

05;11

## Особенности дефектообразования на деформируемой (111) поверхности кремния

© В.И. Бетехтин, Н.Н. Горобей, В.Е. Корсуков, А.С. Лукьяненко, Б.А. Обидов, А.Н. Томилин

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

Поступило в Редакцию 22 мая 2002 г.

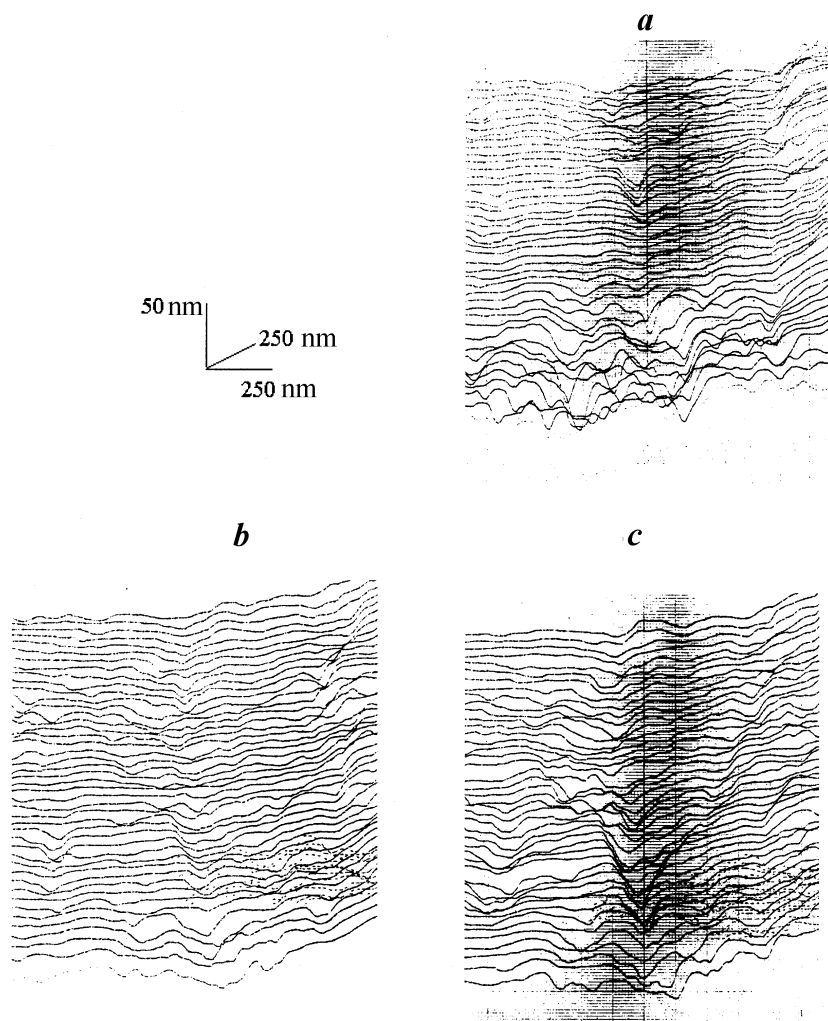
Методом сканирующей туннельной микроскопии изучается динамика рельефа грани Si (111), подвергаемой двухосному латеральному растяжению в двух случаях — после механической и химической полировки исходной поверхности. В обоих случаях, при некоторых различиях, общим является наличие динамики рельефа на нанометровом уровне и фрактальный характер пространственной структуры рельефа на поздних стадиях динамики.

Установлено, что поверхностные слои твердых тел по многим физическим параметрам и структуре отличаются от объема [1]. Это проявляется в пониженной механической прочности поверхности и потому там следует ожидать ускорения процессов дефектообразования, например при механическом воздействии. Главная особенность поверхности — наличие свободной границы — открывает новые каналы формирования дефектной структуры, связанные прежде всего с динамикой рельефа. С другой стороны, современные методы анализа поверхности дают возможность изучать эволюцию дефектных структур на ранее недоступном нанометровом уровне, что важно для физики прочности и пластичности как таковых.

В данной работе методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) изучаются процессы дефектообразования на поверхности Si (111), подвергаемой изотропному латеральному растяжению. Ранее были обнаружены и обсуждались квазиобратимые эффекты в динамике рельефа деформируемой поверхности Ge (111), обусловленные, как полагалось, диффузионным массопереносом в механическом силовом поле [2,3]. Эти эффекты аналогичны тем, что наблюдаются в гетероземи-

таксии, например при осаждении германия на кремнии [4]. Диффузионной кинетикой не исчерпываются возможные пути формирования структуры поверхности. Пластическая деформация поверхностных слоев полупроводниковых кристаллов на микронном уровне (микропластика) обнаружена и подробно обсуждается в работе [5]. Обсуждаемые ниже эффекты в динамике рельефа деформируемой поверхности Si (111) свидетельствуют о том, что микропластика сопровождается и, возможно, подготавливается динамикой структуры поверхности на нанометровом уровне.

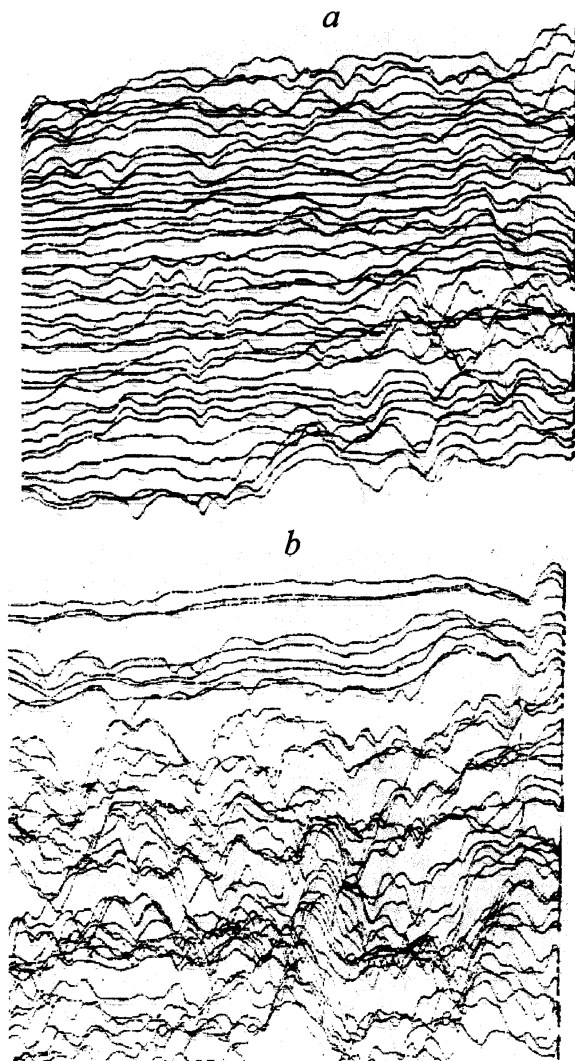
Исследовались поверхности Si (111), имеющие различный уровень предварительной обработки — механически и химически полированные. Методика эксперимента, включая подготовку образцов и их механическое нагружение, подробно описана в [2]. На рис. 1 представлены СТМ-профили деформируемой поверхности Si (111), которая предварительно подвергалась механической, а затем — химической полировке. Химической полировкой в значительной степени удаляется механически поврежденный поверхностный слой, так что наблюдаемый сценарий можно назвать изначально бездефектным. Исходно гладкая поверхность (рис. 1, *a*) уже через десять минут после приложения нагрузки порядка 50 МПа становится шероховатой (рис. 1, *b*). В этой экспериментальной серии прослеживалось зарождение и развитие одного из микродефектов рельефа — ямки в центре сканирующей площадки. Если принимать во внимание только такие дефекты микронных размеров, то их плотность оказывается  $\sim 10^6 \text{ см}^{-2}$ , что согласуется с данными работы [3]. Однако в эксперименте наблюдается динамика рельефа рядом с этим микродефектом уже на нанометровом уровне. Если учитывать также особенности рельефа латеральными размерами в десятки и сотни нанометров, то плотность таких нанодфектов окажется на два-три порядка выше. Рассматривая эту динамику рельефа как проявление пластической деформации поверхности, можно называть ее нанопластикой. Очевидно, динамика рельефа на разных масштабных уровнях не может рассматриваться независимо. Поскольку объем кристалла остается в упругодеформированном состоянии, пластические сдвиги в поверхностном слое должны начинаться и заканчиваться рядом на той же поверхности. Поэтому образование микродефекта должно сопровождаться динамикой рельефа на соседних участках поверхности, и мы ее наблюдаем в форме нанопластики.



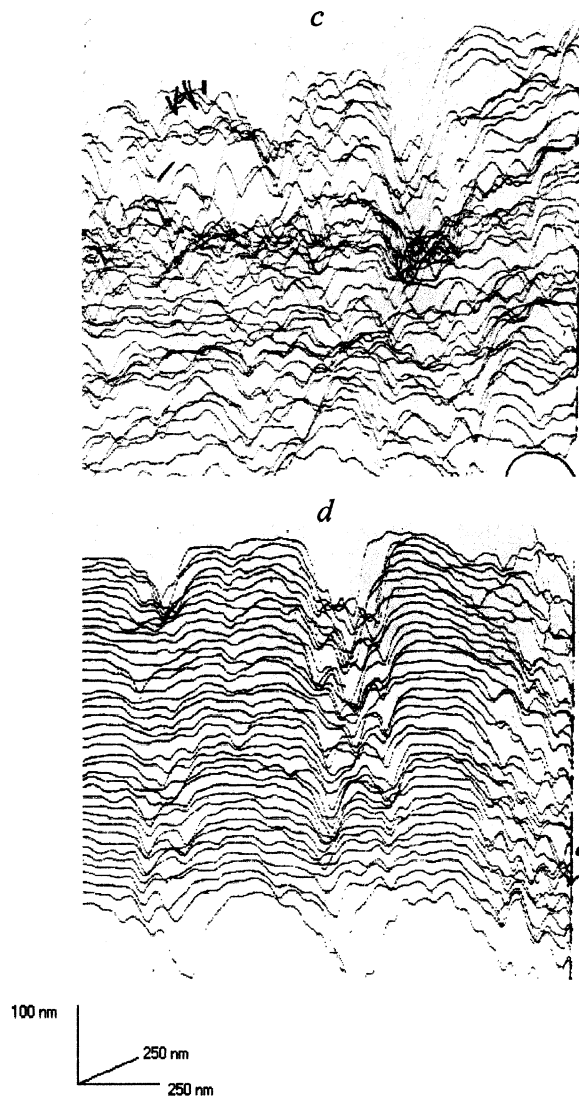
**Рис. 1.** Влияние двухосного растяжения на рельеф поверхности Si(111) (химически полированная);  $\sigma = 0.1$  GPa, *a* — исходная поверхность,  $t = 0$ , *b* —  $t = 10$  min, *c* —  $t = 40$  min.

Другой сценарий развития структуры поверхности наблюдается на изначально дефектных участках. Такие участки обнаруживаются и на химически полированной поверхности. Однако наиболее четко этот изначально дефектный сценарий можно наблюдать на механически полированной поверхности Si(111), которая не подвергалась последующей химической полировке (рис. 2). Здесь поверхностный слой толщиной порядка  $1 \mu\text{m}$  изначально поврежден, и интерес представляет динамика этой дефектной структуры при последующем механическом деформировании. Видно, что на фоне явно пластических сдвигов динамика рельефа и в этом случае начинается на нанометровом уровне. Этот процесс распространяется на всю сканируемую площадку, охватывает микронный уровень, после чего картина стабилизируется. Таким образом, дефектная структура в поверхностном слое при деформировании „перерабатывается“ сначала на нанометровом и, возможно, атомном уровнях, прежде чем будет достигнута стабилизация на микроуровне. Обращает на себя внимание тенденция к формированию самоподобной пространственной структуры рельефа на поздней стадии динамики. Качественно это выражается в том, что в структуре рельефа на рис. 2, с с соответствующей частотой присутствуют дефекты всех масштабов — от нанометрового до микронного, а при повышении разрешения микроскопа характер картины сохраняется. Возникновение фрактальных структур в динамике дислокационных скоплений подтверждается в [6]. Очевидно, наблюдаемая динамика рельефа является отражением эволюции структуры приповерхностного слоя, и эта эволюция сопровождается интенсивным массопереносом. Однако одноатомный механизм диффузии, так же как и обычные механизмы теории пластичности представляются недостаточными для объяснения всей картины динамики деформируемой поверхности.

Независимо от механизмов, определяющих динамику дефектной структуры поверхности, ведущим в формировании ее рельефа является принцип минимума энергии. Этот принцип лежит в основе теоретического анализа процессов в гетероэпитаксии, где наблюдается формирование рельефа за счет напряжений несоответствия между эпитаксиальной пленкой и подложкой [4]. При этом также рассматриваются два конкурирующих механизма динамики — поверхностная диффузия и пластическая деформация. Нами использован этот принцип в случае прямого механического нагружения поверхности. Анализ показывает, что при определенных геометрических параметрах деформационного



**Рис. 2.** Влияние двухосного растяжения на рельеф поверхности Si(111) (механически полированная);  $\sigma = 0.1$  GPa, *a* — исходная поверхность,  $t = 0$ , *b* —  $t = 20$  min, *c* —  $t = 40$  min, *d* —  $t = 50$  min.



**Рис. 2** (продолжение).

рельефа действительно достигается выигрыш в энергии за счет сброса упругой энергии поверхностного слоя, но с определенным вычетом за счет увеличения поверхностной энергии при возросшей площади поверхности. Так же как и в случае гетероэпитаксии, вопросами для кинетики являются пути, которыми достигается минимум энергии.

Таким образом, дефектообразование на деформируемой поверхности твердого тела является процессом, который охватывает все масштабные уровни кристаллической структуры, включая, очевидно, и атомный. Общей тенденцией на механически деформируемой поверхности является рост ее фрактальной размерности [7], что указывает на формирование в поверхностном слое дефектной структуры, с высокой вероятностью содержащей очаги зарождения макроскопического разрушения, с последующим переходом разрушения в объем.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 2000-00-00482).

## Список литературы

- [1] *Нестеренко Б.А., Снитко О.В.* Физические свойства атомарно-чистой поверхности полупроводников. Киев: Наукова думка, 1983. 264 с.
- [2] *Журков С.Н., Корсуков В.Е., Лукьяненко А.С.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 6. С. 324–326.
- [3] *Горобей Н.Н., Князев С.А., Корсуков В.Е.* и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 1. С. 23–25.
- [4] *Tersoff I., LeGones 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. 280 с.
- [6] *Bharathi M.S., Lebyodkin M., Ananthakrishna G.* et al. // PRL. 2001. V. 37. N 16. P. 165 508–(1–4).
- [7] *Betekhtin V.I., Butenko P.N., Gilyarov V.L.* et al. // Techn. Phys. Lett. 2002. V. 28. N 1. P. 26–29.