

05;11

## Самоподобие в структуре рельефа деформированной поверхности

© Н.Н. Горобей, С.А. Князев, В.Е. Корсуков,  
А.С. Лукьяненко, Б.А. Обидов, В.Е. Харциев

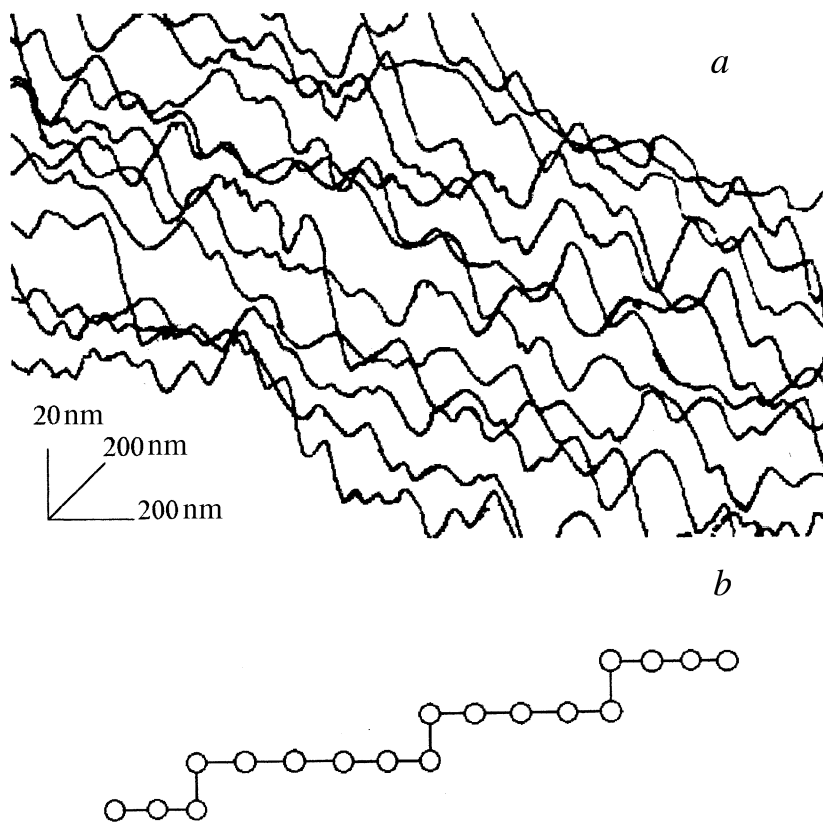
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: Vjacheslav.Korsukov@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 27 августа 2001 г.

Двумя методами — методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и методом дифракции медленных электронов (ДМЭ) обнаружено образование шероховатости на деформированной поверхности Ge (111). При этом геометрические параметры шероховатости — ее латеральные и вертикальные размеры в исследованном интервале нагрузок находятся в определенной пропорции — 5 : 1. Высказано предположение о диффузионном механизме формирования указанной структуры рельефа поверхности.

Впервые метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) для изучения влияния двухосного растяжения на рельеф поверхности Ge (111) использован нами в работе [1]. Обнаружен значительный эффект действия механической нагрузки, выражающейся в росте шероховатости по всей сканируемой поверхности. Эффект носит пороговый характер и в значительной степени обратим относительно нагрузки. Максимальные достигнутые в этих опытах масштабы шероховатости таковы: десятки нанометров по вертикали и сотни нанометров в латеральных направлениях. Данная работа посвящена более детальному изучению геометрических параметров шероховатости на разных масштабных уровнях не только методом СТМ, но также методом дифракции медленных электронов (ДМЭ).

Методики приготовления образцов и проведения экспериментов с нагружением *in situ* в сканирующем туннельном микроскопе описаны в [1]. Топография деформированной поверхности Ge (111) в стационарном режиме (после часовой стадии роста) приведена на рис. 1, а. Видно, что шероховатость, помимо указанного выше максимального, имеет и более мелкомасштабные уровни структуры. Повышение разрешения микроскопа позволяет выявить еще более мелкие детали рельефа.



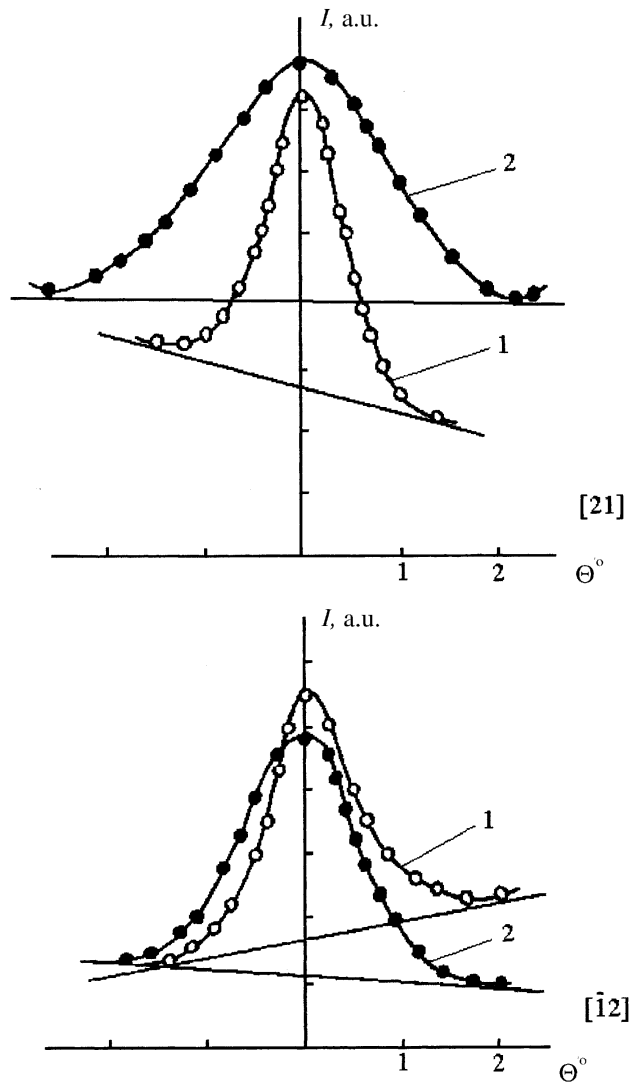
**Рис. 1.** *a* — рельеф механически нагруженной поверхности Ge (111),  $\sigma = 0.1$  GPa; *b* — ступенчатая структура рельефа на атомном уровне.

При этом, как показывает анализ, угол наклона деталей рельефа на всех масштабных уровнях не превышает  $10^\circ$  (общий наклон рельефа обусловлен малым наклоном образца — порядка  $1^\circ$ ). Если принять во внимание, что рельеф кристаллической поверхности на атомном уровне представляет собой ступенчатую структуру (в основном с одноатомными ступеньками), как показано на рис. 1, *b*, то указанная максимальная крутизна соответствует следующей пропорции между

шириной террас и высотой ступенек — 5 : 1. Наличие этой пропорции на разных масштабных уровнях указывает на определенную степень самоподобия рельефа деформированной поверхности Ge (111). Однако разрешающая способность нашего микроскопа не позволяет с полной уверенностью экстраполировать обнаруженную пропорцию вплоть до атомного уровня.

Атомный уровень разрешения в этой задаче удалось достичь с использованием метода ДМЭ. Ранее этим методом [2] нами были изучены особенности упругой деформации и разрушения грани Ge (111) при ее двухосном растяжении. Здесь мы обсудим еще один эффект действия нагрузки на картины ДМЭ — анизотропное уширение дифракционных рефлексов. На рис. 2 показаны угловые профили одного из рефлексов, полученные его фотометрированием в двух взаимно перпендикулярных азимутальных направлениях. Видно, что в направлении [21] угловая ширина рефлекса на деформированной поверхности примерно втрое превышает исходную, тогда как в перпендикулярном направлении уширение практически отсутствует. Было также выяснено, что величина уширения неодинакова для разных рефлексов на картине дифракции и немонотонно зависит от энергии электронного пучка.

В основу нашей интерпретации этого эффекта анизотропного уширения положена теория Хенслера [3] электронной дифракции на периодическом ступенчатом рельефе поверхности. Согласно этой теории, на поверхности с периодически гофрированным рельефом должно наблюдаться периодическое (в зависимости от энергии электронов) раздвоение дифракционных рефлексов. Амплитуда этого раздвоения определяется углом рассеяния электронного пучка для выбранного рефлекса, а также геометрическими параметрами ступенчатой структуры. В нашем случае ступенчатая структура, очевидно, не является регулярной, так что раздвоение рефлексов сводится к их эффективному уширению. Если изучаются рефлексы, которым соответствуют малые углы рассеяния, как в нашем случае, уширение практически нечувствительно к высоте ступеней и определяется в основном шириной террас. Оценка средней ширины террас по экспериментально наблюдаемому уширению (рис. 2) с использованием теории Хенслера дает величину порядка 30 Å, что составляет примерно пять постоянных решетки. Если взять, как наиболее вероятную, одноатомную высоту ступеней, получим ту же самую пропорцию — 5:1. Однако теперь речь идет о рельефе деформированной поверхности Ge (111) на атомном уровне



**Рис. 2.** Угловые профили одного из дифракционных рефлексов в двух взаимно перпендикулярных азимутальных направлениях: 1 —  $\sigma = 0$ , 2 —  $\sigma = 0.3$  ГПа.

разрешения. Таким образом, метод ДМЭ подтверждает образование шероховатости на деформированной поверхности, причем примерно с теми же геометрическими пропорциями, которые были обнаружены в СТМ-топограммах. Что касается азимутальной ориентации ступенчатой структуры, наблюдаемой методом ДМЭ, то мы ее связываем в основном с углом вицинальности исследуемой поверхности, который в нашем случае составляет примерно  $0.5^\circ$ .

В качестве одного из физических механизмов формирования шероховатости на механически деформированной поверхности мы рассматриваем поверхностную самодиффузию. Прежде отметим, что образование шероховатости является одним из каналов сброса упругой энергии, если более выгодными не оказываются другие каналы, в частности, пластическая деформация [4]. Мы считаем, что в рассматриваемой области нагрузок на грани Ge [111] пластические эффекты, если и имеют место [5], то не являются определяющими. Об этом свидетельствует также обратимость эффекта относительно нагрузки. В то же время механическая нагрузка является фактором, усиливающим в том числе диффузионный массоперенос, если на поверхности имеются концентраторы напряжений в виде достаточно протяженных в латеральных направлениях особенностей рельефа. Например, адслои (неполностью заполненный атомный слой) на деформированной поверхности (подложке) оказывается сильно деформированным на краях. Речь идет о деформации несоответствия, которая в основном является сдвиговой, но имеют место также и растяжения. Порядок эффекта таков: при средней деформации подложки  $\varepsilon_0 \sim 0.1\%$  на краю адслоя имеем: для сдвиговой деформации  $\varepsilon \sim 10\%$ , для растяжения —  $\varepsilon \sim 1\%$ . Эти деформации являются критическими как для образования дислокаций несоответствия, так и для интенсивного зарождения адатомов, участвующих в диффузионном массопереносе на поверхности. Подчеркнем, что такие концентрации напряжений возникают только на достаточно протяженных в латеральных направлениях особенностях рельефа (порядка нескольких сотен нанометров для  $\sigma \sim 0.1$  GPa).

Таким образом, двухосное растяжение поверхности Ge (111) приводит к образованию на ней шероховатости с определенными геометрическими параметрами. Латеральные размеры ограничены сотнями нанометров, а вертикальные размеры таковы, что на всех масштабных уровнях выполняется определенная пропорция в крутизне элементов

шероховатости — 5 : 1. Если верно наше предположение о диффузионном механизме формирования шероховатости в механическом силовом поле, то ограничение наклона атомной ступенчатой структуры следует искать в известном эффекте отталкивания ступенек [6], который вносит элементы нелинейности в диффузионную кинетику. Следовательно, самоподобие в структуре рельефа деформированной поверхности возникает в результате самоорганизации в стохастическом процессе диффузионного массопереноса.

Аналогичный эффект формирования шероховатости наблюдается в эпитаксиальных слоях с несоответствием решеток слоя и подложки [7,8].

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты NN 99-02-18287 и 2000-00-00482).

## Список литературы

- [1] Журков С.Н., Корсуков В.Е., Лукьяненко А.С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 6. С. 324–326.
- [2] Корсуков В.Е., Лукьяненко А.С., Назаров Р.Р. и др. // Поверхность. 1988. № 2. С. 69–76.
- [3] Henzler M. // Surf. Sci. 1978. V. 73. P. 240–245.
- [4] Tersoff J., Le Goues F.K. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 72. N 22. P. 3570–3573.
- [5] Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 279 с.
- [6] Erlenbacher J., Aziz M.J., Chason E. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 25. P. 5800–5803.
- [7] Snyder C.V., Orr B.G., Kessler D. et al. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. N 23. P. 3032–3035.
- [8] Shutter P., Lagally M.G. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 20. P. 2035–2038.