

10;11;12

## Визуализация структурной перестройки пленки серебра на кремнии

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

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

Поступило в Редакцию 2 декабря 1996 г.

В работе эффект фокусировки электронов средней энергии использован для визуализации термоактивированной перестройки тонкой (толщиной 6 монослоев) пленки серебра, напыленной на Si(111)-7×7 при комнатной температуре. Показано, что исходная неотожженная пленка состоит из доменов Ag(111) двух типов, разориентированных по азимуту на 180°. Прогрев образца до температуры 350–400 °С приводит к рекристаллизации пленки, в результате которой формируется однодоменная эпитаксиальная пленка Ag(111).

Вопрос о закономерностях роста пленки серебра на поверхности монокристаллического кремния и формировании ее атомной структуры уже в течение многих лет привлекает внимание исследователей [1–3]. Более того, данная система, компоненты которой не смешиваются в области контакта, стала модельной при изучении процесса образования межфазовой границы металл/полупроводник. До настоящего времени, однако, не все особенности указанных процессов всесторонне изучены. Так, не исследована эволюция кристаллической структуры достаточно толстой сплошной пленки, конденсированной на Si(111)-7×7 при комнатной температуре, при ее трансформации в островковую пленку. Восполнению этого пробела и посвящена настоящая работа.

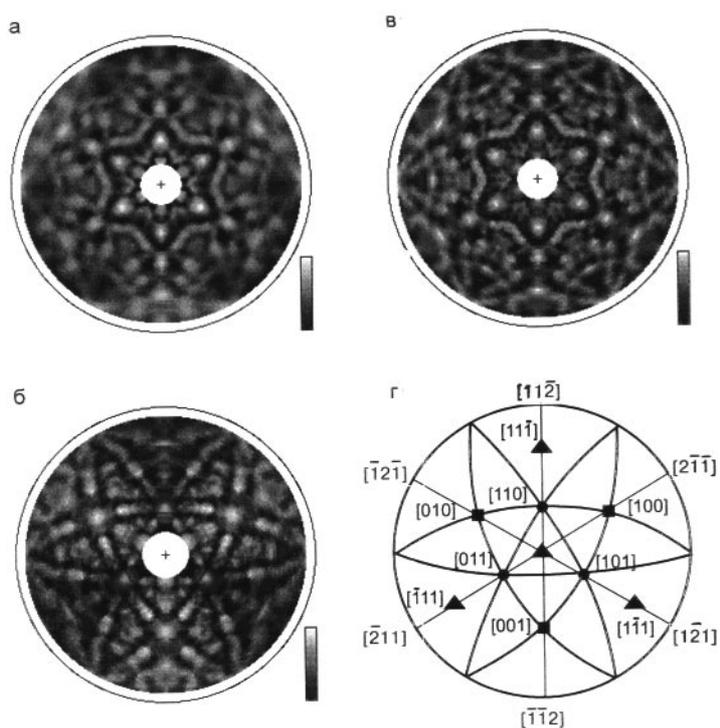
Для решения задачи был привлечен новый разработанный нами метод структурного анализа поверхности. Он основан на эффекте фокусировки квазиупругорассеянных электронов средней энергии и позволяет визуализировать кристаллическую структуру нескольких приповерхностных монослоев изучаемого объекта [4,5].

Измерения проведены во вторично-электронном спектрометре с угловым разрешением [6]. Энергетическое разрешение анализатора составляло 0.4%, а угловое — 1°. Дифракционные картины квазиупругорассеянных электронов (кикучи-картины) были получены при энергии 2 кэВ путем автоматической регистрации азимутальных угловых рас-

пределений  $I(\varphi)$  практически во всей полусфере отражения электронов. Очистка поверхности монокристалла кремния производилась его кратковременным прогревом в сверхвысоком вакууме при температуре  $1200^\circ\text{C}$ . Элементный состав поверхности контролировался методом электронной Оже-спектроскопии, которая также использовалась для определения толщины напыленной пленки серебра. Для исследования термоактивированных процессов использовались трехминутные отжиги образца при повышающихся температурах. Кикучи-картины снимались в промежутках между ними при комнатной температуре в вакууме  $5 \times 10^{-10}$  Тор.

На рисунке, *a* показана дифракционная картина, полученная непосредственно после напыления пленки серебра толщиной  $18\text{\AA}$  на подложку, находящуюся при комнатной температуре. На рисунке центр круга обозначает нормаль к поверхности образца, а внешняя окружность соответствует ориентации вылетающих электронов вдоль поверхности. Интенсивность разных точек картины указана с помощью линейной шкалы серых оттенков (она приведена справа), в которой максимальному отражению соответствует белый цвет, а минимальному — черный. Видно, что картина четко структурирована. В ней преобладают элементы симметрии шестого порядка. Например, это проявляется для наиболее сильно выраженных максимумов при  $\Theta = 35^\circ$ , повторяющихся через  $60^\circ$  по азимуту. Общий вид такой картины сохраняется до температур отжига пленки, равных примерно  $300^\circ\text{C}$ .

Качественные изменения дифракционной картины обнаруживаются при нагреве образца до температуры  $T = 350\text{--}400^\circ\text{C}$ . Это хорошо видно из рисунка, *б*, где приведена соответствующая кикучи-картина. В отличие от прежней она обладает четкой симметрией третьего порядка. Следует отметить, что основные максимумы интенсивности рассматриваемых картин вызваны фокусировкой электронов вдоль определенных цепочек атомов кристалла и показывают их ориентацию в реальном пространстве. В результате дифракционные картины могут рассматриваться как аналоги стереографических проекций. Поэтому целесообразно сопоставить картину рисунка, *б* со стереографической проекцией грани  $\text{Ag}(111)$ , также обладающей тройной симметрией (см. рисунок, *г*). Обращает на себя внимание совпадение основных максимумов картины рисунка, *б* с ориентацией наиболее плотноупакованных кристаллографических направлений, показанных на рисунке, *г*. Это позволяет сделать вывод о том, что после отжига образца до



*a* — кичучи-картина для пленки серебра толщиной  $18\text{\AA}$ , нанесенной на Si(111)- $7\times 7$  при комнатной температуре; данные представлены в виде двумерной карты распределения интенсивности  $I(\theta, \varphi)$  квазиупругого рассеяния электронов с энергией  $2\text{кэВ}$  по полярному и азимутальному углам вылета и показаны в стереографической проекции; *b* — аналогичная кичучи-картина для пленки серебра, подвергнутой отжигу; *c* — результат моделирования картины *a*; *d* — стереографическая проекция грани Ag(111); линиями обозначены плотноупакованные плоскости  $\{100\}$  и  $\{110\}$  кристалла.

$T = 350\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$  на поверхности Si(111) формируется эпитаксиальная пленка Ag(111) ГЦК-структуры.

Полученный результат может служить отправной точкой и для интерпретации картины рисунка, *a*. В самом деле, анализ ее основных особенностей позволяет предположить, что она является суперпозицией

двух картин, одна из которых совпадает с только что рассмотренной картиной рисунка *б*, а вторая подобна ей, но развернута по азимуту на  $180^\circ$ . Заметим, что это равнозначно предположению о сосуществовании на поверхности кремния доменов двух типов, различающихся последовательностью упаковки слоев атомов серебра (АВСАВ... и АСВАС...). Для проверки этой гипотезы мы провели численное моделирование картины рисунка *а*, предполагая, что интенсивность квазиупругого рассеяния электронов  $I(\theta, \varphi)$  в каждой ее точке, задаваемой углами  $\theta$  и  $\varphi$ , равна:

$$I(\theta, \varphi) = \alpha I_1(\theta, \varphi) + (1 - \alpha) I_2(\theta, \varphi),$$

где  $I_1(\theta, \varphi)$  — интенсивность картины, создаваемой доменами первого типа (рисунок *б*);  $I_2(\theta, \varphi)$  — интенсивность картины от доменов второго типа; а  $\alpha$  — варьируемый параметр, обозначающий статистический вес доменов первого типа. Доля поверхности, занятой доменами первого типа (оптимальное значение  $\alpha$ ), была определена путем минимизации фактора надежности ( $R_2$ -фактора), широко используемого для оценки расхождения теории и эксперимента. Она оказалась равной  $(52 \pm 2)\%$ , при этом величина  $R_2$  составила 0.006.

Результат моделирования рассматриваемой кичуки-картины представлен на рисунке *в*. Видно очень хорошее согласие расчета и эксперимента. Отсюда следует, что сформированная при комнатной температуре пленка действительно состоит из доменов Ag(111) двух типов, развернутых по азимуту на  $180^\circ$ . Заметим, что сосуществование таких доменов в пленке, напыленной при комнатной температуре, наблюдалось и в других работах, но при использовании более сложных методов — рассеяния ионов [7] и фотоэлектронной спектроскопии с высоким энергетическим и угловым разрешением [8]. Однако термически активированная перестройка пленки с формированием однодоменной структуры Ag(111) в настоящей работе обнаружена впервые. До сих пор в литературе лишь отмечалось, что в изученном нами температурном интервале (когда еще нето заметной термодесорбции Ag) наблюдаются только изменения морфологии пленки, проявляющиеся в формировании островковой структуры [2]. Наши же данные однозначно доказывают, что этот процесс сопровождается и рекристаллизацией пленки. Полученные результаты также показывают перспективность приложения развитого нами метода для визуализации различных структурных перестроек в приповерхностных слоях твердого тела.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 96–02–16909.

## Список литературы

- [1] *Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V.* Surface Phases on Silicon. Preparation, structure and properties. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 454 p.
- [2] *Yasegawa S., Daimon H., Ino S.* // Surf. Sci. 1987. V. 186. P. 138–162.
- [3] *Le Lay G.* // Surf. Sci. 1983. V. 132. N 1. P. 169–204.
- [4] *Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Фараджев Н.С.* и др. // ФТТ. 1994. Т. 36. N 8. С. 2295–2301.
- [5] *Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Фараджев Н.С.* // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. В. 1(7). С. 311–321.
- [6] *Пронин И.И., Гомоюнова М.В., Бернацкий Д.П.* и др. // ПТЭ. 1982. № 1. С. 175–179.
- [7] *Sumimoto K., Tanaka K., Izawa Y.* et al. // Appl. Surf. Sci. 1989. V. 41–42. P. 112–119.
- [8] *DeSeta M., Avila J., Franco N.* et al. // Europhysics Conference Abstracts, 16th European Conference on Surface Science, Genova (Italy), 9–13 September 1996, TuAP52.