

FİZİKA

УДК 546.87/86"24:54-1165

ПОРИСТОСТЬ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ $A_2^V B_3^{VI}$ М.А.РАМАЗАНОВ*, Ф.К.АЛЕСКЕРОВ**,
С.Ш.КАХРАМАНОВ**, С.А.НАБИЕВА**

*Бакинский Государственный Университет

**НПО «Селен» НАНА

nanomaterials@bsu.az

В морфологии поверхности природных “пчелиных сот” и наноструктурированных кристаллов Sb_2Te_3 (Bi_2Te_3) выявлены геометрически подобные структуры с порами, наностровками, гексагональные формы пор в матрице кристалла.

Поры являются неотъемлемой частью пластинных фаз теллура в эвтектиках систем $A_2^V B_3^{VI}-Te$, а поверхностные наностровки частью $Bi_2Te_3, (Sb_2Te_3)$; причем поверхностные кластеры фазы $Bi_2Te_3, (Sb_2Te_3)$ вклиниваются в поры теллуридных пластин.

Сформированные ячейки Бенара и нанообразования свидетельствуют о том, что деформированная область $Te^{(1)}-Te^{(1)} A_2^V B_3^{VI}$ является средой и местом локализации наноразмерных диссипативных структур.

Ключевые слова: наностровки, поры, фазы, матрица, соты, морфология, диссипативные структуры.

С образованием вакансий и межузельных атомов, структура кристаллической решетки вблизи них искажается за счет смещений атомов в упругих полях дефектов, что вызывает локальное нарушение плотности и образование пор. Точечные дефекты, взаимодействуя с линейными дефектами структуры, создают объемные поры различных типов. Указанные дефекты отражаются на особенностях структурной самоорганизации в $A_2^V B_3^{VI}$ и условиях геометрического топологического соответствия взаимодействующих структурных элементов (атомами Bi и Te). Основные физические проблемы состоят в выяснении элементарных процессов встраивания и отрыва атомов, протекающих на поверхности (0001), под этой поверхностью и между квинтетами $A_2^V B_3^{VI}$.

Актуальным становится изучение микроморфологии границ раздела квинтет-квинтет в дефектной кристаллической решетке. Несмотря на многочисленные исследования структуры отсутствует детальная информация о микроморфологии, кинетике адатомов и механизмах их взаимодействия со стоками между квинтетами элементарной кристаллической решетки.

Среди разнообразных наноструктурированных сред следует особо отметить пористые полупроводники, образованные путем смещения части материала в объем и даже выходом примесей на поверхность кристалла.

Возникающие при этом поры и нанокристаллы в них имеют размеры от единиц до сотен нанометров. При этом физические свойства сформированных структур отличаются от свойств исходного материала зачастую радикально [1-4]. Можно выделить три основные причины модификации их свойств:

- 1) квантоворазмерные эффекты для нанообъектов, размеры которых сопоставимы с длиной волны де Бройля электрона;
- 2) поверхностные эффекты, связанные с появлением новых электронных и фононных состояний; Увеличение площади поверхности кристалла после образования пор на несколько порядков.
- 3) локальные поля в нанокompозитной среде, которые определяются размерами, формой и упорядоченностью нанообъектов.

Большие успехи в исследовании наноструктур пористых сред достигнуты, например, для пористого кремния (ПК), который представляет собой набор кремниевых нанокристаллов, разделенных порами [1-2].

Рассмотрению диффузионного рассеяния на кристалле с порами в форме вытянутого сфероида, представляющего собой эллипсоид, посвящена работа [5]. Разработанная теория позволяет проводить численное моделирование диффузионного рассеяния от кристалла со сфероидальной формой пор. Анализ диффузионного рассеяния позволяет получать информацию о размерах пор, их ориентации относительно входной поверхности кристалла, наличии или отсутствии пространственного порядка.

Имеются два подхода к определению понятия пористости. Один из них основан на представлении о порах как о характерном и неотъемлемом "компоненте" структуры, определяющем происхождение, свойства и назначение материала. Такой подход является обычным для объектов, содержащих значительное число пустот. В [2-3] обосновывается возможность формирования примесной фазы в порах нанометрового размера. Для этого проведено сравнение свободных энергий примесных атомов, находящихся в объеме образца (содержащего поры), на поверхности образца или на внутренних поверхностях пор, которое показало, что обра-

зование примесной фазы в порах возможно при определенных соотношениях между термодинамическими величинами.

В [1] методом электронной сканирующей микроскопии впервые обнаружены микротрубки прямоугольного сечения, формирующиеся в объеме слоистых кристаллов CdI_2 , легированных трехвалентными примесными ионами Bi^{3+} . Они вырастают преимущественно в порах, которые возникают в объеме кристаллов CdI_2-BiI_3 вследствие различия валентности ионов Cd^{2+} и замещающих их ионов Bi^{3+} . Установлено, что микротрубки формируются преимущественно на стенках макроскопических пор существующих в объеме кристаллов CdI_2-BiI_3 , а также на ступеньках. Микротрубки выявлены только в CdI_2-BiI_3 и не наблюдаются в кристаллах CdI_2 , легированных иными одно- или двухвалентными примесями.

Другой подход к определению понятия пористости заключается в рассмотрении пор как *трехмерных несовершенств* структуры твердого тела наряду с нульмерными, одномерными и двумерными дефектами [6].

При изучении кинетики и механизмов процессов порообразования целесообразно пористость, возникающую в твердых телах, делить по генезису на следующие виды: 1. *конденсационную* пористость; 2. *диффузионную* пористость;

Коагуляция избыточных вакансий в макроскопические поры, каждая из которых является стоком для них, играет существенно большую роль в уменьшении концентрации вакансий. Это связано с тем, что в данном процессе путь, который должна проделать вакансия для того, чтобы получить возможность уйти из пересыщенного раствора, представляет собой величину порядка долей размера зерна. Заметим, что этот процесс связан с появлением дополнительных поверхностей раздела между порами и решеткой и, таким образом, ведет к установлению квазиравновесного состояния; истинное равновесие может наступить после ухода всех избыточных вакансий за пределы образца, т. е. после завершения «спекания» возникших макроскопических пор.

Работы последних лет создали прочную экспериментальную основу теории диффузионных явлений в металлах и твердых растворах замещения, в основе которой лежат представления о вакантных узлах кристаллической решетки. В частности, эти представления оказались существенными не только для установления механизма и кинетики процесса диффузионной гомогенизации, а также для развития теорий таких явлений, как спекание металлических порошков, диффузионная ползучесть металлов [6-8].

Так как диффузионная пористость возникает в процессе коагуляции избыточных вакансий в решетке, пересыщенной вакансиями вследствие неравенства диффузионных потоков, то естественно рассмотреть рас-

пределение избыточных вакансий в диффузионной зоне (в области $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}\text{A}_2^{\text{V}}\text{B}_3^{\text{VI}}$).

Свободная энергия поры определяется числом оборванных связей, исходящих из кристалла в пору. В условиях равновесия поверхность поры заданного постоянного объема V должна обладать минимальной плотностью оборванных связей. В этом случае пора приобретает конфигурацию, так называемого, "отрицательного кристалла"[6].

Для исследования пор размером более 30—50 нм широко применяют *сканирующую зондовую микроскопию*. Электронно-микроскопические изображения пор и наностроек в системах $\text{A}_2^{\text{V}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ нами были получены на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) марки Solver Next.

Целью работы является выявление природы нано- и макро-пористости в системах $\text{A}_2^{\text{V}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ и природных диссипативных структурах.

Полученные результаты и их обсуждение

Высокоупорядоченные самоорганизующиеся образования пор в изученных системах, далеких от равновесия, обладают определенной формой и характерными пространственно-временными размерами, они устойчивы относительно малых возмущений (см.рис.1-2).

Поверхность выявленных пор шестигранная, тип поры - открытые тупиковые и конусообразной формой дна поры (см. рис.1 и 3). При их формировании проявляются механизмы конденсационной и диффузионной пористости [6-8].

Приведенные нами экспериментальные формы дефектов свидетельствуют не только о фракталоподобности природных процессов, но и о распространении их на нанообъекты, формирующиеся в слоистых системах (см. рис.2-3). Возможные протекающие реакции при образовании гексагональных сеток аналогичны реакциям в Sb_2Te_3 [9-11]. Проанализировав структуры нанообъектов, можно сказать, что за кажущимся хаотическими образованиями стоят законы роста фрактальной формы [12-16]. Эти структуры идентичны таковым, полученным при моделировании ограниченной диффузией кластеризации на гексагональной решетке типа «пчелиные соты» [17-18].

Результаты исследований на ван-дер-ваальсовой поверхности кристаллов Sb_2Te_3 , Bi_2Te_3 трехмерных пор, подобным «пчелиным сотам» с шестигранной формой даны на рис.1,b.

Рассмотренные нанообъекты (рис.2) интересны тем, что они распределены равномерно и регулярны, их единичные фрагменты повторяются (см.рис.3). Нанопоры представляющие собой шаблоны-структуры – паттерны, находящиеся между квинтетами $\text{Te}^{(1)}\text{-Te}^{(1)}\text{A}_2^{\text{V}}\text{B}_3^{\text{VI}}$, являются неотъемлемой «частью» гексагональной структуры кристаллической ре-

сетки с пустотами, что совпадает с условиями минимальной плотности оборванных связей и конфигурацией с ограниченными кристаллографическими плоскостями, что гармонирует с теоретическими представлениями, изложенными в [4,8].

На рис.2. представлены СЗМ- изображение в 2D-масштабе поверхности (0001) Sb_2Te_3 : наверху слева, а также справа выделены наноформы, аналогичные ячейке Бенара; их размеры колеблются в пределах 10-12нм. В середине во вставку сверху выделены шестигранные (~50нм) сетки с дефектами в виде пор, отдельный фрагмент в 3D-масштабе поры в Sb_2Te_3 дан на рис.3.

Физические процессы в межслоевых островковых системах являются источником важной информации о характере взаимодействия между атомами, мигрирующими по поверхности (0001) кристалла и элементами реальной структуры паттернов-пор (рис.3) с наноразмерными параметрами.

На рис.4а. даны СЗМ- изображения в 2D- масштабe поверхности (0001) Sb_2Te_3 ; из профилограммы (вдоль линии 1 рис.4а), представленной на рис.4б видно, что высота межслоевых ячеек Бенара колеблется в пределах (12-16) нм, ширина имеет размеры порядка 10 нм. Эти структуры упорядочены, схожи с диссипативными структурами и сформированы в процессе самоорганизации в среде $\text{Te}^{(I)} - \text{Te}^{(I)} \text{A}_2^{\text{V}} \text{B}_3^{\text{VI}}$.

Кроме приведенных структур в однофазных системах $\text{A}_2^{\text{V}} \text{B}_3^{\text{VI}}$ можно привести примеры НО и пор в композитах в многофазных эвтектических системах на основе $\text{A}_2^{\text{V}} \text{B}_3^{\text{VI}} - \text{Te}$ (см. рис.5 и 6). Макропоры эллипсоидальной формы представлены во вставке на рис. 6а.

Поры располагаются преимущественно в подповерхностном слое в агрегированных областях с насыщенными областями вакансий. Исследованные поры различаются размерами, морфологией и локализацией; т.е. имеют признаки диффузионных пор. Они имеют малый размер, округлую форму и располагаются непосредственно вблизи наружной поверхности кристалла. Такие поры образуются в результате диффузии атомов к поверхности (0001) кристалла $\text{Sb}_2\text{Te}_3(\text{Bi}_2\text{Te}_3)$. Они представлены на (рис.5 и 7,с) отмечены черными кругами, а на рис.7с отмечены белыми кругами.

Характеристики пор (высота, ширина) на поверхности (0001) даны на рис.8. Из профилограммы (см.рис. 8б) видно, что размеры дна пор составляют 35-40нм, а средний размер ширины колеблется от 65 до 70 нм. Образование НО (вернее кластеров) в исследованных порах иллюстрируется на рис.9. Экспериментально и теоретически это подтверждено результатами работ [1, 9-11].

Был проведен анализ природных структур-пор, наноструктурированных кристаллических образцов и выявлены подобные объекты методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) и в объеме кристаллов типа

$A_2^V B_3^{VI}$. НО в $A_2^V B_3^{VI}$ играют особую роль в рассеянии электронов и фононов при формировании наноструктурированных материалов. При возникновении гексагональных пор и НО в них, на ван-дер-ваальсовской поверхности в процессе роста кристалла при некоторых критических условиях изложенных в [12] возможно разрушение определенной части квинтета кристаллической решетки и на их месте формирование и локализация упорядоченных НО (приведенные на рис.9). При этом, НО различных высот в основании приобретают конфигурацию нанопор.

Наряду с микродеформацией в деформируемом кристалле $A_2^V B_3^{VI}$ происходит макропластическое течение, в котором участвуют трехмерные структурные элементы. Причем физические теории, описывающие микродеформацию, не дают прямого представления о деформации тела в целом, поскольку не могут описать макродеформацию. Эту проблему решают только с учетом иерархии структурных уровней деформации. В соответствии с общими закономерностями поведения неравновесных систем [12] деформируемую часть кристалла можно рассматривать как систему, в которой в ходе деформации возникает диссипативная структура (подобная ячейкам Бенара). С этих позиций трактуют явление фрагментации деформируемого твердого тела. В общем случае существует иерархия ее уровней, определяемая как исходной структурой среды, так и возникновением диссипативной структуры, связанной с деформационными дефектами.

Принципиальная возможность возникновения таких структур в кристаллах связана с формированием при деформации сдвига- неустойчивых дефектных фаз. Эти фазы, образующие границы квинтетов диссипативной структуры неравновесны. В ходе деформации они перемещаются, разрушаются, вновь образуются как в наноконтейнере, находясь в динамическом равновесии с другими слабodeформированными частями кристалла.

Данные на рис.1,a,b, фотографии схожи по виду, но различаются размерами гексагональных сеток и высотами пор.

При этом можно выделить следующие условия самоорганизации в таких системах с образованием структур схожих с диссипативными:

- В среде $Te^{(1)}-Te^{(1)} A_2^V B_3^{VI}$ между квинтетами в процессе самоорганизации и бифуркации происходит переход порядок \rightarrow беспорядок \rightarrow порядок с образованием нанообъектов: ячеек Бенара, пор и НО;

- объем системы достаточно велик и превосходит некоторый критический объем (более 20нм), в котором происходит необходимое число незатухающих флуктуаций; взаимодействие этих флуктуаций создает упорядочение в системе с образованием на месте пор НО;

Совокупность пор, возникающих в кристаллической решетке вследствие коалесценции избыточных вакансий, которые перемещаются к мес-

ту коагуляции с помощью диффузионного механизма, можно считать близкой к диффузионной пористости между квинтетами кристаллической решетки $A^v_2B^{vi}_3$.

Изучение процессов, сопутствующих развитию диффузионной пористости, в объектах, в которых концентрация вакантных узлов превосходит равновесную, оказалось существенным как для понимания механизма диффузионных процессов, происходящих в кристаллической решетке, так и для решения практических вопросов из области термоэлектрических явлений в сплавах $(Sb_2Te_3 - Bi_2Te_3)\langle Te \rangle$ и $(Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3)\langle MgCl_2 \rangle$.

Как и в случае твердых растворов [19], вопрос о пересыщении вакансиями слоистой системы $A^v_2B^{vi}_3$ может быть экспериментально изучен с использованием явления коагуляции избыточных вакансий [20].

Такие процессы изучены в [21] и представляют интерес с точки зрения формирования НО в порах. Нуклеация кластеров в замкнутом объеме в нанопоре (согласно рис.9.) в отличие от нуклеации в бесконечном объеме, приводит к возникновению кластеров с минимальным и максимальным критическими размерами. Скорость таких процессов выше скорости реакции в макроскопическом пространстве, а размеры кластеров регулируются размерами замкнутого объема. Минимальный размер нанокластера, образовавшегося в замкнутой поре при нуклеации можно найти по уравнению

$$n_{\min} = \frac{32\alpha^3}{3\rho^2\Delta\mu},$$

где α — плотность поверхностной энергии кластера, ρ — плотность кластера, $\Delta\mu$ — изменение химического потенциала при его образовании.

Максимальный размер определяется по формуле $n_{\max} \approx \frac{n_0 \Delta\mu}{2 + \Delta\mu}$ где n_0 —

число атомов в нанопоре, из которых образуется кластер, т.е. размер нанокластера должен увеличиваться с увеличением размера нанопоры. В то же время минимальный критический размер зародыша в поре определяется термодинамикой нуклеации и исходной концентрацией атомов, образующих кластер в пространстве поры. С увеличением размера поры в ней образуются несколько кластеров меньшего размера [21]. Эти процессы требуют проведение ряда экспериментов и их анализ: необходим расчет по выявлению из рис.9 НО с различными размерами и гранями.

Описанные ранее закономерности возникновения диффузионной пористости (наличие огранки, данные о кинетике роста) являются основанием для представлений о том, что решетка, которая в силу различных причин обогащена вакансиями, может рассматриваться как пересыщенный раствор вакансий в решетке, из которого должна «выкристалли-

зовываться» фаза, отвечающая вакансиям, т. е. должны появляться отрицательные кристаллики (диффузионные поры).

В [12-13] подобные системы называют «организованными» и «структурированными». Внешние потоки вещества удерживают их в стационарном состоянии, и не позволяют двигаться к состояниям равновесия. При этом необходимо рассмотреть ряд подходов, приводящие к самопроизвольному зарождению структур и их самовоспроизведению. Такая способность связана фактором локализации процессов и самопроизвольного распада и диффузии в сложных системах. Это проявляется на примере рассмотрения фракталов различных масштабов [11,14-16].

Возникновение ячеек Бенара в пространстве $Te^{(I)}-Te^{(II)} A^v_2B^{vi}_3$ – это один из классических примеров пространственной упорядоченности структуры. Все изложенное здесь о фрактальных нанообъектах соответствует подобным структурам, приведенным в [11-12, 14-18].

Рассматриваемые материалы весьма склонны к образованию вакансий. Этому способствуют смещение стехиометрии на их диаграммах состояния, наличие слабых ван-дер-ваальсовских связей в кристаллической решетке, микросегрегационные явления, сильно развитые при кристаллизации из расплава твердых растворов на основе теллурида висмута. При сплавлении висмута и теллура в стехиометрическом соотношении образцы Bi_2Te_3 всегда получают р- типа и имеют большую концентрацию носителей тока ($p \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Точка плавления соединения сдвинута в сторону избытка Bi [19].

Полученные, таким образом, образцы названы «квазистехиометрическими». Рассмотрим природу дефектов в $A^v_2B^{vi}_3$ согласно данным рентгеновской плотности.

Из данных по постоянным решетки [19] достаточно точно рассчитана рентгеновская плотность Bi_2Te_3 и сравнена с экспериментально полученной величиной. Если избыток Bi занимает места Te (антиструктурный тип дефекта), то экспериментальная плотность будет превышать расчетные значения, и наоборот, если образуются вакансии из-под мест Te , измеренная плотность будет меньше рентгеновской. Изучены плотность образцов Bi_2Te_3 , измеренной по методу гидростатического взвешивания, в зависимости от состава расплава, находящегося в равновесии с образцом; проведены расчеты по антиструктурной, по вакансионной модели дефектов и сравнены с экспериментальными данными. Все кривые пересекаются в точке 62,8 ат. % Te . Кристаллы, выращенные из расплава с таким количеством Te , имеют минимальную концентрацию носителей тока, их плотность совпадает с вычисленной из данных по параметру решетки ($d_0 = 7,8535 \text{ г / см}^3$). Такие образцы имеют стехиометрический состав. Кристаллы, выращенные из расплава с меньшим количеством Te , обогащены висмутом, с большим - теллуrom. Естественным следствием

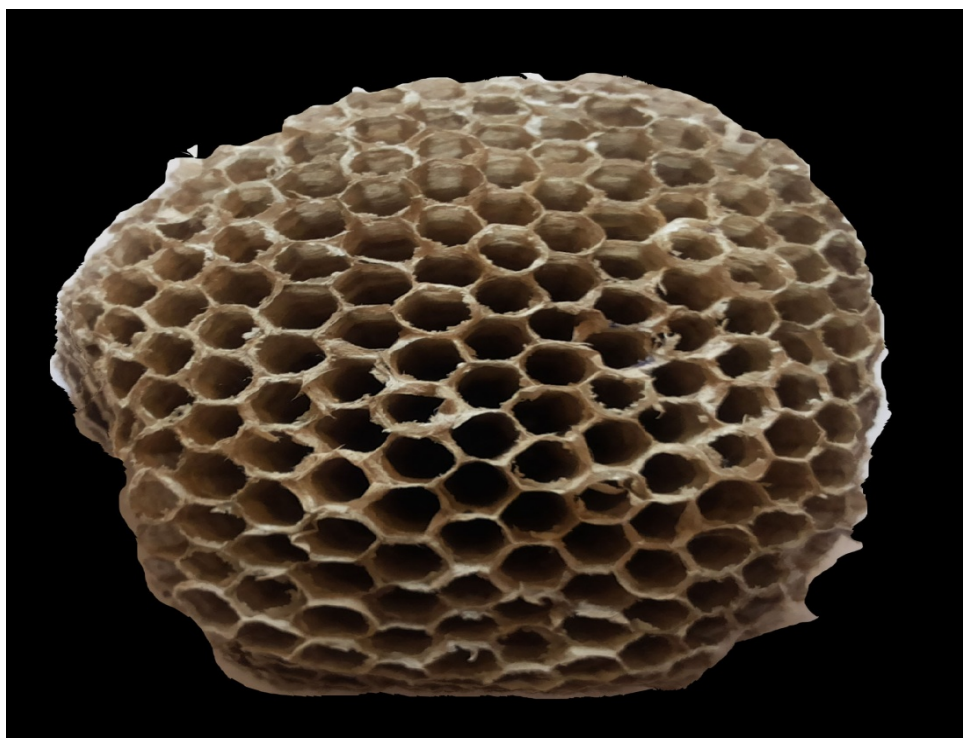
возникновения пористости в диффузионном образце является уменьшение плотности, определяемой пикнометрически [19].

Данные [19] убедительно показали, что для образцов с избытком Te (в том числе и для квазистехиометрических с $d = 7,8588 \text{ г/см}^3$, которые чаще всего исследуются экспериментаторами) хорошо подходит антиструктурная модель дефектов. Была оценена энергия образования антиструктурного дефекта. Она оказалась равной 0,4 эВ, что примерно в три раза меньше энергии образования вакансии Te, следовательно, возникновение антиструктурного дефекта энергетически более выгодно, что приводит к образованию избыточных вакансий.

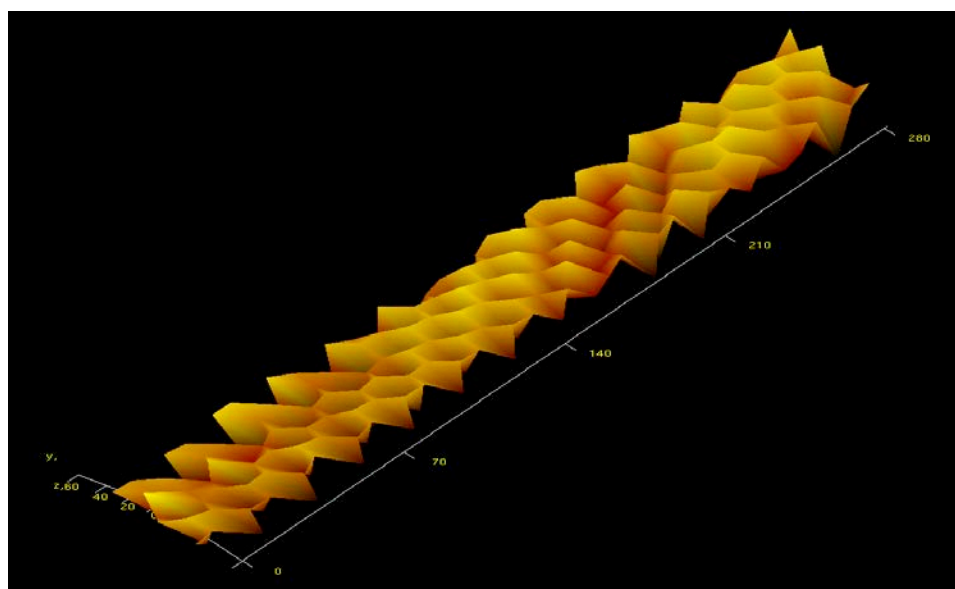
Таким образом, следует предположить последовательность процессов коалесценции вакансий и коагуляции малых пор в Bi_2Te_3 , приводящих к укрупнению пор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение морфологии поверхности природных структур и морфологии наноструктурированных кристаллов Sb_2Te_3 (Bi_2Te_3) выявило в них геометрически подобные элементы структуры. Ячейки Бенара, “пчелиные соты”, некоторые гексагональные формы пор на ван-дер-ваальсовой поверхности в слоистых кристаллах явились примером консервативной и диссипативной самоорганизации. Форма пор совпадает с равновесной формой кристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_3(\text{Sb}_2\text{Te}_3)$, в которых возникли поры. Другие формы диссипативных структур в виде пор различных масштабов сформированы в двухфазной эвтектической системе $\text{A}_2^{\text{V}}\text{B}_3^{\text{VI}}\text{-Te}$. В таких системах nanoостровковые фазы образуются в $\text{Bi}_2\text{Te}_3,(\text{Sb}_2\text{Te}_3)$, а вторая фаза теллура с макропорами является местом внедрения НО первой фазы.



a)



b)

Рис.1. Шестигранная поверхность структуры природных пчелиных сот (вид сверху) –а), фотографии АСМ-изображений пор в 3D-масштабе на ван-дер-ваальсовой поверхности (0001) Sb_2Te_3 схожих с порами природных медоносных и диких пчелиных сот- б).

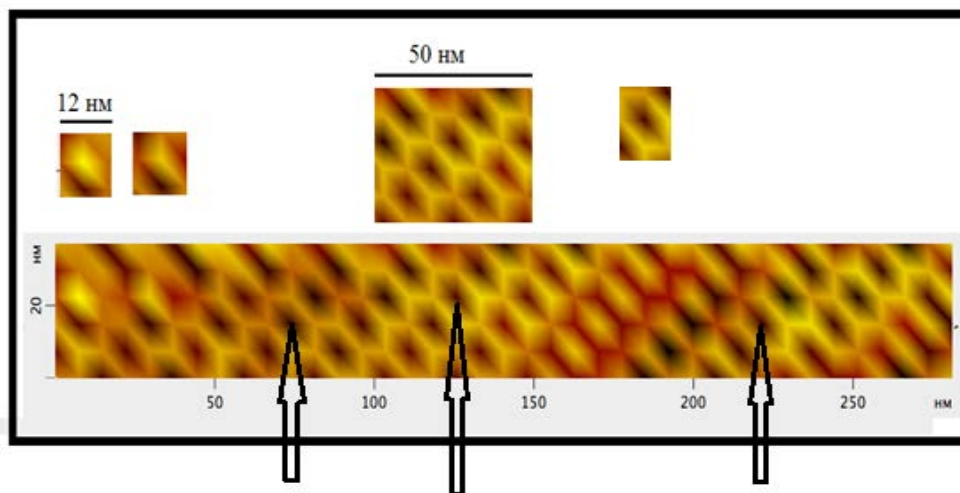


Рис.2. СЗМ- изображение в 2D- масштабе нанобъектов подобных «пчелиным сотам» в Sb_2Te_3 : в вставке сверху слева даны единичные фрагменты изображений ячеек Бенара; наверху выделены в 2D- изображениях (в области скана 50x50nm) наноформирований подобных ячейкам Бенара

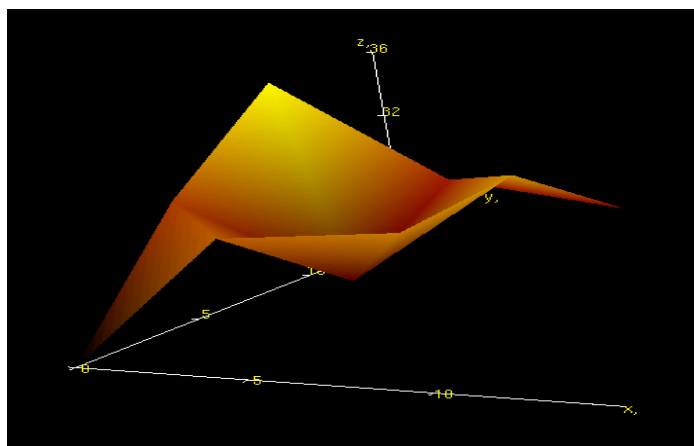


Рис.3. Отдельный трёхмерный фрагмент поры в Sb_2Te_3 . Этот фрагмент можно считать паттерном, так как он периодически повторяется формой и размером.

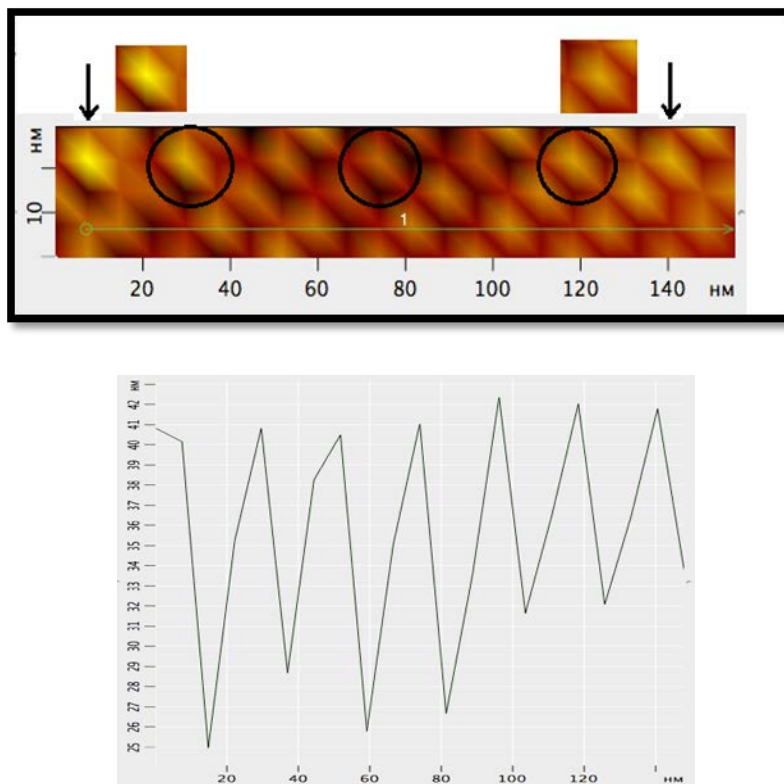


Рис.4. (а, б) Ячейка Бенара в 3D- масштабе Sb_2Te_3 - а); профилограмма вдоль линии данном на рис.4а) размер высоты поры 12-15 нм –б).

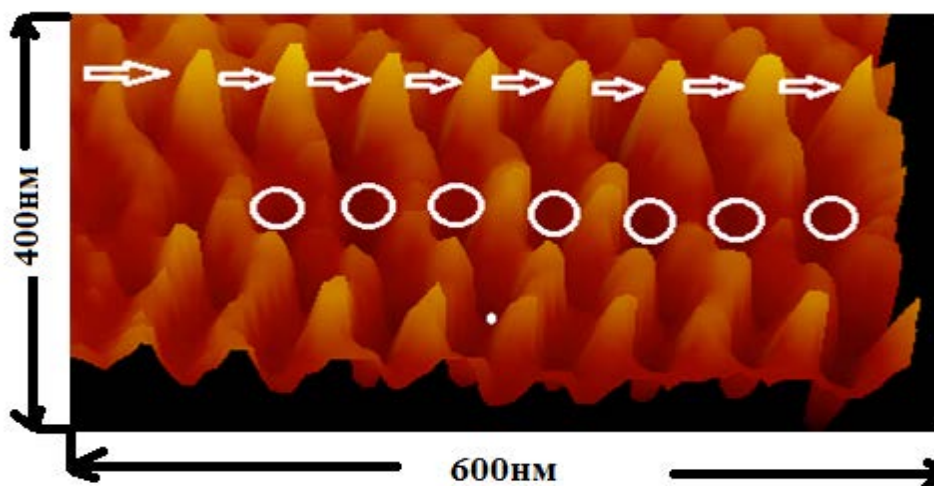


Рис 5. АСМ- изображение в 3D –масштабе поверхности (0001) Bi_2Te_3 . Одиночные нанопоры отмечены кругами, а НО горизонтальными стрелками.

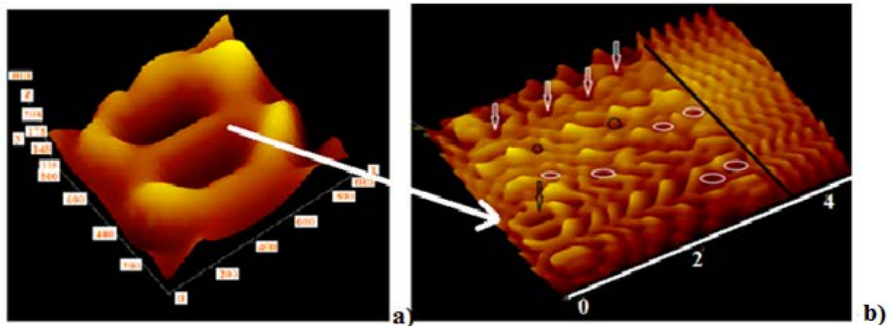


Рис.6. Выделенная область слева эллипсоидальные формы макропор –а); Пористая поверхность Sb_2Te_3 -б) Обозначения: белыми стрелками обозначены круглые поры. Черной стрелкой обозначены большие поры-эллипсы, малыми эллипсами представлены поры малых размеров; черной линией отделена область агрегированных пор от малых пор- б).

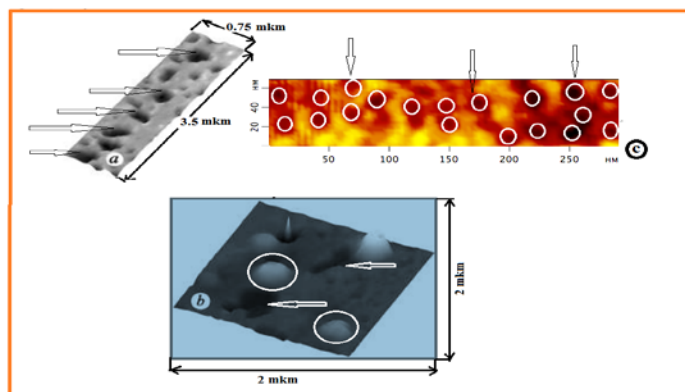


Рис.7. Поры и сопутствующие им наноструктуры. а)- нанопоры в кристаллах CdI_2 ; б)-нанопоры и кластеры в CdI_2 -по данным [1]; в)- нанопоры на поверхности(0001) Bi_2Te_3 (наши данные).

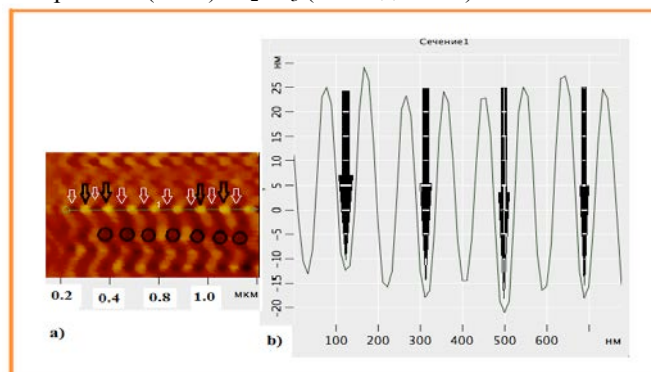


Рис.8. Нанопоры на поверхности (0001) Bi_2Te_3 и их профилограмма вдоль линии данном на рис.1а, представлена на рис.-б).

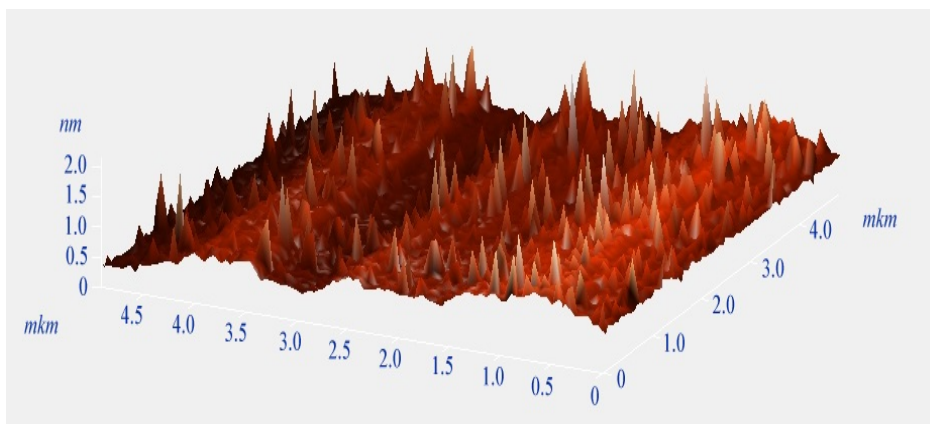


Рис.9. Сформированные nanoостровки в местах зарождения пор на поверхности (0001) $\text{Bi}_2\text{Te}_3 <\text{Cu}>$

ЛИТЕРАТУРА

1. Болеста И.М., Ровецкий И.Н., Партика М.В., Карбовник И.Д., Кулик Б.Я. // Процесс формирования наноструктур на ван-дер ваальсовой поверхности кристаллов CdI_2 . Укр. физ. журн. 2013, Т. 58, № 5, ст.491-497.
2. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. // Оптические свойства нанокомпозитов на основе пористых систем. УФН. 2007, Т.177, №6, с. 619-638.
3. Борн М, Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970, с.97.
4. Cullis A G, Sanham L T, Calcott P D JJ. App. Phys.. 82 .909 (1997).
5. Пунегов В.И. // Диффузное рассеяние рентгеновских лучей пористым кристаллом со сфероидальной формой пор. *Письма в ЖТФ*, 2012, том 38, вып. 11, ст.53-60.
6. Черемской П. Г. // Монография "Поры в твердых телах", 1985, с. 57.
7. Лубов М.Н., 1,2 Куликов Д.В., 1,2 Трушин Ю.В., 1,2 Курносиков О. // Теоретическое исследование формирования в кристаллах выделений примесей в порах нанометровых размеров I. Термодинамическое рассмотрение. ст.46-53.
8. Лубов М.Н., 1,2 Куликов Д.В., 1,2 Трушин Ю.В., 1,2 Курносиков О. // Теоретическое исследование формирования в кристаллах выделений примесей в порах нанометровых размеров. II. Кинетика роста кластеров примеси в порах. Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 1. ст.26-30.
9. Гасенкова И.В., Свечникова Т.Е. // Исследование структуры монокристаллов твердых растворов на основе теллурида висмута // Сб. трудов Термоэлектрики и их применения, Санкт-Петербург, 2002, с.145.
10. Гасенкова И.В., Иванова Л.Д. Гранаткина Ю.В // Неорганические материалы, РАН, 2001, т.37. №11, с.1306 -1312.
11. Алескеров Ф.К., Дерун Е.М., Пишкин М.Г., Кавей Г., Кахраманов С.Ш. // Некоторые особенности формирования нанообъектов в межслоевом пространстве кристаллов Bi_2Te_3 // Ж «Физика», т. XIII, 2007, Баку, Элм, с.41-50.
12. Николис Г., Пригожин И. // Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации, М.: Мир, 1979, с.512.
13. Пригожин И. // От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985, с.315.
14. Мандельброт Б.Б. // Фрактальная геометрия природы. М., 2002, с.185
15. Федер Е. // Фракталы, Мир, 1991, с.258
16. Шредер М.Р. // Фракталы, хаос, степенные законы, 1991, с.512.

17. Микин П.// Некоторые последние достижения в моделировании ограниченной диффузией агрегации и родственных процессов. Фракталы в физике (МЦТФ, Триест, Италия, июль,1985) с. 281.
18. Туркевич Л., Шер Г.//Закон масштабного преобразования вероятности присоединения частицы в модели DOA. Фракталы в физике, Труды VI Международного симпозиума по фракталам в физике (МЦТФ, Триест, Италия, июль,1985) с.310.
19. Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А.//Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . М., 1972, с.40.
20. Гегузин Я.Е.// Диффузионная пористость в металлах и сплавах, УФН, 1957, т. XVI, в.2, с.217-247.
21. Суздалев И.П., Суздалев П.И. // Дискретность наноструктур и критические размеры нанокластеров, Успехи химии 75(8) 2006, с. 715-752.

$\text{A}^{\text{V}}_2\text{B}_3^{\text{VI}}$ LAYLI MÜHİTLƏRDƏ MƏSAMƏLİLİK

M.Ə.RAMAZANOV, F.K.ƏLƏSGƏROV, S.Ş.QƏHRƏMANOV, S.Ə.NƏBİYEVƏ

XÜLASƏ

Təbii “arı pətəyi” və Sb_2Te_3 (Bi_2Te_3) nanoquruluşlu kristalların səthinin morfoloqiyasında həndəsi oxşar quruluşlar olan nanoadacıqlar, heksaqonal formalı məsamələr aşkar edilmişdir.

Məsamələr $\text{A}^{\text{V}}_2\text{B}_3^{\text{VI}}$ -Te evtektik sistemlərində Te fazalarının əsas hissəsi, səthi nanoadacıqlar isə Bi_2Te_3 , (Sb_2Te_3) hissəsidir, həmçinin Bi_2Te_3 , (Sb_2Te_3) fazasının səthi klasterləri tellurid lövhələrinin məsamələrində yerləşirlər.

Formalaşmış binar qəfəsləri və nanoəmələgəlmələr göstərir ki, $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)} \text{A}^{\text{V}}_2\text{B}_3^{\text{VI}}$ deformasiya olunmuş hissəsi məhz nanoölçülü dissipativ quruluşların əsas yerləşdiyi və lokallaşdığı yerdür.

Açar sözlər: nanoadacıqlar, məsamələr, fazalar, matris, pətək, morfoloqiya, dissipativ quruluşlar

POROSITY IN LAYERED STRUCTURES $\text{A}^{\text{V}}_2\text{B}_3^{\text{VI}}$

M.A.RAMAZANOV, F.K.ALASGAROV, C.Sh.GAHRAMANOV, S.A.NABIYEVƏ

SUMMARY

In the morphology of natural "honeycomb" surface and nanostructured crystals of Sb_2Te_3 (Bi_2Te_3) there have been revealed geometrically similar structures with hexagonal shape pores, nanoislands in the crystal matrix. Pores are an integral part of the plate tellurium phases in eutectics $\text{A}^{\text{V}}_2\text{B}_3^{\text{VI}}$ -Te systems and surface nanoislands are the parts of Sb_2Te_3 (Bi_2Te_3); what is more, the surface clusters of Sb_2Te_3 (Bi_2Te_3) phases are wedged into the pores telluride plates. The formed Benard cells and nanostructures indicate that the deformed area of $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)} \text{A}^{\text{V}}_2\text{B}_3^{\text{VI}}$ is a media and site of the localization of nanoscale dissipative structures.

Key words: nanoislands, pores, phases, matrix, 'honey comb', morphology, dissipative structures

Поступила в редакцию: 12.06.2015 г.

Подписано к печати: 17.11.2015 г.