

Годжаев Э.М.², Кахраманов С.Ш.¹, Гюльмамедов К.Дж.², Гамзаева А.Ю.³

¹Научно-производственное объединение «Селен» НАН Азербайджана,
ул. Ф. Агаева, 14, Баку, 370143, Азербайджан;

²Азербайджанский технический университет, просп. Гусейн Джавида, 25,
Баку, AZ1073, Азербайджан;

³Гянджинский государственный университет, Шах Исмаил Хатаи, 187,
Гянджа, AZ2000, Азербайджан

ПОВЕРХНОСТНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ В $A^V_2B^{VI}_3$

Наночастицы, формирующиеся на поверхности (0001) в $A^V_2B^{VI}_3$, составляют особый класс нанообъектов, влияющих на свойства объемных кристаллов. Их агрегация в пространстве $Te^{(I)}-Te^{(I)}$ происходит при слипании диффундирующих атомов по тем же механизмам, что и в известных твердотельных структурах, сформированных на свободной поверхности кристаллов. Анализ структуры и морфологии нанофрагментов, проведенный на основе АСМ-изображений и рентгендифрактометрических снимков на поверхности (0001) $A^V_2B^{VI}_3$ выявил роль ван-дер-ваальсовой щели как твердофазного нанореактора в процессе интеркалирования для $Sb_2Te_3 <Cr>$ и твердого раствора $(Bi_2Te_3-Bi_2Se_3) <ZnSe>$.

Ключевые слова: рентгендифрактометрический снимок, разбавленные магнитные полупроводники, фрактальные кластеры, нанореакторы.

Nanoparticles formed on (0001) $A^V_2B^{VI}_3$ surface are a specific class of nanoobjects affecting the properties of the bulk crystals. Their clustering in $Te^{(I)}-Te^{(I)}$ space occurs with aggregation of diffusing atoms according to the same mechanisms as in known solid-state structures formed on the free surface of crystals. Analysis of nanofragment structure and morphology conducted on the basis of AFM images and X-ray diffraction images on (0001) $A^V_2B^{VI}_3$ surface has revealed the role of van der Waals gap as a solid-phase nanoreactor during intercalation for $Sb_2Te_3 <Cr>$ and $(Bi_2Te_3-Bi_2Se_3) <ZnSe>$ solid solution.

Key words: X-ray diffraction image, diluted magnetic semiconductors, fractal clusters, nanoreactors.

Введение

Поиск путей увеличения термоэлектрической эффективности веществ, кроме фундаментального значения, имеет и прикладное значение для решения практических задач получения низких температур термоэлектрическими методами.

К настоящему времени установлено, что разбавленные магнитные полупроводники (РМП) на основе элементов III и V или II и IV групп периодической системы элементов переходят при низких температурах в ферромагнитное состояние. Совсем недавно был открыт ферромагнетизм в теллуриде висмута с Fe, а позже – в теллуриде сурьмы с V при низких температурах. Обнаружено влияние магнитных примесей на термоЭДС, сопротивление, магнетизм, эффект Холла, эффект Шубникова-де Гааза и другие свойства таких кристаллов [1].

Исследование материалов, обладающих высокой термоэлектрической эффективностью в

настоящее время особенно актуально. Оптимальные величины параметров достигаются введением различных легирующих примесей. При этом для достижения большого значения термоэффективности необходимо изучить фундаментальные физические свойства материалов.

В качестве легирующих примесей можно использовать *Cr*, *Zn*. Однако к настоящему времени практически мало изучено влияние этих примесей на энергетический спектр смешанных кристаллов $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$, отсутствуют данные о термоэлектрической эффективности РМПП на основе теллурида сурьмы и о влиянии магнитных примесей на осцилляционные свойства таких кристаллов. Отсутствуют данные о термоэлектрических свойствах смешанных кристаллов $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ легированных хромом. Не определена также прямыми методами анизотропия поверхности Ферми монокристаллов p - $(Bi_{1-x}Sb_x)$ и кристаллов типа Bi_2Te_3 .

В данной работе исследованы образцы трех типов.

Образцы первого типа – смешанные монокристаллы теллуридов висмута и сурьмы, как нелегированные, так и легированные. Второй тип – монокристаллы теллурида сурьмы, легированные магнитной примесью хрома. Третий тип – монокристаллы теллурида и селенида висмута, легированные железом.

В работе [1] проводилось систематическое изучение влияния легирования хромом на гальваномагнитные, термоэлектрические, осцилляционные и магнитные свойства слоистых монокристаллов Sb_2Te_3 в температурном интервале 1.7 – 300 К. Прямыми измерениями угловых зависимостей экстремальных сечений поверхности Ферми с помощью эффекта Шубникова-де Гааза была определена анизотропия поверхности Ферми монокристаллов $(Bi_{0.5}Sb_{0.5})_2Te_3$.

Совокупность данных о влиянии легирования галлием, хромом и железом на термоЭДС, гальваномагнитные свойства и энергетический спектр необходима для оптимизации устройств и приборов на основе теллуридов висмута и сурьмы. Применение исследованных примесей *Ga*, *Cr*, *Fe* увеличивает термоЭДС, а магнитные примеси *Cr*, *Fe*, *Ga* могут быть использованы для создания новых твердотельных приборов с управлением магнитным полем. Результаты таких исследований могут быть положены в основу разработки перспективной технологии получения материалов с заданными свойствами на базе полупроводников типа теллуридов висмута и сурьмы.

В работе [2] рассмотрены подходы к синтезу нанокompозитов на основе нуль-, одно- и двумерных твердотельных нанореакторов, сформированных полостями цеолитов или межслоевыми пустотами слоистых соединений.

В работе [3] были получены нанонити Bi_2Te_3 в матрице пористого оксида алюминия. Однако в самом Bi_2Te_3 в результате кристаллизации в межслоевом пространстве образуются частицы нанометрового размера из сверхстехиометрических атомов [4], а также фрактальные структуры, анализирующиеся с позиций физики фрактальных кластеров (ФК). Они образуются в процессе роста nanoостровков при слипании твердых частиц [5-6]. Изучение морфологии поверхности (0001) Bi_2Te_3 <примесь> и рассмотрение межслоевых агрегатов с наблюдаемыми ансамблями нанослоев [6] требует внесения ясности в вопрос о влиянии самоорганизованных наночастиц на основе примесей в пространстве $Te^{(1)}-Te^{(1)} A^V_2B^{VI}_3$ на термоэлектрические свойства.

В связи с этим требуются новые экспериментальные данные по изучению морфологии поверхности (0001) $A^V_2B^{VI}_3$ легированных металлами (*Zn*, *Se*, *Cr*).

В свете изложенного была выбрана цель исследования: методом рентгенодифрактометрии (РД) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) определить состав образующихся интеркалированных межслоевых нанофрагментов, используя пространство $Te^{(1)}-Te^{(1)} A^V_2B^{VI}_3$ в качестве нанореактора.

1. Эксперимент и результаты

Соединение Bi_2Te_3 получали методом термического синтеза при 900 – 950 К в кварцевых ампулах, куда загружали Bi , Te и примеси в нужном соотношении. После синтеза сплавов их помещали в графитизированные ампулы диаметром – 8 мм, заново сплавляли и далее методом вертикальной направленной кристаллизации получали монокристаллические слитки при градиенте температуры $\Delta T = 120$ град/см и скорости кристаллизации 1.4 см/час. После скалывания вдоль плоскости (0001) Bi_2Te_3 в таких кристаллах исследовалась морфология примесных наночастиц. С точки зрения структуры такие образцы можно рассматривать как интеркаляционные, поскольку в них можно выделить слои матрицы основного вещества и примесей. Из-за слабой химической связи между $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ здесь характерно изменение морфологии межслоевого пространства при проникновении в него атомов металлов и образование полупроводниковых наночастиц.

Интеркаляцию атомов Zn и Cr проводили при 600 К. Для этого на торец образца термическим методом напыляли на очищенную поверхность металлы вдоль базовой плоскости (0001). Далее процесс интеркалирования вдоль слоев (0001) проводили при градиенте температуры $\Delta T = 50$ град/см; горячей стороной была напыленная часть образца. Свежесколотые поверхности (0001) полученных образцов были исследованы методами электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии.

1.1. АСМ и РД исследования

Электронно-микроскопические изображения получали на АСМ марки NC-AFM. РД исследования проводились на установке марки Philips Panalytical (X-ray diffractometer). Приготовление чистой поверхности путем скола специальными инструментами осуществлялось вдоль базисной плоскости (0001) на воздухе непосредственно перед проведением экспериментов.

Для всех легированных образцов помимо АСМ-изображений поверхности (0001) $A^V_2B^{VI}_3$ в 3D масштабе исследованы: АСМ-изображения в 2D масштабе, функции распределения наночастиц с одинаковыми размерами, плотность распределения нанофракталов на поверхности (0001) по высоте.

В монокристаллах $Sb_2Te_3<Cr>$, $Bi_2Te_3<Cr>$, $Bi_2Se_3<Se>$ между слоями $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ получены наноструктуры, имеющие наноразмеры 5 – 20 нм и считающиеся наночастицами.

В $A^V_2B^{VI}_3$ атомы примеси (Zn , Se , Cr) локализуются в ван-дер-ваальсовом пространстве между теллуридными квинтетами. Квинтет состоит из пяти простых слоев. Атомы отдельного слоя одинаковы и образуют плоскую гексагональную решетку. Атомы же каждого последующего слоя располагаются над центрами треугольников, образованных атомами предыдущего слоя. Атомы $Te^{(1)}$ имеют в качестве ближайших соседей шесть атомов Bi – по три из каждого прилегающего слоя. $Te^{(1)}$ с одной стороны связан с тремя атомами Bi , а с другой – с тремя атомами $Te^{(1)}$, т.е. в решетке имеется два существенно различных места для атомов Te [4]. На рис. 1 приведена схема расположения атомов в кристаллической решетке Bi_2Te_3 , пути диффузии (отмечено стрелкой (a)) и агрегации частиц между теллуридными квинтетами (b, e, c), приводящими к формированию нанослоев (1). Расстояние между квинтетами сравнительно велико, т.е. связь $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ очень слабая. Наиболее вероятными местами скопления и зарождения наночастиц на основе Zn , Cr , Fe могут быть вакансии Te , комплексы типа «дислокация-примесный атом», границы блоков и зерен, микротрещины и концентрационные неоднородности [7-10].

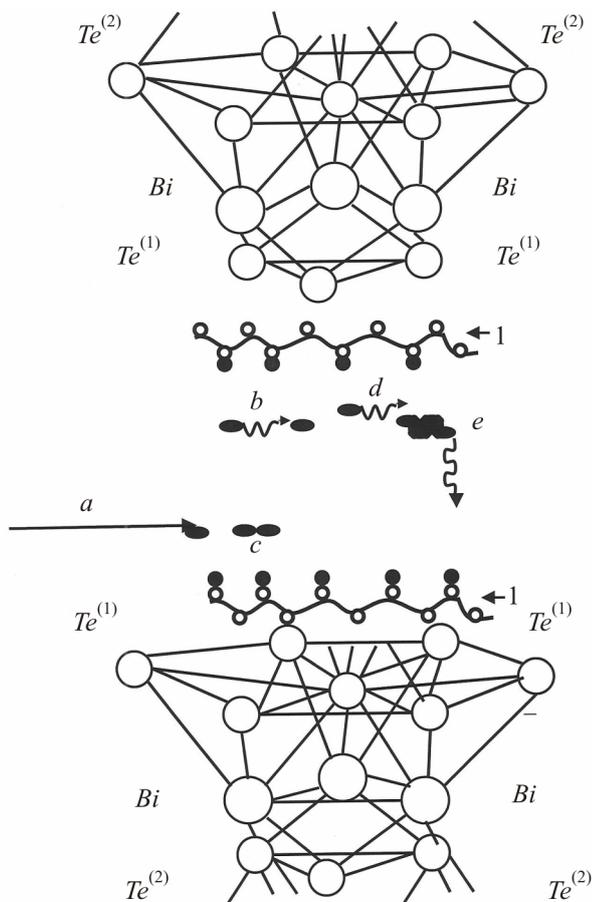


Рис. 1. Схема расположения атомов висмута и теллурида в структуре Bi_2Te_3 , модельные представления наночастиц между $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ при интеркаляции легкодиффундируемых примесей в межслои: a – внедрения атомов вдоль плоскости (0001); b – формирование нового островка; b и d – диффузия частиц; c – агрегация; e – диффузия островка; 1 – агрегация частиц между $Te^{(1)}-Te^{(1)}$.

На рис. 2 – 3 приведены экспериментальные данные для систем $Sb_2Te_3<Cr>$, $Bi_2Te_3<Cr>$, $Bi_2Se_3<Se>$. Видны АСМ-изображения наночастиц, сформированных на поверхности (0001) при интеркалировании хромом и при синтезе теллурида висмута совместно с Cr из последующей кристаллизацией. При интеркалировании при температуре 600 К хром внедряется в межслоевое пространство, как в нанореактор, взаимодействуя со сверхстехиометрическими компонентами Sb_2Te_3 : теллуром и сурьмой. Об этом свидетельствуют дифракционные максимумы на рентгенограммах от наночастиц $CrSb$, $CrTe$. Рентгендифрактограммы (рис. 4) интеркалированных образцов $Sb_2Te_3<Cr>$ (полученных в процессе выращивания кристаллов) показывают пики в основном от наночастиц $CrSb$ при $2\Theta = 44^\circ$, 52° , 54° и 74° , а в $CrTe$ при $2\Theta = 54^\circ$ и наноструктуры самого Sb_2Te_3 . Здесь пространство $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ играет роль не только нанореактора, но и роль наноконтейнера для хрома (рис. 4).

На рис. 2 представлена морфология поверхности (0001) $Sb_2Te_3<Cr>$ в трехмерном масштабе (3D) при интеркалировании Cr . Наноструктуры здесь состоят из $CrSb$, $CrTe$. Здесь заметны следы Cr и Sb_2Te_3 ; высота наноструктур колеблется в пределах от 5 до 20 нм. АСМ $Bi_2Te_3<Cr>$ показывает нанобъекты меньшего размера до 15 нм.

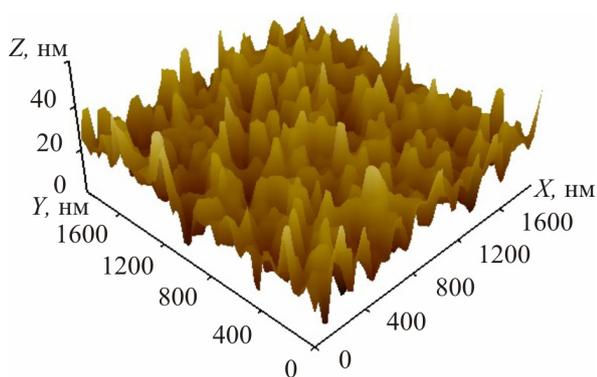


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности (0001) теллурида сурьмы интеркалированного Cr в 3D масштабе.

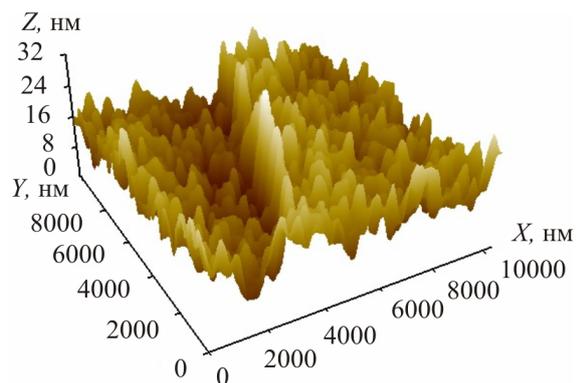


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности (0001) интеркалированного $Bi_2Te_3<Cr>$ в 3D масштабе.

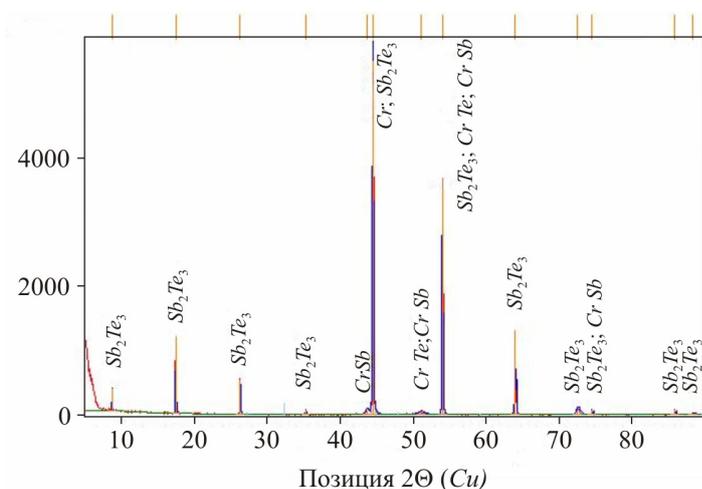


Рис. 4. Рентгendifрактометрический снимок поверхности (0001) $Sb_2Te_3<Cr>$ легированного Cr.

Рентгendifрактограмма (РД) для $Bi_2Te_3<Cr>$ приведена на рис. 5. Здесь среда $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ для Cr явилась наноконтейнером: ($2\theta = 43^\circ, 51^\circ$) РД-снимки для $Bi_2Se_3<Se>$ представлены на рис. 6, а для твердого раствора n -типа $<ZnSe>$ – на рис. 7; РД пики заметны в основном от $ZnSe$ при $2\theta = 45^\circ, 73^\circ$ и 74° . В Bi_2Se_3 ван-дер-ваальсова щель играет роль не только наноконтейнера, но и роль нанореактора.

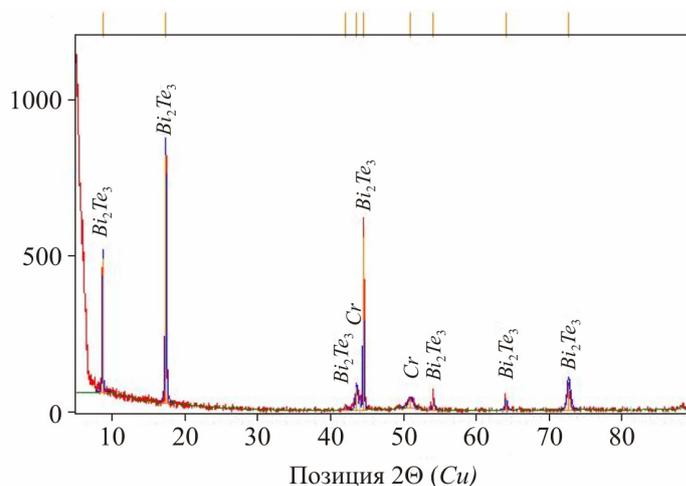


Рис. 5. РД-изображение поверхности (0001) $Bi_2Te_3<Cr>$ (в 3D масштабе).

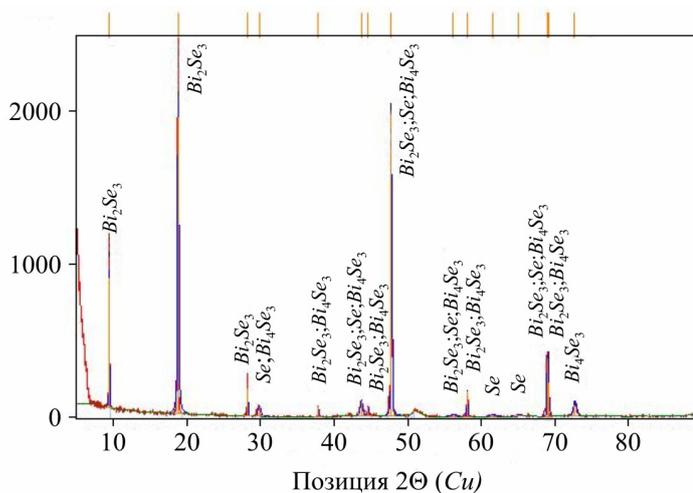


Рис. 6. РД-изображение фрактальных поверхностей в системе $Bi_2Se_3<Se>$.

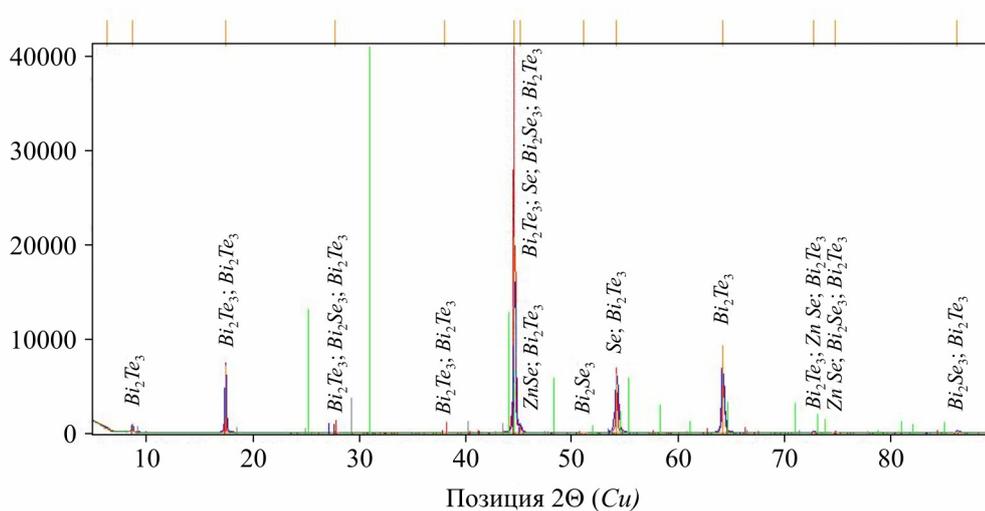


Рис. 7. РД-снимок (0001) в твердом растворе (Bi_2Se_3 4моль%- Bi_2Te_3 96 моль%) $<ZnSe>$.

1.2. Механизм диффузии атомов и их агрегация

Предполагаемые пути диффузии частиц и их агрегации с дальнейшим образованием наностроек (рис. 1), по всей вероятности, связаны с процессом заполнения примесью мест вокруг дислокационных ям и вакансий Te на межслоевой поверхности (0001) $A_2^V B_3^{VI}$. Начало формирования наночастиц происходит в процессе диффузии примесей вдоль базовой поверхности (0001) и с их ростом с поверхности по вакансиям Te на теллуридных квинтетах. Наностройки формируются на базисной плоскости (0001), взаимодействуя между собой и соприкасаясь друг с другом, что наглядно отражается на их топографии. Процесс коагуляции достигает своего пика, при котором формирующиеся наностройки создают единую нанофрактальную поверхность, состоящую из хрома, которую мы и наблюдаем на рис. 3 для системы $Bi_2Te_3<Cr>$.

Похожие АСМ пространства $T_e^{(1)}-T_e^{(1)}$ $A_2^V B_3^{VI}$ получены для $Bi_2Se_3<Se>$ (см. рис. 8), а также для твердого раствора (Bi_2Te_3 96 моль %- Bi_2Se_3 4 моль%) $<ZnSe>$ (рис. 9).

Почти все этапы заполнения ван-дер-ваальсовой зоны связаны с процессом быстрого вхождения легкодиффундируемых примесей (Zn , Cr и Se) в $A_2^V B_3^{VI}$ вдоль базисной плоскости в результате направлений диффузии (направление (a) на рис. 1).

Наноостровки фрактального характера растут из зародыша на теллуридных вакансиях. Совершая случайные блуждания, атомы Zn , Cr движутся по базисной поверхности (0001) в результате градиентной диффузии. Соприкасаясь с зародышем первичного островка, движущиеся примесные атомы прилипают к нему. Далее из новой точки в пространстве между $T_e^{(1)}-T_e^{(1)}$ начинает двигаться другой атом, совершая случайные блуждания и, опять соприкасаясь с другим нанообъектом, увеличивает его размеры.

Размер межслоевого пространства $T_e^{(1)}-T_e^{(1)}$ в Bi_2Te_3 составляет почти 3 нм, высота же наночастиц изменяется в пределах 10 – 20 нм. Здесь возможно и обратимое сжатие или растяжение квинтетов. Расстояние $T_e^{(1)}-T_e^{(1)}$ можно плавно регулировать, настраивая изучаемый нанореактор на заданный объем путем наполнения примесями межслоевое пространство.

В изученных системах нанообъекты самоорганизовались и в твердом растворе ($Bi_2Te_3-Bi_2Se_3$) $\langle ZnSe \rangle$, сопровождаясь ассоциацией частиц близких размеров (например: Bi_2Se_3 , Se , Bi_2Te_3 и $ZnSe$) – рис. 9.

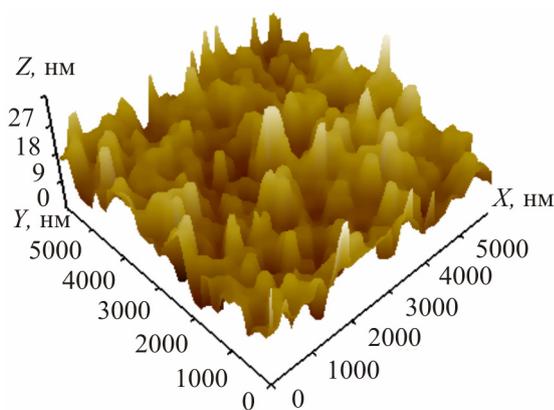


Рис. 8. АСМ-изображение поверхности (0001) в 3D-масштабе $Bi_2Se_3\langle Se \rangle$.

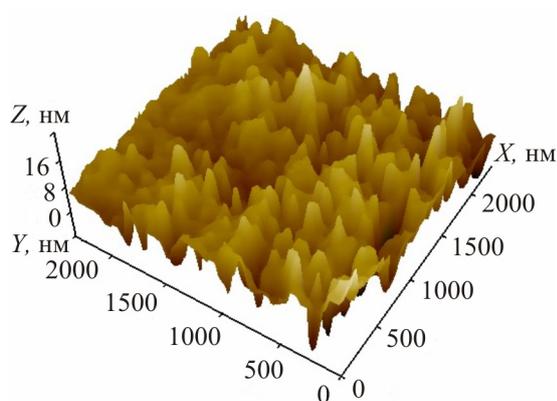


Рис. 9. АСМ-изображение поверхности в 3D-масштабе твердого раствора (Bi_2Te_3 96 моль% – 4 моль%) $\langle ZnSe \rangle$.

По геометрическому признаку – мерности – полученные нанообъекты имеют наноразмеры по всем трем направлениям: высота их не превышает 15 – 20 нм, ширина и длина колеблются в пределах меньших 100 нм, т.е. по классификации [2] данные нанообъекты можно отнести к наночастицам с неупорядоченным распределением. Однако в морфологии поверхности (0001) наблюдаются наноостровки меньших размеров (~ 5 – 10 нм), которые можно отнести к кластерам. Нанообразования, как видим, составляют часть межслоевой структуры в легированных $A^V_2B^{VI}_3$. На наш взгляд они влияют на аномальный эффект Холла и ферромагнетизм в исследованных нами системах. Далее рассмотрим физические характеристики Sb_2Te_3 , Bi_2Te_3 и их твердых растворов, на которые сильно влияют атомы хрома.

1.3. Термоэлектрическая эффективность в твердых растворах [8]

В твердых растворах p -типа на основе халькогенидов висмута и сурьмы $p-(Bi, Sb)_2(Te, Se)_3$ проведен анализ особенностей изменения термоэлектрической эффективности (Z) с учетом данных, полученных при исследовании термоэлектрических и гальваномангнитных свойств материалов. Показано, что в образцах с оптимальными концентрациями заряда для интервала температур 300 – 370 К в многокомпонентном составе $p-Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$ ($x = 1.3$, $y = 0.06$) Z определяется высокой подвижностью и низкой решеточной теплопроводностью.

Рост эффективной массы плотности состояний и увеличение наклонов температурной зависимости подвижности по сравнению с другими составами приводят к увеличению Z в твердом растворе $p\text{-Bi}_2\text{Sb}_x\text{Te}_3$ при $x = 1.6$ в интервале температур 370 – 550 К.

Увеличение термоэлектрической эффективности в исследуемых составах определяется усилением сжатия эллипсоидов постоянной энергии вдоль бинарного и бисекторного направлений, а также изменением угла θ между главными осями эллипсоидов и кристаллографическими осями [8].

Установлен эффект подавления собственной проводимости в узкозонном полупроводнике $p\text{-Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ пластической деформацией. Эффект проявляется в ослаблении снижения коэффициента термоЭДС при повышенных температурах, вызванного собственной проводимостью. Возможные причины эффекта: усиление разориентации кристаллических зерен, образование наночастиц малых размеров, приводящее к снижению теплопроводности и подвижности преимущественно межслоевых носителей заряда.

1.4. Аномальный эффект Холла в $\text{Sb}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Te}_3$

Слоистые полупроводниковые структуры с наноструктурами характеризуются рядом явлений и свойств, представляющих интерес для проведения исследований и привлекательных с точки зрения создания термоэлементов (ТЭ).

Полупроводники типа Sb_2Te_3 имеют ромбоэдрическую структуру (пространственная группа симметрии $R3m - D_{3d}^5$) с осями симметрии второго C_2 и третьего C_3 порядков. Кристаллы Sb_2Te_3 всегда имеют p -тип проводимости из-за высокой концентрации точечных заряженных дефектов, преимущественно антиструктурного типа, то есть атомы сурьмы занимают позиции теллура. Причиной формирования таких дефектов является слабая полярность связей Sb-Te . Наблюдающиеся, при температуре жидкого гелия, отрицательное магнетосопротивление и аномальный эффект Холла, на наш взгляд, связаны с влиянием наночастиц, сформированных в среде $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)} A_2^V B_3^{VI}$ (см. рис. 2).

Коэффициент Холла во всех образцах положителен и растет с ростом содержанием хрома, что указывает на уменьшение концентрации дырок. Однако использовать его для расчета концентрации дырок не представляется возможным, так как в теллуридах висмута и сурьмы имеется две группы дырок с разными концентрациями и подвижностями, которые не известны.

Таким образом, ван-дер-ваальсова щель – это своеобразный нанореактор, где происходит зарождение квазидвумерных слоев с наноструктурами между $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ на поверхности (0001) (Sb_2Te_3) Bi_2Te_3 <примесь>. Эти структурные пустоты – нанореакторы – заполняются соединениями, последующая модификация которых приводит к формированию наночастиц (CrSb). Сформированные полостями $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ слоистых кристаллов нанореакторы, открывают широкие возможности для дизайна наноконструкций с заданными термоэлектрическими свойствами.

Изучение морфологии поверхности (0001) Sb_2Te_3 и его твердого раствора $\text{Bi}_{1.2}\text{Sb}_{4.8}\text{Te}_9\text{<Te>}$ электронно-микроскопическими и рентгендифрактометрическими методами показало, что в ван-дер-ваальсовой щели $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ могут оседать и атомы, не прореагировавшие с другими элементами (см. рис. 3). Условия формирования в межслоях-нанореакторах приводят к появлению наночастиц малых размеров. Однако эти результаты требуют дополнительных исследований, которые будут опубликованы нами в последующих работах.

В работе [11] приведен анализ проблем и подходов в их решении для полупроводниковых наноструктур с квантовыми точками (КТ) применительно и к исследуемым нами межслоевым

нанообъектам, а также представленными нами данными по однородности наноостровков в их ансамбле на ван-дер-ваальсовой поверхности (0001) $A_2^V B_3^{VI}$ <примесь>. В плотном массиве наноостровков возможно наложение полей упругих деформаций, что приводит к явлениям, вызывающим изменения электронных свойств наноструктурированных кристаллов. Можно привести ряд проблем, над решением которых необходимо продолжить работы: во-первых, в повышении однородности массива нанообъектов (см. рис. 2 – 3 и 8, 9) по размерам с сохранением единой формы и их элементного состава; во-вторых, в управлении пространственным расположением (пространственно-упорядоченные массивы) с возможностью получения предельно плотных и разреженных массивов; в-третьих, в снижении плотности дефектов – протяженных (дислокации) и точечных дефектов. Особый интерес представляют наночастицы малых размеров (≤ 100 нм), как искусственных атомов с небольшим числом связанных состояний, характеризующихся величиной энергетического зазора между дискретными уровнями, обеспечивающей работу приборов при температурах 100 – 350 К.

Сравним полученные нами АСМ-изображения (рис. 9) с исследованиями [12] в перколяционном кластере КТ $ZnSe$ как фрактального объекта.

Очень важны результаты исследований образцов с квантовыми точками $ZnSe$ с плотностью, соответствующей порогу перколяции экситонов и значительно превышающей его, когда квантовые точки образуют конгломераты [12]. Впервые обнаружено излучение экситонов из перколяционного кластера связанных квантовых точек как фрактального объекта. Анализ структуры спектров фотолуминесценции образцов показал, что они определяются вкладом экситонных состояний, находящихся в разных структурных элементах перколяционного кластера, таких как остов (хребет), мертвые концы и внутренние пустоты. Образовавшийся перколяционный кластер (ПК) связанных частиц обеспечивает расплывание волновой функции носителей на макроскопическое расстояние. В основе образования ПК лежит так называемая геометрическая или квантовая перколяция.

Эксперименты по проводимости образцов позволяют установить момент появления ПК связанных металлических частиц, но из них невозможно получить какую либо информацию о структуре ПК, т.е. о его остове, мертвых концах и внутренних пустотах. Как известно, ПК является фрактальным объектом, поэтому не может быть однородным и сплошным. Полученные АСМ-изображения (рис. 9) можно отнести к ПК, полученным выше порога перколяции. Для получения нанообъектов на поверхности Bi_2Te_3 из $ZnSe$ с плотностью распределения ниже порога перколяции необходимы дальнейшие исследования.

Выводы

Анализ морфологии поверхности (0001) Bi_2Te_3 < $Cr, ZnSe$ > показал, что наночастицы формируются между слоями $T_e^{(1)}-T_e^{(1)}$ как в нанореакторе, так и в наноконтейнере.

Причина быстрого роста нанофрактальных «островков», по-видимому, заключается в том, что $ZnSe, Cr$, поступают из вакансий в теллуридные квинтеты.

Межслоевые примеси взаимодействуют друг с другом с образованием нанофрагментов из $CrSb, CrTe, ZnSe$.

Таким образом, в нанореакторе, между квинтетами $A_2^V B_3^{VI}$ самоорганизовались наночастицы с размерами 5 – 10 нм только из $CrSb$ и $ZnSe$, а в системе Bi_2Se_3 < Se > в межслоях самоорганизовались наночастицы из Bi_4Se_3 .

Литература

1. Тарасов П.М. Термоэлектрические, гальваномагнитные и магнитные свойства легированных монокристаллов $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$: автореф. кандидатской дис. / П.М. Тарасов. – Москва, 2009. – 21 с.
2. Третьяков Ю.Д. Синтез функциональных нанокмозитов на основе твердофазных нанореакторов / Ю.Д. Третьяков, А.В. Лукашин, А.А. Елисеев // Успехи химии. – 2004. – 73 (9), С. 974 – 998.
3. O. Rabin, P.R. Herz, S.B. Cronin, L. Lin, A.I. Akinwande, and M.S. Dresselhaus, *Mater. Res. Soc. Symp.Proc.* 637, 4.7.1 (2001).
4. K. Aleskerov, S.Sh. Kakhramanov, E.M. Derun, M.G. Pishkin, and G. Kavei, Some Peculiarities of Nanoobjects Formations in the Interlayer Space of Bi_2Te_3 Type Crystals, *Azerbaijan J. of Physics* XII (4), 41-45 (2007).
5. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров / Б.М. Смирнов. – М.: Наука, 1991, 134 с.
6. Jens Feder, *Fractals* (New York: Plenum Press, 1989), p. 250.
7. Гасенкова И.В. Исследование структуры монокристаллов твердых растворов на основе теллурида висмута / И.В. Гасенкова, Т.Е. Свечникова // Доклады VIII межгосударственного семинара. Термоэлектрики и их применения. – 2002. – С. 145 – 150.
8. Лукьянова Л.Н. Термоэлектрическая эффективность в твердых растворах p -типа на основе халькогенидов висмута и сурьмы при температурах выше комнатной / Л.Н. Лукьянова, В.А. Кутасов, П.П. Константинов, В.В. Попов // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, Вып. 8. – С. 1492 – 1497.
9. Гольцман Б.М. Подавление собственной проводимости в p - $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ пластической деформацией / Б.М. Гольцман, В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, Вып. 2. – С. 227 – 228.
10. Кульбачинский В.А. Аномальный эффект Холла и ферромагнетизм в новом разбавленном магнитном полупроводнике $Sb_{2-x}Cr_xTe_3$ / В.А. Кульбачинский, П.М. Тарасов, Э. Брюк // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т. 81, Вып. 7. – С. 426 – 430.
11. Двуреченский А.В. Физические явления и технологии в основе полупроводниковых наноструктур с квантовыми точками для ИК-диапазона / А.В. Двуреченский, А.И. Якимов // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73, № 1. С. 71 – 75.
12. Бондарь Н.В. Фотолюминесценция и энергия экситонов в перколяционном кластере квантовых точек $ZnSe$ как фрактальном объекте / Н.В. Бондарь, М.С. Бродин // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, Вып. 5. – С. 644 – 648.

Поступила в редакцию 08.04.2013.