

10;11;12

## Кристаллическое строение кластеров серебра, сформированных на поверхности Si(100) – 2 × 1

© М.В. Гомоюнова, И.И. Пронин, Н.С. Фараджев

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 12 декабря 1997 г.

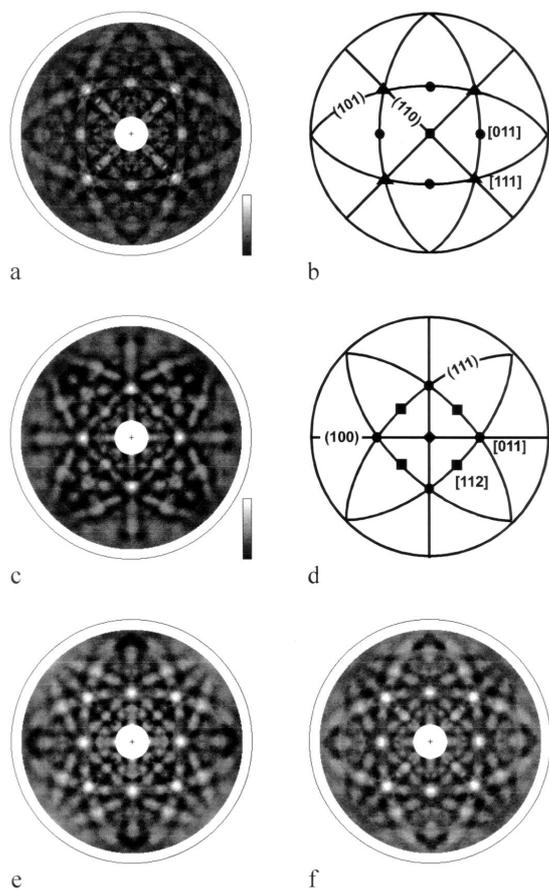
Методом дифракции квазиупругорассеянных электронов средней энергии исследовано кристаллическое строение кластеров серебра, сформированных на поверхности монокристалла Si(100)–2×1 путем отжига тонкой пленки Ag, нанесенной на слегка подогретый кристалл. Моделирование полученной при энергии 2keV дифракционной картины показало, что формирующиеся на кремнии островки серебра имеют упорядоченную структуру, соответствующую объемному серебру, и фиксированную ориентацию относительно подложки: грань Ag(100) || Si(100), и [100]<sub>Ag</sub> || [100]<sub>Si</sub>.

Развитие метода дифракции квазиупругорассеянных электронов (КУРЭ) средней энергии [1–3] открыло возможность исследования атомной структуры объектов, не обладающих дальним порядком. В полной мере это относится к изучению атомного строения кластеров (островков) чужеродных веществ, формируемых на поверхности различных монокристаллов. В частности, такая возможность была использована в работе [4] для изучения кристаллической структуры островков серебра, формируемых на поверхности кристалла Si(111)–7 × 7. Представляет интерес выяснить атомную структуру кластеров серебра, образующихся и на другой основной грани кремния — Si(100)–2 × 1. В отличие от системы Ag/Si(111), широко исследовавшейся в течение многих лет различными поверхностно-чувствительными методами, процессам роста пленок серебра на грани Si(100)–2 × 1 и формированию на ней островков уделялось значительно меньше внимания. Это связано с более сложным механизмом роста пленки Ag на начальной ее стадии [5–8]. Интерес к системе Ag/Si(100)–2 × 1 возрос в последние три-четыре года, однако до настоящего времени не все аспекты этой системы поняты достаточно хорошо и многие из полученных для нее

результатов остаются противоречивыми [5–11]. Следует заметить, что основным методом исследования и источником информации большинства работ последних лет была сканирующая туннельная микроскопия, так что выводы, касающиеся атомного строения кластеров серебра, базируются главным образом на структурных данных, характеризующих лишь верхний монослой. Кроме того, согласно [12], взаимодействие острия с пленкой серебра может быть достаточно сильным и исказить исходную морфологию пленки. Поэтому целью настоящей работы было изучить кристаллическую структуру островков Ag, образующихся на грани Si(100)– $2 \times 1$ , прямым методом, используя дифракцию КУРЭ средней энергии.

Измерения проведены во вторично-электронном спектрометре с угловым разрешением, описанным в [13]. Энергетическое разрешение анализатора составляло 0.4%, а угловое разрешение —  $1^\circ$ . Сведения по методике получения дифракционных картин в виде двумерных карт распределения интенсивности КУРЭ по полярному и азимутальным углам вылета изложены в [14]. Очистка поверхности монокристалла кремния проводилась его высокотемпературным прогревом в сверхвысоком вакууме. Элементный состав поверхности, а также толщина нанесенного слоя серебра контролировались методом электронной Оже-спектроскопии. Серебро наносилось сублимационным способом на поверхность кристалла, имеющего температуру около  $60^\circ\text{C}$ . Для образования кластеров Ag образец подвергался кратковременному отжигу до температуры  $500^\circ\text{C}$ . Дифракционные картины снимались при комнатной температуре в вакууме  $5 \times 10^{-10}$  Торр.

Картина дифракции КУРЭ, полученная для Si(100)– $2 \times 1$  при энергии 2 keV, показана на рисунке, *a*. Она наглядно демонстрирует анизотропный характер отражения электронов от монокристалла Si(100) и резко отличается от картины для грани Si(111), полученной нами ранее [15]. Как хорошо видно из сопоставления приведенной картины со стереографической проекцией грани кремния (100), показанной на рисунке, *b*, симметрия картины отражает симметрию этой грани. Более детально этот вопрос будет проанализирован в другой работе, здесь же мы лишь укажем, что основной механизм формирования обсуждаемой картины связан с эффектом фокусировки КУРЭ и главные ее дифракционные максимумы и полосы повышенной интенсивности соответствуют вылету электронов вдоль наиболее плотноупакованных направлений ( $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ) и плоскостей ( $\{110\}$ ) кристаллической решетки кремния.



*a* — картина дифракции квазиупругорассеянных электронов с энергией 2 keV для Si(100) —  $2 \times 1$ ; *b* — стереографическая проекция грани Si(100) с обозначением плотноупакованных плоскостей {110}; *c* — дифракционная картина для эпитаксиальной пленки серебра толщиной 25 Å, сформированной на грани Si(100) —  $2 \times 1$ ; *d* — стереографическая проекция грани Ag(100) с обозначением плотноупакованных плоскостей {100} и {111}; *e* — дифракционная картина для подложки, покрытой кластерами серебра (степень покрытия 12%); *f* — результат численного моделирования картины *e*.

Дифракционная картина, полученная для пленки серебра толщиной 25 Å, приведена на рисунке, *c*. Видно, что напыление серебра на поверхность монокристалла Si(100) –  $2 \times 1$  не меняет симметрии картины, которая сохраняет ось вращения четвертого порядка. Вместе с тем наблюдается значительное перераспределение интенсивности КУРЭ в пределах всего поля картины. Из сравнения данных рисунка, *a* и *c* следует, что если для Si(100) наиболее яркие максимумы ориентированы вдоль направлений, составляющих угол  $55^\circ$  с нормалью к поверхности, и расположены в пределах Кикучи-полос, составляющих углы  $45^\circ$  и  $135^\circ$  с горизонтальной линией, то для пленки Ag наиболее интенсивные дифракционные пятна наблюдаются при  $\theta = 45^\circ$  и находятся на вертикальной и горизонтальной полосах повышенной интенсивности. Исходя из симметрии полученной картины, можно предположить, что нанесенный слой серебра представляет собой эпитаксиальную пленку Ag(100). Сопоставление основных дифракционных особенностей Кикучи-картины (см. рисунок, *c*) со стереографической проекцией грани (100) ГЦК-кристалла, которая приведена на рисунке, *d*, свидетельствует в пользу такого вывода. Хорошо видно, что основные максимумы и полосы повышенной интенсивности рассматриваемой дифракционной картины действительно наблюдаются вдоль наиболее плотноупакованных направлений  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 112 \rangle$ , а также плоскостей  $\{100\}$  и  $\{111\}$  ГЦК-кристалла.

Отжиг сформированной пленки Ag до температуры  $T \approx 500^\circ\text{C}$ , когда уже начинается десорбция атомов серебра с поверхности образца, видоизменяет ее дифракционную картину. Наряду с сохраняющимися дифракционными особенностями, характерными для Ag(100), в ней проявляются и черты дифракционной картины, свойственной подложке. Малость наблюдаемого при этом Оже-пика серебра свидетельствует о том, что если бы этот сигнал был обусловлен однородной сплошной пленкой, то ее толщина соответствовала бы субмонослойному покрытию. Легко понять, что в этом случае мы не могли бы увидеть дифракционную картину, характерную для массивной пленки серебра. Из этих данных следует, что, так же как и в случае системы Ag/Si(111) [4], на поверхности кристалла Si(100) формируются кластеры серебра и наблюдаемая дифракционная картина является суперпозицией картин от подложки и островков серебра. При этом если на поверхности Si(111) образовывались островки Ag(111), то на Si(100) наблюдаются кластеры Ag(100) с характерной для них ориентацией относительно подложки:  $[100]_{\text{Ag}} \parallel [100]_{\text{Si}}$ .

Результаты численного моделирования рассматриваемой дифракционной картины, проведенного подобно тому, как это было сделано для системы Ag/Si(111) в [4] с использованием  $R_2$ -фактора (фактора надежности, описывающего отклонение расчетной картины от измеренной) для определения площади, занимаемой кластерами Ag на поверхности кремния, показаны на рисунке, *f*. В данном случае также обнаруживается хорошее согласие между результатами эксперимента и расчета. При этом из полученных результатов следует, что кластеры серебра занимают около 12% площади подложки.

Таким образом, структура исходной поверхности кристалла кремния может оказывать существенное влияние на характер эпитаксиального роста пленки серебра и формируемых на его поверхности кластеров серебра. При напылении Ag на слегка подогретый кристалл Si(100) –  $2 \times 1$  на его поверхности растет эпитаксиальная пленка Ag(100) со структурой объемного серебра. Отжиг этой пленки до температур, при которых происходит частичная десорбция атомов Ag, сопровождается образованием на поверхности кремния островков Ag(100) с преимущественной ориентацией по азимуту, при которой направление  $\langle 100 \rangle_{\text{Ag}}$  параллельно направлению  $\langle 100 \rangle$  подложки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 96–02–17966.

## Список литературы

- [1] *Chambers S.A.* // Surf. Sci. Rep. 1992. V. 16. P. 261–331.
- [2] *Erbudak M., Hochstrasser M., Wetli E.* // Modern Phys. Lett. B. 1994. V. 8. N 28. P. 1759–1769.
- [3] *Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Фараджев Н.С.* и др. // ФТТ. 1994. Т. 36. В. 8. С. 2295–2301.
- [4] *Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Фараджев Н.С.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 12. С. 62–66.
- [5] *Winau D., Itoh H., Schmid A.K., Ichinokawa T.* // Surf. Sci. 1994. V. 303. N 1. P. 139–145.
- [6] *Lin X.F., Wan K.J., Nogami J.* // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. N 16. P. 10947–10950.
- [7] *Doraiswamy N., Jayaram G., Marks L.D.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. N 15. P. 10167–10170.
- [8] *Kimura Y., Takayanagi K.* // Surf. Sci. 1992. V. 276. N 1. P. 166–175.

- [9] *Lin X.F., Wan K.J., Nogamy J.* // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. N 11. P. 7385–7393.
- [10] *Shivaprasad S.M., Abukava T., Yeom H.W., Nakamura M., Susuki S., Sato S., Sakamoto K., Sakamoto T., Kono S.* // Surf. Sci. 1995. V. 344. N 2. P. L1245–L1251.
- [11] *Winau D., Itoh H., Schmid A.K., Ichinokawa T.* // J. Vac. Sci. Techn. B. 1994. V. 12. N 3. P. 2082–2085.
- [12] *Hashizume T., Hamers R.J., Demuth J.E., Market K., Sakurai T.* // J. Vac. Sci. Techn. A. 1990. V. 8. P. 249–25.
- [13] *Пронин И.И., Гомоюнова М.В., Бернацкий Д.П., Заславский С.Л.* // ПТЭ. 1982. В. 1. С. 175–179.
- [14] *Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Фараджев Н.С.* // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. В. 7(1). С. 311–321.
- [15] *Пронин И.И., Фараджев Н.С., Гомоюнова М.В.* // ФТТ. 1997. Т. 39. В. 4. С. 752–757.