

ПРОЦЕСС ПЕРКОЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ Bi_2Te_3 - In_2Se_3

Ф.К.АЛЕСКЕРОВ, К.Ш.КАХРАМАНОВ, С.Ш.КАХРАМАНОВ

НПО «Селен» НАН Азербайджана
AZ 1143, г.Баку, пр. Г.Джавида, 29а

Анализ АСМ-изображений в 3D- и 2D- масштабах твердых растворов (Bi_2Te_3 - In_2Se_3) выявил признаки диффузионной перколяции вблизи порога протекания на теллуридных квинтетах поверхности (0001), выполняющих роль решетки со сформированными на ней межслоевыми наноструктурными элементами. Расположение нанообъектов на поверхности (0001) Bi_2Te_3 - In_2Se_3 проявляет аналогию с моделированными двумерными перколяционными кластерами на квадратной решетке. АСМ-изображения, а также рентгендифрактограммы показали образование связанной сетки путей протекания из нанообъектов ($InSe$, $InTe$, In_3Te_4 и In_4Te_3).

Результаты термоэлектрических параметров вблизи Bi_2Te_3 (до 5mol% In_2Se_3) системы Bi_2Te_3 - In_2Se_3 и их межслоевой морфологии явились демонстрацией проявления перколяционного эффекта как в области твердого раствора, так и в среде $Te^{(I)}$ - $Te^{(II)}$ на поверхности (0001) Bi_2Te_3 - In

ВВЕДЕНИЕ

Исследования легированных соединений $A_2^V B_3^{VI}$ <примесь> с нанообъектами представляет особый интерес в связи с самоорганизацией в среде $Te^{(I)}$ - $Te^{(II)}$ $A_2^V B_3^{VI}$ межслоевых наноструктурных элементов (МНСЭ) [1], приводящей к ряду новых электронных свойств и применению их в термоэлектрическом охлаждении [2-3].

В процессе роста кристаллов, а также при последующей интеркаляции атомов Cu и Ni между слоями (квинтетами) $Te^{(I)}$ - $Te^{(II)}$ Bi_2Te_3 формируются нанообъекты на плоскости (0001) высотой 5÷12нм. За выявленные дополнительные серии осцилляций в направлении эксперимента $H \perp C \perp I$ ответственны межслоевые nanoостровки [4-5].

Кроме легкодиффундируемых примесей в межслои могут внедряться атомы, имеющие большие атомные и ионные радиусы, например, индий. Одним из примеров может быть работа [6], в которой показано, что при легировании Bi_2Te_3 индием анизотропия проводимости повышается, главным образом, за счет увеличения удельного сопротивления в направлении перпендикулярном слоям.

В этих кристаллах, как и в других слоистых системах, возможны два состояния примесей: примеси, внедренные в ковалентные слои, и примеси, внедренные в межслоевое пространство. В равновесном состоянии атомы примесей находятся между слоями (в ван-дер-ваальсовой щели) [5-7].

Такие объекты можно рассматривать как гетерофазные композиции с межслоевой фрактальной геометрией. При интерпретации и прогнозировании их свойств нужно учитывать перколяционные эффекты [8-10].

Вопросы влияния геометрической структуры фаз на процессы перколяции являются основными при изучении критических концентраций, соответствующих порогу перколяции. Для выявления конкретных составов сплавов с примесями в области аномалий, обусловленных образованием каналов протекания и процессами упорядочения, необходимо изучение макроскопической природы взаимодействия наноструктурных фрагментов, изучаемых методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Образования, через которые течет ток, можно назвать остовом перколяционного кластера [12-13].

Задача о протекании на поверхности (0001) $A_2^V B_3^{VI}$ - влияние геометрической структуры на процесс перколяции, и на экстремальные кинетические эффекты кристалла - в целом представляется весьма актуальной.

Для регулирования термоэлектрических свойств в гетерофазной области следует получать упорядочение МНСЭ в слоях, оптимизирующее перколяционные эффекты в самом твердом растворе на основе $A_2^V B_3^{VI}$ и в подсистеме, каковым рассматривается межслоевая поверхность кристалла. Тем самым можно создавать дополнительное рассеяние фононов на МНСЭ, в то же время, используя каналы протекания для прохождения тока, увеличивать проводимость.

Для выполнения этих задач можно изменять число, размеры МНСЭ и характер их распределения между слоями в кристаллической решетки $A_2^V B_3^{VI}$ <примесь>. Изучая морфологию межслоевой поверхности (0001) методом электронной микроскопии легированных систем в определенных пределах примесных концентраций можно оптимизировать их термоэлектрические параметры.

Целью работы явилось такое легирование системы твердых растворов ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$), морфология ван-дер-ваальсовой поверхности (0001) которых проявляла бы признаки перколяции с двумерными каналами протекания на них, приводящими к аномальным свойствам твердых растворов ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для анализа структурного состояния поверхности исследовалось около 5 кристаллов каждого из состава $Bi_2Te_3-In_2Se_3$ и $Bi_2Te_3<In>$. Из них выбирались АСМ-изображения сколотой поверхности, отображающие тенденцию, связанную с явлениями протекания, в частности, с геометрическими размерами МНСЭ и их распределением на поверхности (0001). В этом случае метод АСМ становился очень полезным, поскольку позволял исследовать топографию поверхности в 2D- и 3D- масштабах.

Электронно-микроскопические изображения получали на АСМ марки NC-AFM, а также на сканирующем электронном микроскопе марки SPM-9500J3. Рентгендифрактометрические исследования проводились на дифрактометре фирмы Philips Panalytical (XRD).

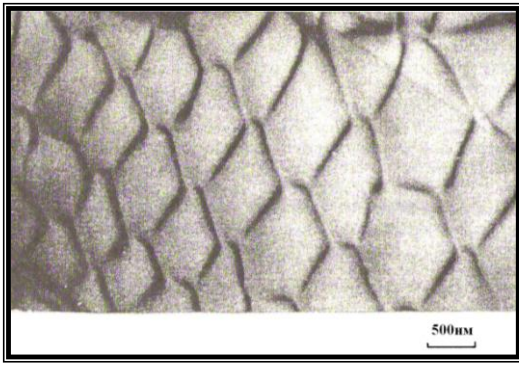
На основе вычисления коэффициента Холла (R), электропроводности (σ) были рассчитаны температурные зависимости подвижности (u), концентрации носителей тока (n) при следующих направлениях магнитного поля и тока: $H \perp C \perp I$ и $H \parallel C \perp I$, здесь H магнитное поле, I- ток через образец, C – главная ось 3-го порядка, параллельная базисной плоскости Bi_2Te_3 .

Измерения проводились в магнитном поле до 7Тл при 77÷300К. С целью выделения и усиления слабых осцилляций на фоне монотонных зависимостей измеряемых величин применялся сигнал компенсации линейный по магнитному полю. Применение модуляционной методики позволило еще более повысить разрешающую способность регистрирующей системы [4-5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нами проведен анализ структурного состояния базовой поверхности (0001) ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) методами АСМ, а также рентгендифрактометрическими исследованиями состава материалов, осаждающихся на поверхности (0001).

Предполагаемые пути диффузии частиц и их агрегации с дальнейшим образованием наноагрегатов связаны с процессом заполнения примесями мест вокруг дислокационных сеток и вакантных узлов, каковыми можно считать теллуридные вакансии, на ван-дер-ваальсовой поверхности (0001) ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$). Скопления дислокационных сеток обнаружены в кристаллах типа Bi_2Te_3 , их фотография представлена на Рис.1 [7]. За счет взаимодействия вокруг этих



дислокационных сеток скапливаются примеси, образуя нанобъекты в том числе и МНСЭ.

Рис.1.

Дислокационная сетка в монокристалле теллурида висмута стехиометрического состава [7].

Формирование nano-ячеек происходит в процессе диффузии примесей вдоль базовой поверхности (0001) и с ростом МНСЭ с поверхности на вакансии Te на тех же теллуридных квинтетах. В результате роста нанофрагментов с поверхности образуются постепенно растущие МНСЭ. Взаимодействуя между собой, сближаясь и соприкасаясь друг с другом образуются нанослоевые фрактальные поверхности на базисной плоскости (0001), что отражается на их топографии в трехмерных АСМ-изображениях.

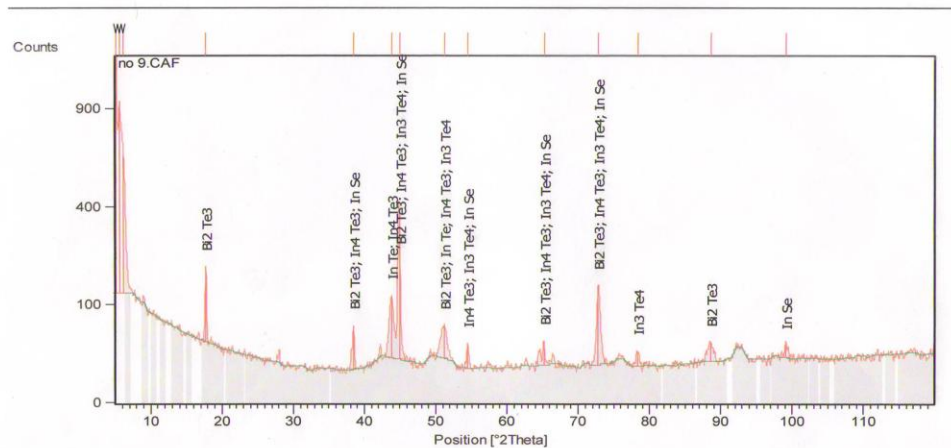


Рис.2.

Рентгendifрактограмма поверхности (0001) $\text{Bi}_2\text{Te}_3\langle\text{In}\rangle$ с МНСЭ, служащая двумерной перколяционной решеткой.

На Рис.2 представлена рентгendifрактограмма поверхности твердого раствора ($\text{Bi}_2\text{Te}_3 \cdot 99,5\text{mol}\% - \text{In}_2\text{Se}_3 \cdot 0,5\text{mol}\%$). Как видим, на поверхности (0001) внутри среды $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ слоистого кристалла помимо основных пиков сформировались МНСЭ из In_4Te_3 , In_3Te_4 , InSe и InTe . Таким образом пространство $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ Bi_2Te_3 явилось наноконтейнером, сформировавшая МНСЭ из In_4Te_3 , In_3Te_4 , InTe и InSe .

На Рис.3 дано изображение той же поверхности (0001) ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}_2\text{Se}_3 99,8\text{mol}\%$), полученное на сканирующем электронном микроскопе марки SPM-9500J3. Распределение нанобъектов на поверхности (0001) свидетельствует об отсутствии порога перколяции. Ниже порога перколяции (Рис.3) формируются только единичные МНСЭ конечных размеров (на рисунке они отмечены стрелками).

Представленное АСМ-изображение в 2Д-масштабе этой же поверхности на Рис.4 подтверждает распределение нанобъектов с нижним порогом перколяции. Более густое их распределение, видимое на Рис.5 по сравнению с распределением данным на Рис.3 и Рис.4 связано с диффузией в пространстве (0001) Bi_2Te_3

большого количества In при градиентном отжиге, когда атомы агрегируют на дефектной поверхности (на Рис.4 МНСЭ отмечены стрелками). На Рис.5 приведено АСМ-изображение в 2D-масштабе частиц, распределенных с вероятностью занятия узлов как ниже порога перколяции (правая часть), так и на пороге перколяции (левая нижняя часть рисунка). Левая верхняя часть Рис.5 представляет собой структуру связанных узлов (они отмечены извилистыми линиями).

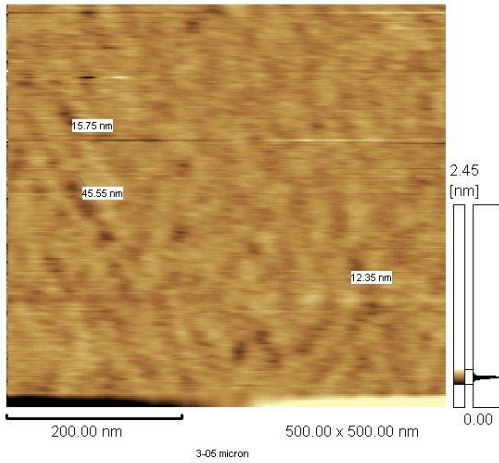


Рис.3.

Электронно-микроскопическое изображение поверхности (0001) $Bi_2Te_3<In>$ (нижний порог перколяции).

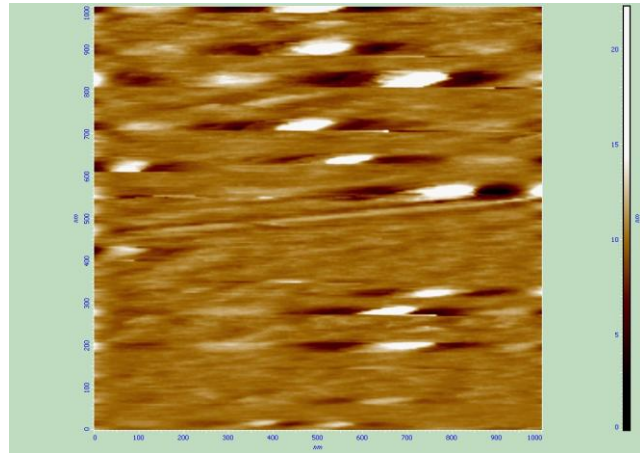


Рис.4.

АСМ-изображение в 2D- масштабе поверхности (0001) $Bi_2Te_3<In>$ ниже порога перколяции.

Процессы перколяции в кристаллах $Bi_2Te_3<In>$ следует рассматривать как моменты, возникающие при просачивании (диффузии) вдоль базисной плоскости и последующей агрегации атомов на скопившихся вакансиях в решетке на плоскости (0001). Они локализовываются и, агрегируя, создают зоны скоплений МНСЭ.

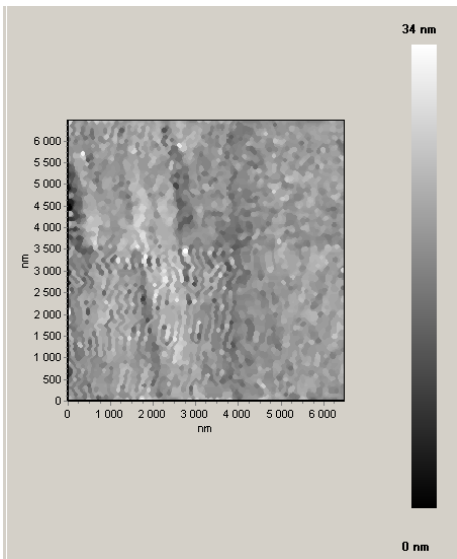


Рис.5.

АСМ-изображение в 3D- масштабе поверхности (0001) $Bi_2Te_3<In>$ (справа нижний порог перколяции, слева- область с каналами протекания).

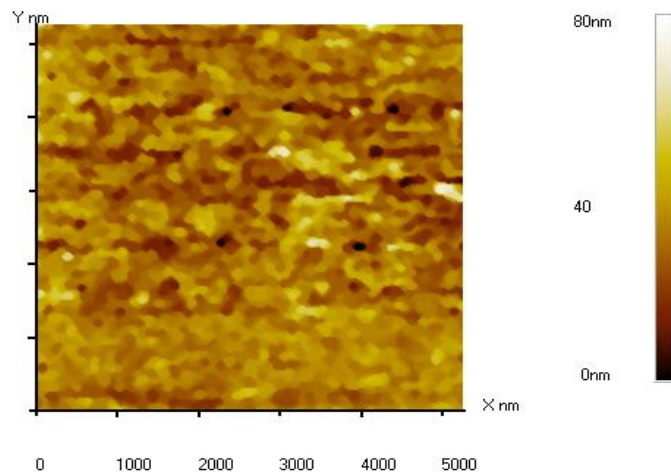
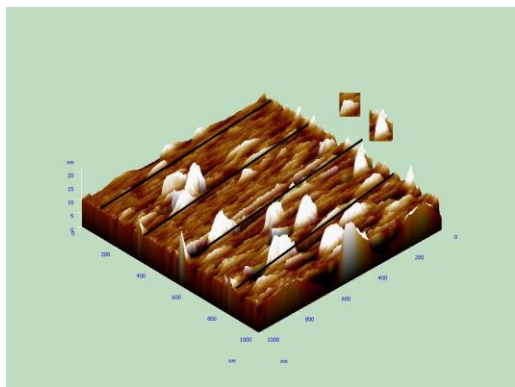


Рис.6.

АСМ-изображение в 3D- масштабе поверхности (0001) $Bi_2Te_3<In>$ со смешанной переходной областью (справа-область отражающая порог перколяции, слева-область выше порога перколяции с каналами связности (протекание)).

Как видим, реальной информацией о структуре нанобъекта являются его фотографии, полученные с помощью АСМ-изображений в 2Д- и 3Д- масштабах. Из представленного на Рис.6 АСМ-изображений в 2Д-масштабе твердого раствора ($\text{Bi}_2\text{Te}_3 \cdot 99,0\text{mol}\% - \text{In}_2\text{Se}_3 \cdot 1,0\text{mol}\%$) можно судить, что самоорганизация в пространстве $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$ переводит МНСЭ из отдельных локальных состояний в состояние с плотностью распределения, близкое к порогу перколяции. АСМ-изображения в 3Д-масштабе выше порога перколяции поверхности для (0001) $\text{Bi}_2\text{Te}_3 \cdot 98,0\text{mol}\% - \text{In}_2\text{Se}_3 \cdot 2\text{mol}\%$ наглядно демонстрируется на Рис.7.



Причем границы протекания формируются вдоль направления (0001) роста кристалла (направления роста на Рис.4, Рис.5, Рис.7 указаны стрелкой). Эти области (остовы перколяционного кластера) отмечены тонкими линиями как в 2Д- так и в 3Д- масштабах на Рис.5 и Рис.7. Отдельные МНСЭ, наблюдаемые на Рис.7, выделены на рисунке сбоку.

Рис.7.

АСМ-изображение поверхности (0001) $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}$ в 3Д-масштабе с каналами протекания в виде слипшихся МНСЭ.

ПРОЦЕССЫ АГРЕГАЦИИ И ПЕРКОЛЯЦИИ

Рассмотренный процесс агрегации частиц в пространстве $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ $A_2^V B_3^V$ близок к модели описания сборки фрактальных кластеров Виттена и Сандера [11]. В этой модели предполагается, что частица, совершающая движение в пространстве, соприкасаясь с кластером, с определенной вероятностью прилипает к нему. В простейшей постановке в двумерном пространстве $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}$ получается так, что поверхность (0001) рассматривается как квадратная решетка (ячейка). При этом каждая частица передвигается в соседнюю клетку случайным образом. Если частица достигает границы $\text{Te}^{(1)}$, то она либо отражается от нее, либо осаждается в теллуридных вакансиях и на дислокационных сетках. Агрегируя, частица останавливается и закрепляется в данной решетке. Процесс диффузии, продолжаясь, формирует двумерный поверхностный кластер перколяционного типа, простирающийся вдоль базисной поверхности (0001). На Рис.5 и Рис.7 мы соединили линией те из ближайших МНСЭ (узлов), между которыми может осуществляться электрическая проводимость. Перколяционным кластером здесь можно назвать простирающиеся нанобъекты вдоль поверхности (0001) из соединенных МНСЭ линий; такие изогнутые линии даны на Рис.5. Начиная с некоторой плотности МНСЭ, сближаясь, становятся бесконечным во внутрислоевом пространстве Bi_2Te_3 . Такой перколяционный кластер также имеет фрактальную структуру.

Процесс диффузии распространяется бесконечно и его динамика определяется случайным характером движения частиц. Случайность процесса перколяции связана со средой $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ и существует порог, ниже которого процесс перколяции ограничен конечными областями (Рис.3).

На определенных стадиях МНСЭ вырастают перпендикулярно плоскости (0001), что хорошо видно из АСМ-изображений в 3Д- масштабе (Рис.7). Процесс коагуляции внутри слоев $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}$ достигает своего пика, при котором соприкасающиеся друг с другом МНСЭ объединяются в единую фрактальную поверхность выше порога перколяции (Рис.5 и Рис.7).

МНСЭ и их распределение следует рассматривать как один из факторов, определяющих пороги перколяции на решетке в плоскости (0001) $A_2^V B_3^V$ <примесь>. В слое $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ на ван-дер-ваальсовой поверхности, имеющей наибольший «зазор», размещены комплексы примесных и других дефектных структурных нанобразований (Рис.2) ($InTe$, $InSe$, In_3Te_4 и In_4Te_3).

Таким образом формируются бесконечно связанные структуры, состоящие из отдельных МНСЭ, и соединенные друг с другом непрерывной цепочкой; при этом по проводящим каналам (связям) через связанные МНСЭ может течь ток.

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$)

В системе ($Bi-Te-In$) со стороны теллурида висмута наблюдалась растворимость в ней до 7моль% In_2Se_3 . В этой системе при содержании In_2Se_3 -0,5моль% образуются твердые растворы замещения, т.е. образуются дефекты типа In_{Bi} и Se_{Te} .

Используя экспериментальные и теоретические расчеты [6], а также наши результаты, попытаемся внести ясность в изменения термоэлектрических параметров (α -термоэдс, σ -электропроводность) в зависимости от типа образующихся дефектов в структуре твердого раствора ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) и от влияния подсистемы межслоевых МНСЭ и их перколяции. Эту особенность изменений в твердых растворах можно объяснить зависимостью типа дефектов, образующихся в решетке теллурида висмута, от количества вводимых атомов индия и селена. Формула соединения теллурида висмута может быть записана в виде $(BiTe)_2^+ Te^{2-}$, что отражает характер связи в этом соединении: атомы $Te^{(II)}$ крайних слоев пятислойных пакетов элементарной ячейки этого соединения, образующие посредством p -электронов σ -связь с атомами висмута [13] отдают связи Te^I-Bi по одному p -электрону, что обуславливает двухкратную ионизацию атомов $Te^{(I)}$; (Te^I -это внутренний слой пятислойного пакета [3]). В результате этого связь атомов $Te^{(I)}$ с атомами соседних слоев висмута носит ионный характер и изовалентное замещение халькогена без изменения структуры происходит по слоям $Te^{(I)}$. В твердых растворах исследуемой нами системы ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) помимо дефектов типа Bi_{Te} имеют место также антиструктурные дефекты типа In_{Te} . Антиструктурные дефекты In_{Se} будут создавать в валентной зоне большее число вакансий, чем антиструктурные дефекты Bi_{Se} . Это должно привести к увеличению дырочной концентрации и небольшому росту ширины запрещенной зоны [13]. Такое изменение характера связи будет препятствовать образованию дефектов типа Bi_{Te} и In_{Te} и способствовать образованию твердых растворов замещения висмута на индий и теллура на селен. Изложенное дефектообразование способствует легкому формированию на поверхности (0001) ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) МНСЭ. Изученная морфология внутрислойной поверхности свидетельствует об образовании квазидвумерных слоев и возникновении проводящих каналов.

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$)

Полученные нами наноструктурные слои выполняют роль электронных каналов на внутрислойной поверхности (0001). Таким образом, образование каналов протекания, подобных изложенному в [8], возможно и между слоями $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ в $Bi_2Te_3<In_2Se_3>$.

В этой системе ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) аномальные свойства коэффициента Холла можно интерпретировать процессами перколяции с образованием связанных каналов из МНСЭ. Для подтверждения этого изучены температурные зависимости $R=f(T)$, а также зависимость α и σ от состава в твердом растворе $Bi_2Te_3<In_2Se_3>$.

Температурные зависимости (при $77 \div 300\text{K}$) R_x , ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}_2\text{Se}_3$ 1 моль%) при направлениях эксперимента $H \parallel C \perp I$ и $H \perp C \perp I$ приведены на Рис.8. Рассчитаны концентрации и подвижность носителей заряда. Мы приводим только зависимость коэффициента Холла от температуры (Рис.8). Обнаружены аномальные изменения R при температурах 100K и 125K при $H \parallel C \perp I$ (кривая-1) и при $H \perp C \perp I$ (кривая-2) с противоположными изменениями абсолютного значения при указанных температурах. Аналогичные аномалии на температурных зависимостях коэффициента Холла, концентрации и подвижности носителей в $\text{Bi}_2\text{Te}_3\langle\text{Cu}\rangle$ как для направлений параллельно, так и перпендикулярно оси C ранее мы отчетливо наблюдали при температурах около ($290 \div 310\text{K}$), ($155 \div 150\text{K}$), ($105 \div 120\text{K}$), ($80 \div 90\text{K}$) [4]. В районе вышеуказанных температур происходит увеличение холловской концентрации носителей перпендикулярно слоям и уменьшение вдоль слоев.

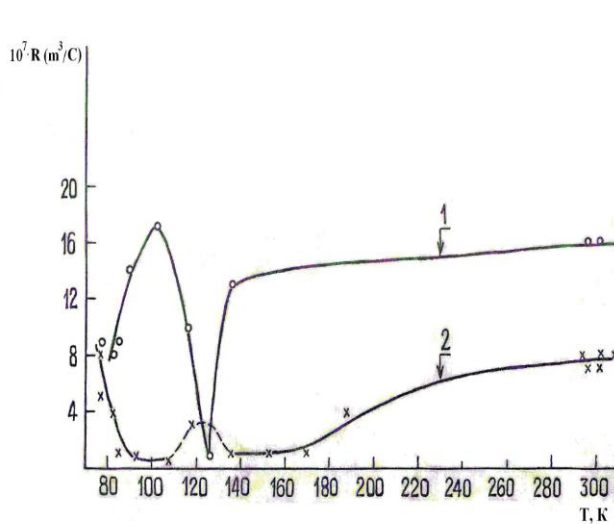


Рис.8.

Температурная зависимость коэффициента Холла кристалла $\text{Bi}_2\text{Te}_3\langle\text{In}\rangle$ на пороге перколяции.

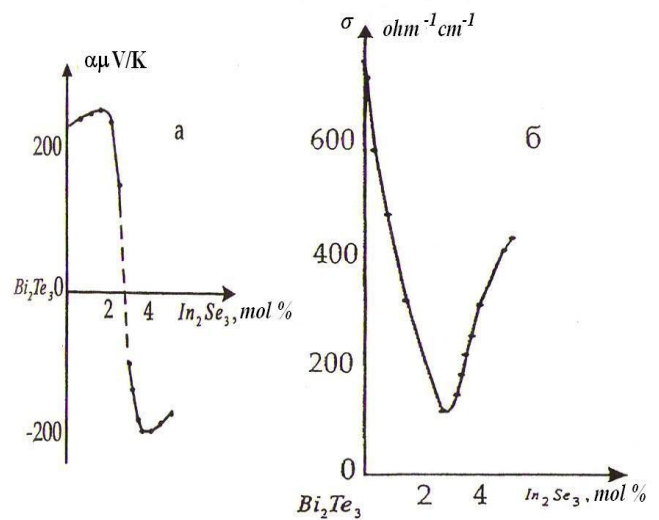
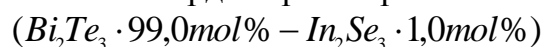


Рис.9.

Зависимость термоэдс – (а) и электропроводности (б) от состава твердых растворов системы ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}_2\text{Se}_3$).

Перколяционные структуры на поверхности полупроводников и между слоями в слоистых квазидвумерных системах играют значительную роль в аномалиях R_x и других кинетических эффектах не только при $T=4,2\text{K}$ [4], но и при более повышенных температурах вплоть до 273K .

На Рис.9 даны зависимости α и σ от состава в системе ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}_2\text{Se}_3$), свидетельствующие о процессах перколяции и в исследуемых твердых растворах. Как видим, интересной особенностью образцов теллурида висмута, легированных индием (например, в системе $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}_2\text{Se}_3$) в зависимости от количества введенного (In_2Se_3) является инверсия знака проводимости с p - на n -тип (Рис..9). Атомы индия, являясь центрами искажения связи, согласно теории [8] усиливают перколяционный процесс в твердом растворе, при этом снижается теплопроводность кристаллической решетки, что приводит к повышению термоэлектрической добротности (z) данного состава твердого раствора



до $3,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. По всей вероятности, можно считать, что решающую роль в механизме возникновения аномальных эффектов играют морфологические строения и структура межслоевых объектов не только в $\text{Bi}_2\text{Te}_3\langle\text{Cu}\rangle$ [4], но и в

$Bi_2Te_3<In>$. Об этом свидетельствует АСМ-изображение поверхности (0001) $Bi_2Te_3<In>$ в 2D-масштабе, а также такие же расположения МНСЭ (в 3D-масштабе) между слоями $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ в легированных кристаллах теллурида висмута.

ВЫВОДЫ

Анализ морфологии поверхности (0001) ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) показал, что МНСЭ формируются на дислокационной сетке и вакантных узлах теллуридных квинтетов.

Диффузионные процессы, в направлении базовой поверхности (0001) твердого раствора ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) не только формируют отдельные наноструктурные элементы, но и соединяют их непрерывной цепочкой, образуя каналы протекания вдоль направления роста кристалла. Процесс агрегации и перколяции МНСЭ в пространстве $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ твердого раствора ($Bi_2Te_3-In_2Se_3$) сходен с моделью описания сборки перколяционного кластера на свободной решетке, варианты которой моделированы в [11-12].

Каналы протекания играют основную роль в аномалиях кинетических эффектов, например, в температурной зависимости коэффициента Холла при повышенных температурах (100 и 125К). Порог перколяции в подсистеме наночастиц межслоевой поверхности (0001) и в твердом растворе системы ($Bi_2Te_3 \cdot 99,0mol\% - In_2Se_3 \cdot 1,0mol\%$) был продемонстрирован электронномикроскопическими изображениями в 2D-масштабе и наличием перегибов на графике зависимости термоэдс и электропроводности в области составов до $5mol\%In_2Se_3$.

При разработке термоэлектрических сплавов с высокой добротностью учет порога перколяции МНСЭ в твердых растворах на основе слоистых кристаллов может оптимизировать Z_{max} .

1. Ф.К.Алескеров, С.Ш.Кахраманов, Е.М.Дерун, М.Г.Пишкин, *Fizika*, **XIII** № 4 (2007) 41.
2. Е.Д.Моройдор, М.Г.Пишкин, С.Ш.Кахраманов, *Transactions of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical-mathematical and Technical sciences, Physics and Astronomy*, **XXVII** № 2 (2007) 43.
3. Б.М.Гольцман, В.А.Кудинов, И.А.Смирнов, *Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3* . Наука, Москва, (1972) 319.
4. С.Ш. Кахраманов, *Неорганические материалы*, **44** №1 (2008) 17.
5. Ф.К.Алескеров, С.Ш.Кахраманов, *Металлофизика, новейшие технологии, Metallofiz. Noveishie Technol., (Украина)*, **30** (2008) 1465.
6. Н.А.Абдуллаев, С.Ш.Кахраманов, Т.Г.Керимова, К.М.Мустафаева, С.А.Немов, *Физика и техника полупроводников*, **43** 2 (2009) 156.
7. И.В.Гасенкова, Т.Е.Свечникова, *Термоэлектрики и их применения, Санкт-Петербург*, (2002) 145.
8. Е.И.Рогачева, *Международный журнал «Термоэлектричество»*, №2 (2007) 64.
9. А.А.Снарский, М.И.Женировский, *Международный журнал «Термоэлектричество»*, №3 (2007) 65.
10. А.А.Снарский, М.И.Женировский, И.В.Безсуднов, *Физика и техника полупроводников*, **42** (2008) 82.
11. Е.Федер, *Фракталы, Изд. Мир*, (1991) 258.
12. Б.Б.Мандельброт, *Фрактальная геометрия природы, Изд. Москва*, (2002) 185.
13. Ф.К.Алескеров, К.Ш.Кахраманов, С.Ш.Кахраманов, *Термоэлектрики и их применения, Санкт-Петербург*, (2002) 180.

F.K.ƏLƏSGƏROV, K.Ş.QƏHRƏMANOV, S.Ş.QƏHRƏMANOV

Bərk məhlulların sistemi ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-In}_2\text{Se}_3$) atom-güclü mikroskopda (AGM) 2D- və 3D- ölçülərində tellur kvintetlərində perkolyasiya əlamətləri müəyyən olunub. Nanostrukturlu səthində (0001) diffuziya prosesi zamanı perkolyasion nanoobyektlər yaranır. (0001) səthində $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{<In}_2\text{Se}_3$ istiqamətləşmiş aralıq obyektlərin strukturasına modelləşdirilmiş iki ölçülü barmaqlı perkolyasion klasterlərin analoqu kimi baxmaq olar.

AGM- şəkilləri və rentgendifraqtoqramma göstərmişdir ki, torlu yolları aşağıdakı nanoobyektləri formalaşdırıb: InSe , InTe , In_3Te_4 və In_4Te_3 .

Termoelektrik xəssələrinin parametrləri və aralıq $\text{Te}^{(1)\text{-Te}^{(1)}}$ ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{<In}_2\text{Se}_3$) morfoloqiyası göstərdi ki, perkolyasiya prosesləri həm bərk məhlullarda, həm (0001) səthində aşkar olunur.

THE PERCOLATION PROCESS IN ($\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{In}_2\text{Se}_3$) SYSTEM

F.K.ALESKEROV, K.SH.KAGRAMANOV, S.SH.KAGRAMANOV

The analysis of AFM-images in 3D- and 2D-scales in solid solutions ($\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{In}_2\text{Se}_3$) have revealed the characteristics of diffusion percolation near passing threshold on telluride quintets of (0001) surface playing role of lattice formed by interlayer nano-structural elements on it. The dislocation of intralayer nano-objects on (0001) surface of $\text{Bi}_2\text{Te}_3 < \text{In}_2\text{Se}_3 >$ has had the analogy with modulated 2D percolation clusters on quadratic lattice. AFM-images and also roentgeno-diffractograms show the formation of connected net of passing ways from nano-objects (InSe , InTe , In_3Te_4 and In_4Te_3).

The results of thermoelectric properties near Bi_2Te_3 (up to 5 mol% In_2Se_3) of $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{In}_2\text{Se}_3$ system and their intralayer morphology have been the demonstration of percolation effect revealing in both the solid solution region and $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$ medium.

Редактор: Дж.Абдинов