

Надточий В.А., Уколов А.И., Костенко С.А., Редникин Д.Ю.

¹ доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики, СГПУ

² ассистент кафедры общенаучных дисциплин, АДИ ДонНТУ

³ магистрант, СГПУ

⁴ студент, АДИ ДонНТУ

e-mail: ukolov_aleksei@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Ge МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

В данной работе методом атомно-силовой микроскопии выполнены исследования поверхности образцов монокристаллического Ge, циклически деформированных одноосным сжатием с одновременным ультразвуковым облучением при температуре 310K. Деформирование кристаллов порождает на поверхности периодические дефектные структуры, обусловленные массопереносом при наличии градиента напряжений и возникновении направленных диффузионных потоков. Дислокационные петли в приповерхностном слое являются источниками зарождения наноструктур типа ямка-островок. При объединении островков на стадии созревания образуются гребни нанометровой высоты, источниками которых являются дислокационные петли, линейно ориентированные полями точечных дефектов.

Ключевые слова: полупроводник, наноструктура, диффузия, градиент напряжения, дислокация.

Введение

В последнее десятилетие уделяется много внимания исследованию свойств низкоразмерных твердотельных структур с линейными размерами порядка десятков нанометров и менее [1-4]. Структуры столь малых размеров обычно называются наноструктурами и могут проявлять удивительные свойства отличные от свойств объемных материалов. Исследования по получению наноструктур, их диагностике и практическому применению получили название работ в области нанотехнологии. Важнейшую роль играют методы диагностики наноструктур.

Одним из интенсивно развиваемых направлений диагностики наноструктур на сегодняшний день является атомно-силовая микроскопия (АСМ). АСМ – это семейство экспериментальных методов изучения локальных свойств поверхности, основанных на регистрации взаимодействия твердо-

тельного острого зонда с изучаемой поверхностью. Атомно-силовая микроскопия также предоставляет возможность для проведения нанолитографии – локальной модификации поверхности под зондом. Таким образом, АСМ может рассматриваться и в качестве технологического направления по модификации и фабрикации наноразмерных структур [4].

Основная часть

Создание градиента механических напряжений и, соответственно, градиента химического потенциала точечных дефектов порождает диффузию в приповерхностных слоях алмазоподобных кристаллов (Si, Ge) при температурах ниже $0,35T_{пл}$ [5,6]. При малых длительностях (несколько минут) деформирования в указанных кристаллах генерируются, в основном, точечные дефекты, а при длительностях в несколько часов или суток в приповерхностных слоях, толщиной ≤ 5 мкм, зарождаются и дислокационные петли. Процесс исследования диффузии в тонких приповерхностных слоях с помощью оптической микроскопии затруднен из-за невысокой разрешающей способности метода. Поэтому в данной работе использовали АСМ для обнаружения проявления диффузии в процессе низкотемпературного деформирования монокристаллов Ge . Образцы Ge размерами $3 \times 4 \times 10$ мм циклически деформировали одноосным сжатием с одновременным ультразвуковым облучением при $310K$.

В результате АСМ исследования получен снимок трехмерного рельефа поверхности который приведен на рис.1,а, а его профилограмма в указанном стрелкой направлении изображена на рис.1,б.

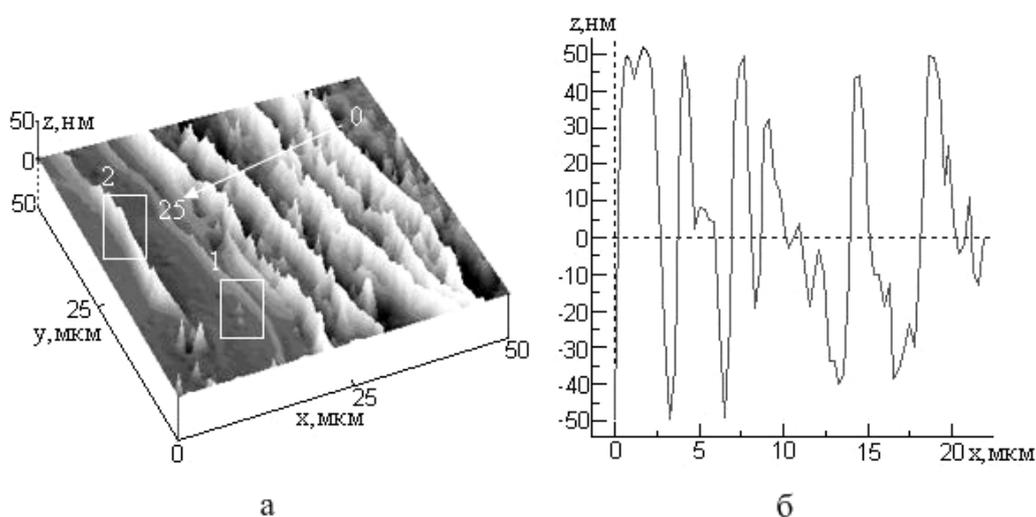


Рис. 1: а – АСМ изображение периодической структуры поверхности Ge , б – профилограмма, полученная сканированием зонда АСМ по направлению, указанному стрелкой на рис.1,а

Оба рисунка свидетельствуют о том, что высота подъемов в виде гребней на поверхности и впадин относительно среднего (нулевого) уровня приблизительно одинаковые.

Интересное явление наблюдается на рис. 2,а, где видно образование пирамидальных островков (они же выделены рамкой 1 на рис.1,а) за счет диффузионного массопереноса вещества с образованием лунки в местах выхода на поверхность дислокационной полупетли. Здесь же указано направление спада напряжения от концентратора, по которому следует ожидать преимущественное перемещение межузельных атомов. На рисунке справа показан вид на островковую структуру перпендикулярно поверхности, где видно, что дислокационная ямка и островок в основании на данной плоскости (112) имеют гексагональную форму. Сканирование через дно ямки и вершину рядом находящегося островка (рис.2,б) показало равенство площадей между прямой среднего уровня поверхности и линиями границ ямки и островка.

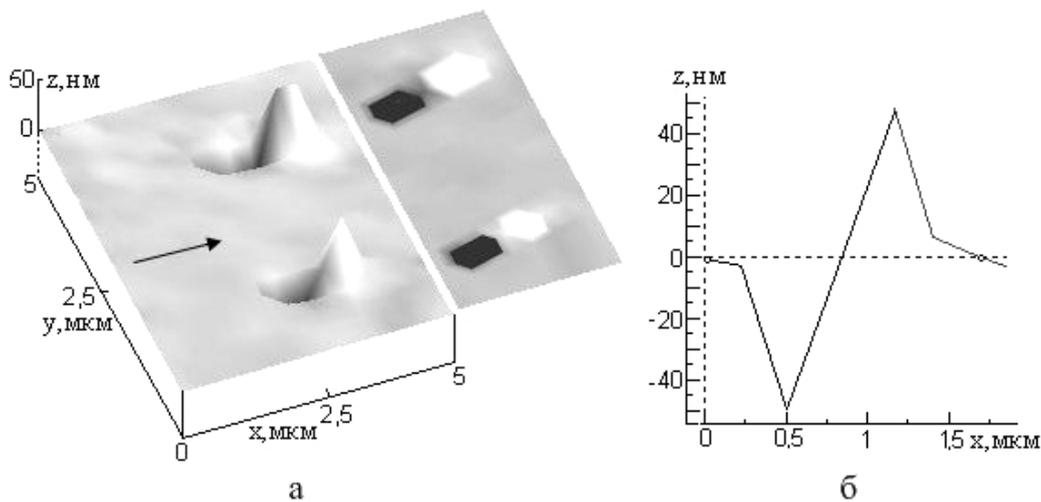


Рис. 2: а - пирамидальные островки и лунки, образовавшиеся на поверхности образца германия после деформирования в результате диффузионного массопереноса; справа - вид на структуру сверху. Изображение получено с участка, выделенного рамкой 1 на рис.1,а ,б - профилограмма, полученная при сканировании поверхности образца германия в направлении, проходящем через дно ямки и вершину рядом находящегося островка; кружками отмечены границы структуры

Профилограммы, полученные сканированием зонда в направлении вершин островков (рис.3,а) и нижних точек дислокационных ямок (рис.3,б) показывают равенство высоты островков и глубины образовавшихся ямок. Равенство объемов дислокационной ямки и островка свидетельствует о том, что самоорганизованный рост пирамидального островка происходил за счет его достройки в основном атомами кристалла, находившимися в объеме дислокационной ямки.

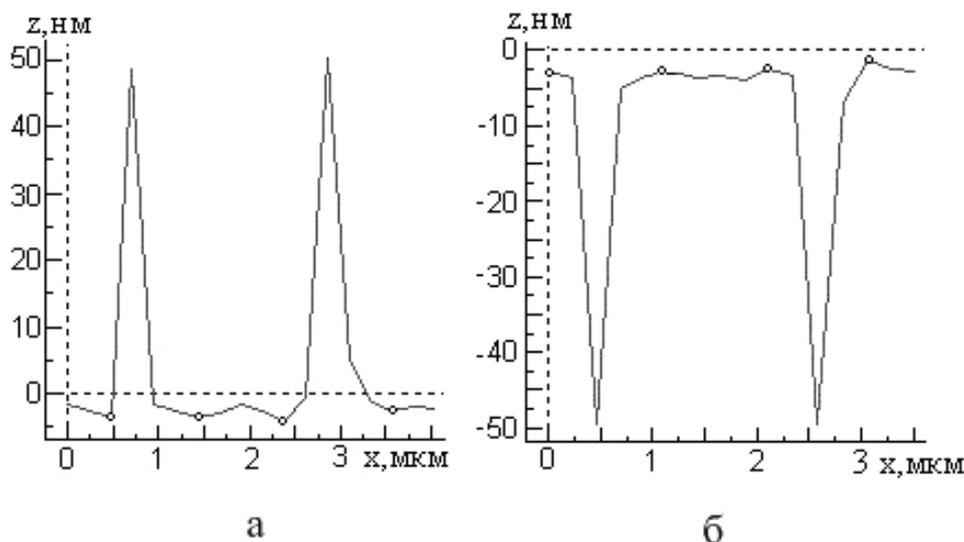


Рис. 3: Профилограммы, полученные при сканировании поверхности образца германия в направлении вершин островков (а) и нижних точек дислокационных ямок (б); кружками на (а) отмечены границы оснований островков, на (б) - границы дислокационных ямок

Рассмотрим особенность напряженного и структурного состояния кристалла вблизи дислокационной петли. На дислокационную полупетлю вблизи свободной поверхности действует сила зеркального изображения и линейного натяжения, в результате чего ее участки вблизи поверхности ориентируются под большим углом, что подтверждается при послойном химическом травлении [7]. В условиях эксперимента на дислокацию действует сила с составляющими параллельно поверхности (рис.2,а) по нормали к дислокационной линии и вдоль дислокации, направленной из глубины к поверхности. Кроме того, дислокация испытывает одновременно действия ультразвука, энергия которого может поглощаться селективно, а компонента возникающей при этом силы, перпендикулярная равновесному положению колеблющейся дислокационной линии, может осуществлять открепление и переход точечных дефектов в ее окрестность [8]. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования диффузии вдоль дислокаций свидетельствуют о наличии в них ускоренного переноса. Ускорение диффузии вдоль дислокации чаще всего объясняют наличием вакансий, концентрация и подвижность которых значительно выше, чем в объеме. Эффект увеличения коэффициента самодиффузии вдоль дислокации может быть бóльшим в приповерхностном слое из-за повышенной концентрации вакансий при УЗ облучении кристалла и наличия градиента напряжения в месте выхода упругого поля дислокации на поверхность. По-видимому, именно фактор напряжения вокруг дислокации и существование его градиента способствует выходу атомов из напряженной области на поверхность, определяет размеры ямки на поверхности,

а особенность кристаллографии - ее форму. Движущейся силой образования островка Ge на деформируемой поверхности кристалла, является различие в постоянных решетки перенапряженной части поверхности вблизи ямки и наращиваемого островка.

Рассмотрим теперь механизм образования гребня на поверхности кристалла (рис.4).

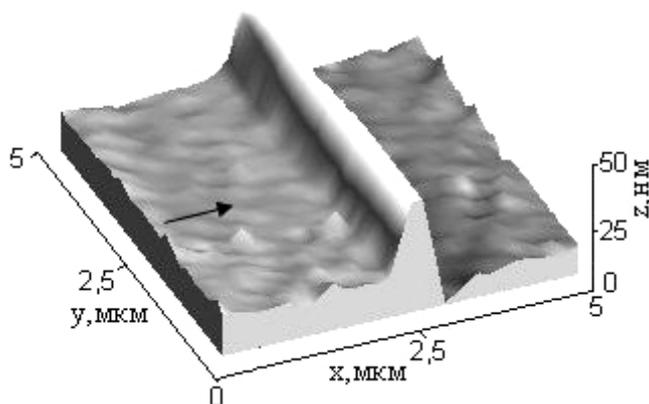


Рис. 4: АСМ-изображение гребня, образованного на поверхности образца германия из совокупности близко расположенных островков; получено с участка, выделенного рамкой 2 на рис. 1,а

Его формирование связано с процессом объединения островков на стадии созревания, а линейность – с особенностью ориентации их источников – дислокационных петель вдоль полосы, где наблюдается пересыщение по межузлиям. Циклическое деформирование образца порождает периодическое поле сжатий и растяжений на поверхности и с ним связанные чередующиеся полосы пересыщений по вакансиям и межузлиям [9]. При этом межузельные петли переориентируются вдоль полос, а при ультразвуковом воздействии являются источниками массопереноса для формирования островков.

Выводы

В работе прямым методом наблюдения с помощью атомно-силовой микроскопии показана возможность массопереноса в монокристаллическом германии вдоль поверхности и вдоль дислокаций на поверхность при наличии градиента механических напряжений.

Описан новый способ получения наноструктур на поверхности монокристаллического Ge, позволяющий, в отличие от широко применяемой для этих целей молекулярно-лучевой эпитаксии (где используется сверхвысокий вакуум $\sim 10^{-8}$ Па и высокие температуры), выполнять необходимые операции для роста при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Выращенные таким образом наноструктуры могут представлять интерес для создания перспективных микроэлектронных приборов с использованием квантовых эффектов.

Литература

- [1] Пчеляков О.П. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства / О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский [и др.] // ФТП. – 2000. – Т. 34, № 11. – С. 1281 – 1289.
- [2] Кукушкин С.А. Зарождение когерентных полупроводниковых островков при росте по механизму Странского-Крастанова, индуцированное упругими напряжениями / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, F. Schmitt [и др.] // ФТП. – 2002. – Т. 36, № 10. – С. 1177 – 1185.
- [3] Устинов В.М. Технология получения и возможности управления характеристиками структур с квантовыми точками / В.М. Устинов // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 963 – 970.
- [4] Шкляев А.А. Создание наноструктур германия и кремния с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа / А.А. Шкляев, М. Ичи-кава // УФН. – 2006. – Т. 176, № 9. – С. 913 – 930.
- [5] Nadtochiy V. Microplasticity and electrical properties of subsurface layers of diamond-like semiconductors strained at low temperatures / V. Nadtochiy, N. Golodenko, N. Nechvolod // Functional materials. – 2003. – V. 10, № 4. – P. 702 – 706.
- [6] Надточій В.О. Рух дислокацій у напівпровідниках, спричинений градієнтом напружень / В.О. Надточій, М.М. Голоденко, М.К. Нечволод [та ін.] // Фіз. і хім. твердого тіла. – 2003. – Т. 4, № 1. – С. 76 – 79.
- [7] Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / Алехин В.П. – М.: Наука. – 1983. – 280 с.
- [8] Тяпунина Н.А. Упрочнение монокристаллов под влиянием ультразвуковых колебаний / Тяпунина Н.А. // Физика деформационного упрочнения. – К.: Наукова думка, 1972. – С. 228 – 246.
- [9] Уколов О.І. Дифузійно-дислокаційна мікропластичність монокристалів Ge нижче температурної межі крихкого руйнування / О.І. Уколов, В.О. Надточій, М.К. Нечволод // Фіз. і хім. твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 3. – С. 575 – 579.