

УДК 546.87/86\*24:54-165

## НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СЛОИСТЫЕ СИСТЕМЫ $A^V_2B^{VI}_3<In>$

К. т. н. А. П. Алиева<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. С. Ш. Кахраманов<sup>2</sup>, д. т. н. Ф. К. Алескеров<sup>2</sup>,  
С. А. Набиева<sup>2</sup>, д. ф.-м. н. К. Ш. Кахраманов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Азербайджанский технический университет; <sup>2</sup>НПО «Селен» НАН АР  
Азербайджан, г. Баку  
almaz46@mail.ru

*Получены материалы с гофрированными и ступенчатыми структурами различных размеров и плотностей распределения. Описан механизм образования вышеперечисленных наноструктур, связанный с влиянием пластической деформации при давлении тепловой волны, образующей гофрированные структуры. Обнаружены одномерные каналы протекания заряда. Достигнуто увеличение термоэлектрических характеристик наноструктурированных кристаллов.*  
*Ключевые слова:* деформация, гофрированные структуры, одномерные каналы.

Одним из путей улучшения свойств термоэлектрических преобразователей является использование пространственно-неоднородных материалов с неоднородностями, размеры которых сравнимы с характерными длинами волн электронов (10—50 нм) или фононов (1 нм), т. е. лежат в нанометровой области [1, 2]. Для увеличения термоэлектрической добротности проводимость материалов должна быть возможно большей при наименьшей теплопроводности. Наноразмерные барьеры эффективно отсеивают и ограничивают распространение фононных мод, в то же время нужно подобрать режим с эффективным переносом заряда. Размеры, формы и состав наноструктур влияют на электрофизические характеристики материала, поэтому важно контролировать их распределение в процессе выращивания кристаллов  $A^V_2B^{VI}_3$  <примесь>. С целью решения этих задач применялась технология получения материалов методом выращивания кристаллов с различным режимом скорости, отжига и тепловых флуктуаций. Ангармонические колебания структурообразующих атомов слоев являются одним из факторов, определяющих относительно равномерный линейный рост кристалла, но при усилении давления упругого напряжения, создаваемого тепловой волной, происходит нарушение линейного порядка выстраивания и квинтетные слои деформируются, образуя периодическое распределение складок. Диффузионные и деформационные процессы в направлении базовой поверхности (0001) формируют отдельные структурные элементы и соединяют их, образуя одномерные каналы протекания заряда.

Кристаллы получали методом вертикальной направленной кристаллизации при градиенте температуры  $\Delta T=100^\circ\text{C}/\text{см}$  и скорости кристаллизации 1; 2 и 2,5 см/час. На рис. 1 представлены АСМ-изображения в различных масштабах кристаллов  $Bi_2Te_3<In>$ ; видны нанообразования в виде периодического распределения складок на поверхности (0001). На рис.1, а представлена 2D-поверхность и профилограмма ступеней и складок вдоль горизонтальной линии на части рис. 1, а, где показаны их высота до 50 нм и ширина «канавки» 1—1,5 мкм. На 3D-изображении (рис.1, б) видны повторения складок через определенное количество слоев. Приведенные особенности формирования каналов протекания заряда могут приводить к специфической динамике роста кристаллической решетки, что проявляется в увеличении термоэдс до  $250 \cdot 10^{-6}$  В/К. В этом процессе участвуют и дефектные центры индия, создавая вокруг себя деформационные напряжения, способствуют локализации заряда и дополнительному рассеянию фононов, а также влияют на дислокационную структуру слоистого кристалла. Причина роста наноступеней и нановыступов заключается в том, что величина теплового импульса формирует упругую деформацию, и при превышении некоторого критического сжимающего напряжения квинтетные слои выстраиваются в гофрированные волнообразные структуры, что ослабляет сжимающее напряжение. Это происходит при увеличении скорости роста кристалла в 2 и 2,5 раза. Длина волны складок определяется упругими характеристиками и толщиной квинтетных слоев. Метод расчета зависимости толщины деформированного слоя от периода волны [3, 4] может помочь определить количество квинтетных слоев в гофрированной

структуре. Изменение средней «длины волны»  $\lambda$ , соответствующей складкам, было описано простой степенной зависимостью  $\lambda(x) \sim x^m$ . Исследуемые материалы отличались друг от друга величиной  $m$ . Чтобы корректно описать их свойства, было введено понятие ринклон — структурного элемента, многократное повторение которого характеризует всю совокупность складок. Отдельный ринклон отвечает за переходную область, в которой две складки с «длиной волны»  $\lambda$  объединяются с образованием более крупной.

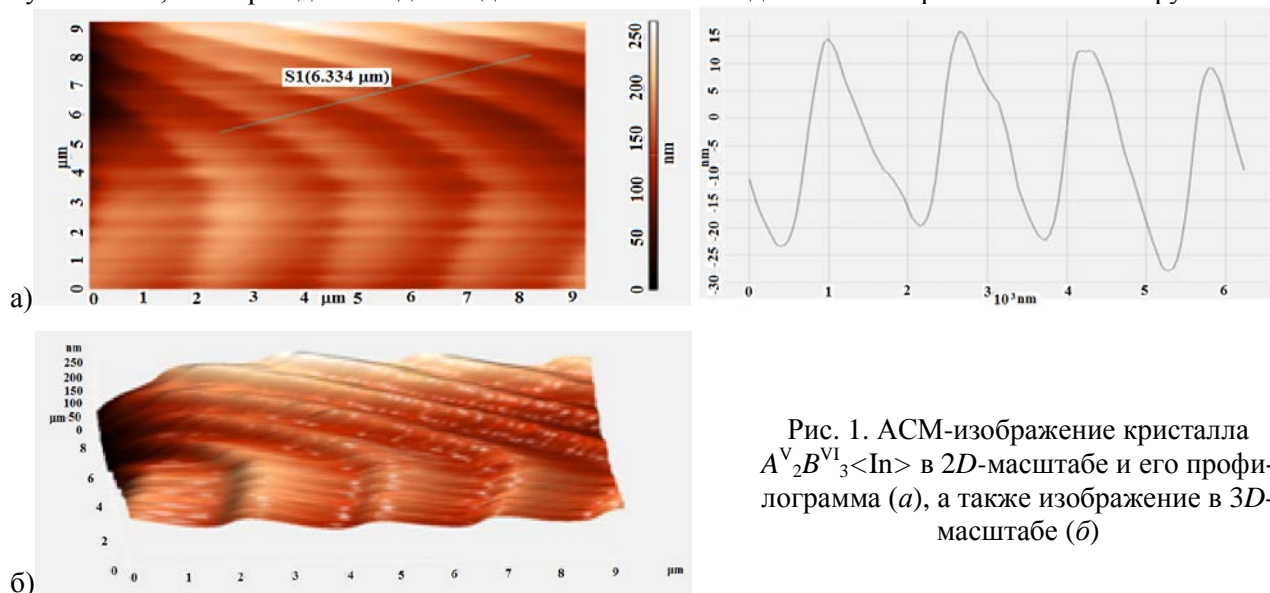


Рис. 1. АСМ-изображение кристалла  $A^V_2B^{VI}_3<In>$  в 2D-масштабе и его профилограмма (а), а также изображение в 3D-масштабе (б)

Смена направления складок может быть связана с дислокационной структурой кристалла [5], имеющей различные направления в зависимости от вида и линии скольжения дислокации. Примесь влияет на вид и концентрацию дислокационных центров, чем может влиять на улучшение и ухудшение термоэлектрических и механических свойств материала.

Получение складок нужного размера напрямую связано с температурой фронта кристаллизации, повышение ее приводит к усилению вязкости кристаллизующего участка и уменьшению способности аккумуляции упругой энергии, отчего высота структуры уменьшается. Таким образом, длина волны складки и ее высота в очень малом диапазоне коррелируют с температурой фронта кристаллизации.

Сформированные дефектные слои влияют на термоэлектрические параметры материала.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Снарский А. А., Сарычев А. К., Безсуднов И. В., Лагарьков А. Н. Термоэлектрическая добротность объемных наноструктурированных композитов с распределенными параметрами // ФТП.— 2012.— Т. 46, вып. 5.— С. 677—683.
2. Булат Л. П., Пшеная-Северин Д. А. Влияние туннелирования на термоэлектрическую эффективность объемных наноструктурированных материалов // ФТТ.— 2010.— Т. 52, вып. 3.— С. 452—458.
3. Шугуров А. Р., Панин А. В. Механизм периодической деформации системы «пленка-подложка» под действием сжимающих напряжений // Физическая мезомеханика.— 2009.— Т. 12, вып. 3.— С. 23—32.
4. H. Vanderparre, M. Pineirua, F. Brau, B. Roman, J. Bico, C. Gay, W. Bao, C. N. Lau, P. M. Reis, P. Damman. Wrinkling Hierarchy in Constrained Thin Sheets from Suspended Graphene to Curtains. // Phys. Rev. Lett. 106, 224301 (2011), 22
5. Малыгин Г. А. Механизм образования деформационных ступенек нанометрических размеров на поверхности пластически деформируемых кристаллов // ФТТ.— 2001.— Т. 43, вып. 2.— С. 248—253.

A. P. Aliyeva, S. Sh. Kahramanov, F. K. Aleskerov, S. A. Nabiyeva, K. Sh. Kahramanov  
**Nanostructured layered  $A^V_2B^{VI}_3<In>$  systems**

Materials with corrugated and stepped structures of various size and density distribution are obtained. The nanostructures formation mechanism is associated with the influence of plastic deformation under pressure of a thermal wave generating the corrugated structure. One-dimensional charge channels are detected. An increase in the thermoelectric performance of nanostructured crystals is achieved.

Keywords: *deformation, corrugated structure, one-dimensional channels.*