыление In при 300 К, 1' — после отжига при 700 К. 2 — напыление Al при 300 К, 2' — после отжига при 700 К.

на ступеньках, так и на террасах. После отжига при 400 К количество островков уменьшается, они располагаются в основном на ступенях, и их концентрация составляет около $1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (рис. 2, *c*). Следует отметить, что СТМ-изображение было получено после отжига образца при 400 К, тогда как в экспериментах по измерению проводимости отжиг образца проводился при 700 К, когда перенос вещества осуществляется более интенсивно. Следовательно, в этом случае островков адсорбата на террасах должно быть еще меньше.

Для анализа изменения проводимости образца была использована следующая модель: подложка $\text{Si}(100)$ с поверхностной фазой $c(4 \times 12)\text{-Al}$, на которой расположены центры рассеяния, образованные островками атомов напыленного адсорбата. Причем в изменение проводимости дает вклад только изменение рассеяния на островках адсорбата. Другие механизмы рассеяния, например на фонах, не дают такого вклада за счет того, что в обоих случаях измерения проводимости проводились при

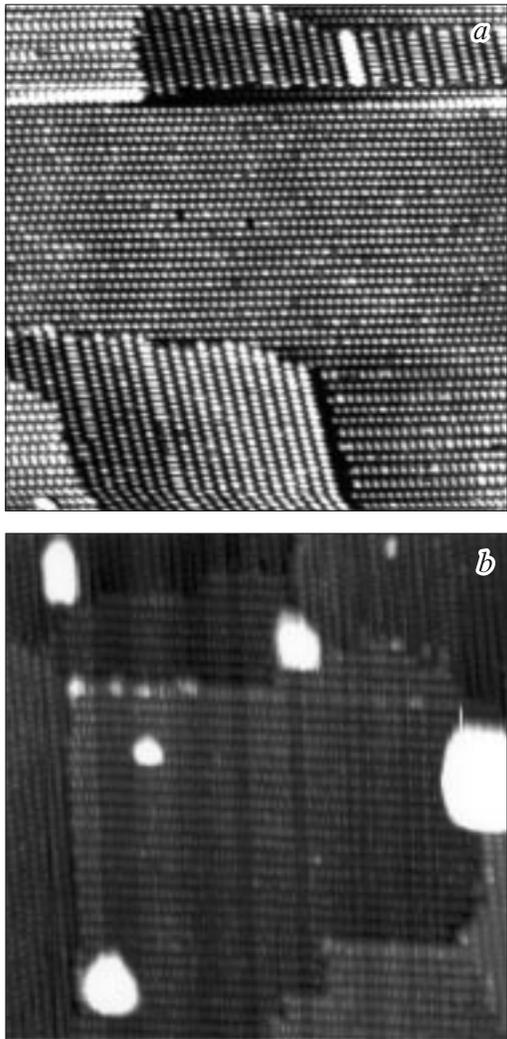


Рис. 2. СТМ-изображение (100×100 nm) в заполненных состояниях (2В) подложки кремния Si(100) с поверхностной фазой $\text{Si}(100)c(4 \times 12)-\text{Al}$ (a), после напыления на нее 0.1 МС индия при комнатной температуре (b) и после прогрева образца при 400 К (c)

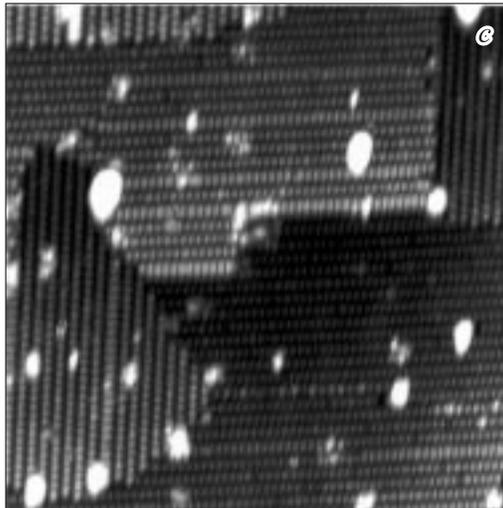


Рис. 2 (продолжение).

одинаковой (комнатной) температуре. Вклад ступеней в подвижность носителей заряда на поверхности также не учитывался, так как мы полагаем его одинаковым для случаев с отжигом образца и без отжига (используемая в экспериментах температура в 700 К слишком мала для существенной перестройки ступеней на поверхности).

Проводимость всего образца определяли как $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$, где σ_1 — проводимость объемной подложки, σ_2 — проводимость поверхностной фазы. Как хорошо известно, $\sigma = en\mu$, где e — заряд электрона, n — концентрация носителей заряда, μ — подвижность [12], которая для незаряженных центров рассеяния имеет следующий вид: $\mu = T^k m e^3 / 20 \epsilon \hbar^3 N_0$ [13], где T — температура, k — постоянная, m — масса электрона, ϵ — диэлектрическая проницаемость, \hbar — постоянная Планка, N_0 — концентрация центров рассеяния. Из этого следует, что измеренная электрическая проводимость образца обратно пропорциональна концентрации центров рассеяния.

Действительно, из рис. 1 видно, что проводимость системы $(0.1\text{MC In})/c(4 \times 12)\text{-Al}$ с большей концентрацией островков (при напылении In при комнатной температуре) меньше, чем в случае с

меньшей концентрацией островков (после отжига образца при 700 К). Следует отметить, что, хотя концентрация островков In после отжига подложки уменьшается в пять раз, проводимость увеличивается только на 20% и становится примерно равной проводимости чистого образца $\text{Si}(100)2 \times 1$. В то же время известно, что поверхностная фаза 2×1 практически не оказывает влияния на проводимость подложки [14] (менее 1% при толщине образца 20 nm) и, следовательно, в этом случае измеренная проводимость образца показывает в большей степени объемную составляющую.

Таким образом, из результатов экспериментов следует, что образование островков In на фазе $c(4 \times 12)$ -Al приводит к резкому уменьшению проводимости поверхностного слоя до величин, сравнимых с объемной составляющей за счет увеличения рассеяния электронов на образовавшихся островках адсорбата. После отжига образца $\text{Si}(100)c(4 \times 12)$ -Al со слоем напыленного индия число островков In резко уменьшается и рассеяние на них электронов перестает играть существенную роль.

При напылении на поверхностную фазу $\text{Si}(100)c(4 \times 12)$ -Al атомов алюминия при комнатной температуре так же наблюдалось понижение электрической проводимости на начальной стадии напыления адсорбата (рис. 1). Известно, что рост алюминия на поверхностной фазе $\text{Si}(100)c(4 \times 12)$ -Al так же имеет островковый характер [15], как и в случае роста In, и концентрация островков Al в этом случае составляет около $1 \cdot 10^{12}, \text{cm}^{-2}$. Хотя концентрация островков Al больше, чем в случае напыления In при комнатной температуре, измеренная проводимость образца оказалась несколько выше. Возможно, это обусловлено тем, что атомы Al образуют не трехмерные бесформенные островки, как In, а кристаллиты правильной формы [16]. После отжига при 700 К концентрация островков Al уменьшается до $2 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2}$, а проводимость образца возрастает почти до уровня проводимости начальной фазы $c(4 \times 12)$ -Al, как и в случае с напылением In.

Таким образом, полученные результаты показывают, что напыление In и Al на поверхностную фазу $\text{Si}(100)c(4 \times 12)$ -Al приводит к образованию на ней островков адсорбата, которые действуют как центры рассеяния носителей заряда и уменьшают электрическую проводимость образца. При прогреве образца с напыленным индием или алюминием атомы адсорбата собираются в более крупные островки, что уменьшает концентрацию центров рассеяния носителей заряда и соответственно увеличивает величину проводимости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 04-02-08242, 05-02-17823), Программы „Университеты России“ (грант УР 01.01.052), Программы президента РФ по поддержке научных школ РФ (грант № НШ-1369.2003.2).

Список литературы

- [1] *Bauerle F., Monch W., Henzler M.* // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 10. P. 3917–3919.
- [2] *Kimberlin K.R., Tringides M.C.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1995. V. 13. N 2. P. 462–466.
- [3] *Hasegawa S., Tong X., Takeda S.* et al. // Progress in Surface Science. 1999. V. 60. P. 89–257.
- [4] *Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V., Hasegawa S.* et al. // Phys. Low-Dim. Struct. 1999. V. 7/8. P. 149–154.
- [5] *Shimizu N., Kitada H., Ueda O.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 5550–5553.
- [6] *Shimizu N., Kitada H., Ueda O.* // J. Cryst. Growth. 1995. V. 150. P. 1159–1163.
- [7] *Oshima Y., Hirata T., Yokoyama T., Hirayama H.* et al. // Surf. Sci. 2000. V. 465. P. 81–89.
- [8] *Ryjkov S.V., Nagao T., Lifshits V.G.* et al. Influence of surface structures on electrical conductivity // WE-Heraeus-Seminar: „2D Conductivity in Surfaces States and Monolayers“. 2001, 5–8 March. Bad Honnef, Germany.
- [9] *Tsoukanov D.A., Ryzhkov S.V., Gruznev D.V.* et al. // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 162–163. P. 168–171.
- [10] *Jiang C.-S., Hasegawa S., Ino S.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 10389–10392.
- [11] *Ryzhkov S.V., Tsukanov D.A., Gruznev D.V.* et al. // Phys. Low-Dim. Struct. 1999. V. 7/8. P. 7–16.
- [12] *Киттель Ч.* Введение в физику твердого тела. М., 1978. 790 с.
- [13] *Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г.* Физика полупроводников. М., 1990. 688 с.
- [14] *Yoo K., Weitering H.H.* // Surf. Sci. 2001. V. 482–485. P. 482–487.
- [15] *Ito S., Nishida A., Murata Y.* et al. // Surf. Sci. 2004. V. 565. N 2–3. P. 121–128.
- [16] *Ito S., Kubo O., Yamaoka N.* et al. // Japan J. Appl. Phys. 2003. V. 42. P. L432–L434.