

УДК621.315.592

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ PbSb_2Te_4 , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО**© 2024 г. Немов С. А.^{1,2}, Андреева В. Д.², Поволоцкий А. В.³, Алябьев А. Ю.^{1, *}¹Санкт-Петербургский электротехнический университет,
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 литера Ф²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б³Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9
e-mail: alyabjev_au@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.24 г.

После доработки 10.09.24 г.

Принята к публикации 13.09.24 г.

Продолжены исследования образцов композитного материала PbSb_2Te_4 , полученных методом Чохральского. Подтверждена многофазная структура материала. На основе анализа рентгенографических исследований обнаружено преобладание фаз PbSb_2Te_4 (около 70–80%) и Sb_2Te_3 (до 20–30%). Обнаружены следы фаз $(\text{CuSb})\text{Te}_2$ с ромбоэдрической структурой и гексагональной фазы Sb_2Te_2 .

При легировании образцов медью достигнуто снижение концентрации носителей, атомы примеси расположены в Ван-дер-Ваальсовой щели между слоями основных фаз. При увеличении содержания меди в исходной шихте от 0.5 до 1 атомного процента концентрация носителей далее не снижается.

Ключевые слова: тетрадемитоподобные халькогениды, метод Чохральского, рентгеноструктурный анализ, фазовый состав, кинетические коэффициенты, оптические свойства кристаллов, слоистая структура

DOI: 10.31857/S0132665124050062, **EDN:** NSPJFM**ВВЕДЕНИЕ**

Экономический рост и рост численности населения Земли неминуемо ведут к стабильному росту спроса на энергию как в среднесрочной, так и долгосрочной перспективе. Именно поэтому альтернативные источники энергии в последние десятилетия становятся все более важными ввиду очевидной исчерпаемости, в частности, углеводородного сырья. Один из перспективных видов альтернативной энергетики — прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Термоэлектрические установки способны преобразовывать теплоту от любых источников тепловой энергии: солнечную, ядерную, геотермальную, а также привлекают простотой и надежностью конструкции и, как следствие, долгим сроком службы. Основа термоэлектрической энергетики — особые материалы, осуществляющие такое преобразование и называемые термоэлектриками.

подавляющее большинство применяемых в настоящее время термоэлектрических генераторов основано на соединениях теллура с висмутом и свинцом. Таким

материалам присущ ряд значительных недостатков, таких как: низкий коэффициент полезного действия (порядка 8–12%), стоимость сырья и узкий диапазон рабочих температур [1]. Этим обусловлен активный поиск и исследования новых материалов с термоэлектрическими свойствами для преобразования энергии. Перспективным видится направленный синтез соединений $A_2^{\text{VB}}B_3^{\text{VI}} - A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$, например, тройных слоистых халькогенидов PbSb_2Te_4 , выращиваемых различными методами в виде кристаллов с ромбоэдрической симметрией.

Также необходимо отметить, что тетрадимитоподобные слоистые композиты PbSb_2Te_4 и $\text{Pb}_2\text{Sb}_6\text{Te}_{11}$ и другие соединения, синтезирующиеся в квазибинарных системах Pb, Sb и Te вызывают интерес исследователей, как структуры, обладающие свойствами топологических изоляторов.

Топологические изоляторы (ТИ) – материалы, уникальные свойства которого обусловлены особенностями зонной структуры: на поверхности наблюдается металлический характер проводимости, объемная часть кристалла представляет собой диэлектрик или полупроводник с большой шириной запрещенной зоны [2, 3].

Высокая проводимость поверхности ТИ обусловлена сильным спин-орбитальным взаимодействием, которое приводит к образованию спин-расщепленных топологических поверхностных состояний. Такие поверхностные состояния имеют линейную дисперсию и образуют конус Дирака. При этом за счет симметрии по отношению к обращению времени электроны защищены от обратного рассеяния на дефектах [4].

В топологических изоляторах на поверхности направление движения электрона определяется ориентацией его спина. Это приводит к устойчивой во времени спин-поляризации тока [5].

Особый, спиновый характер проводимости на поверхности может лечь в основу новых, более быстродействующих устройств, в которых информация передается перемещением не самих носителей заряда, а их спинового состояния [6].

Также, в сочетании с ферромагнитными материалами, топологические изоляторы на основе тетрадимитоподобных соединений системы Pb-Sb-Te могут применяться в устройствах памяти и логики [7].

Также в литературе предложены варианты использования топологических изоляторов для создания сверхбыстрых транзисторов на основе эффекта нулевой эффективной массы, терагерцовых детекторов для медицинских сканирующих устройств и систем безопасности, топологических квантовых компьютеров на основе фермионов Майораны [8–10].

Таким образом, композитные соединения PbSb_2Te_4 представляют собой, как чисто научный, так и практический интерес.

Получение этих веществ в чистом виде и исследование их свойств требует значительных усилий, так как несмотря на то, что фазовые диаграммы этих систем неоднократно уточнялись [11] (рис. 1), они все еще считаются недостаточно надежными ввиду специфики механизма роста и образования фаз в процессе перитектической реакции $\text{PbSb}_2\text{Te}_4 \rightleftharpoons \text{PbTe} + \text{Sb}_2\text{Te}_3$. Синтез монокристаллических слитков осложняется необходимостью достижения равновесия в узком температурном диапазоне.

По данным работы [12] в квазибинарной системе $(\text{PbTe} + \text{Sb}_2\text{Te}_3)$ также может образовываться тройное соединение $\text{Pb}_2\text{Sb}_6\text{Te}_{11}$ с инконгруэнтным плавлением при 860 К.

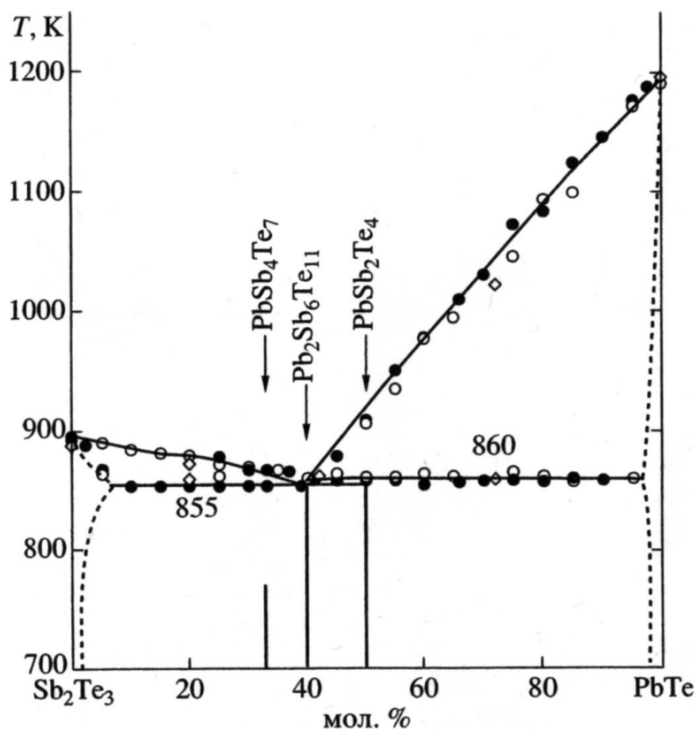


Рис. 1. Фазовая диаграмма Sb_2Te_3 - PbTe [11].

Получение указанной фазы происходит путем изменения исходного состава шихты с $(\text{PbTe} + \text{Sb}_2\text{Te}_3 \rightarrow \text{PbSb}_2\text{Te}_4)$ из расчета ожидаемой стехиометрии на $(2\text{PbTe} + 3\text{Sb}_2\text{Te}_3 \rightarrow \text{Pb}_2\text{Sb}_6\text{Te}_{11})$.

Внесение в исходную шихту легирующих добавок, например, меди [13], также предоставляет широкие возможности модификации характеристик получаемых композитных термоэлектрических материалов.

В настоящей работе продолжены исследования структуры, электрофизических и оптических свойств образцов, выращенных методом Чохральского.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез образцов

Исследуемые композитные материалы на основе PbSb_2Te_4 выращены методом Чохральского в ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова коллективом под руководством Л.Е. Шелимовой. Для непрерывной подпитки синтезируемого кристалла использовался тигель, помещенный в расплав. Метод Чохральского, как известно, обеспечивает получение кристаллов большого размера и высокого совершенства в заданном кристаллографическом направлении — в данном случае в направлении тригональной оси.

Шихта с исходным составом устанавливалась в тигель в нижней части реактора. На верхний шток фиксировался затравочный кристалл для направленного

Таблица 1. Составы шихт исследуемых образцов

№ образца	Состав шихты
1	$\text{PbTe} + \text{Sb}_2\text{Te}_3$
2	$2\text{PbTe} + 3\text{Sb}_2\text{Te}_3$
3	$(\text{PbTe} + \text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.9995}\text{Cu}_{0.0005}$
4	$(\text{PbTe} + \text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.999}\text{Cu}_{0.001}$

роста. Камера ректора после удаления атмосферы наполнялась гелием. После полного расплавления шихты вследствие нагрева тигля происходил направленный рост кристалла.

Синтезированные кристаллы имеют цилиндрическую форму с характерным диаметром 15 мм и наибольшую длину порядка 50 мм. Для проведения исследований из слитков, ориентированных с помощью рентгеновских методов, были вырезаны образцы размерами $4 \times 4 \times 10$ мм и $4 \times 4 \times 20$ мм с бóльшим размером в плоскости скола и вдоль направления роста соответственно.

Нами продолжены исследования серия слитков с различными составами шихты, представленными в табл. 1.

Рентгеноструктурный анализ

Проведенный для уточнения структуры композитного материала рентгеноструктурный анализ (дифрактометр Bruker D8 Advance, Cu-K α -излучение с никелевым фильтром) серии образцов согласно табл. 1 подтверждает существование второй фазы Sb_2Te_3 в значительном количестве во всех исследуемых образцах. Кристаллизация происходит с образованием тройного соединения PbSb_2Te_4 (около 70–80%) и фазы со структурой Sb_2Te_3 (до 20–30%), с ромбоэдрической симметрией и пространственной группой $R\bar{3}m$ (166) и параметрами гексагональной решетки около $a = 0.435$ нм, $c = 4.171$ нм (ICDD PDF2 01-076-8778) и $a = 0.426$ нм, $c = 3.045$ нм (ICDD PDF2 00-056-1035) соответственно (рис. 2). В образце 2 при ожидаемой стехиометрии $2\text{PbTe} + 3\text{Sb}_2\text{Te}_3 \rightarrow \text{Pb}_2\text{Sb}_6\text{Te}_{11}$ рентгенографически обнаружить фазу $\text{Pb}_2\text{Sb}_6\text{Te}_{11}$ не удалось.

Детальный анализ рентгенограммы поверхности скола вдоль плоскости [003] показал (рис. 3), что помимо основных фаз PbSb_2Te_4 и Sb_2Te_3 обнаруживаются следы фазы Sb_2Te_2 с гексагональной структурой $P\bar{3}m1$ (164) и параметрами $a = 0.425$ нм, $c = 2.390$ нм (ICDD PDF2 01-072-2183). Причем просматриваются только ее чрезвычайно слабые рефлексы от плоскостей, обладающих преимущественной ориентировкой [001] (на рис. 3 – $2\theta = 18.5^\circ$, HKL 005), большая часть рефлексов накладываются на имеющие гораздо более высокую интенсивность линии основных фаз).

Помимо этих структур также на уровне следов возможно присутствие неравновесной, содержащей до 42–55 вес. % Te, непроиндицированной фазы, описанной в порошковой базе ICDD PDF2 00-057-0494 как $\gamma\text{-(Sb,Te)}$.

Результаты электронной микроскопии [14] также свидетельствуют о выходе на поверхность слитков монокристаллических включений второй фазы.

В то же время, температурные зависимости электропроводности, коэффициентов термоэдс, эффекта Холла и поперечного эффекта Нернста-Эттинггаузена, измеренные ранее при детальных исследованиях явлений переноса не

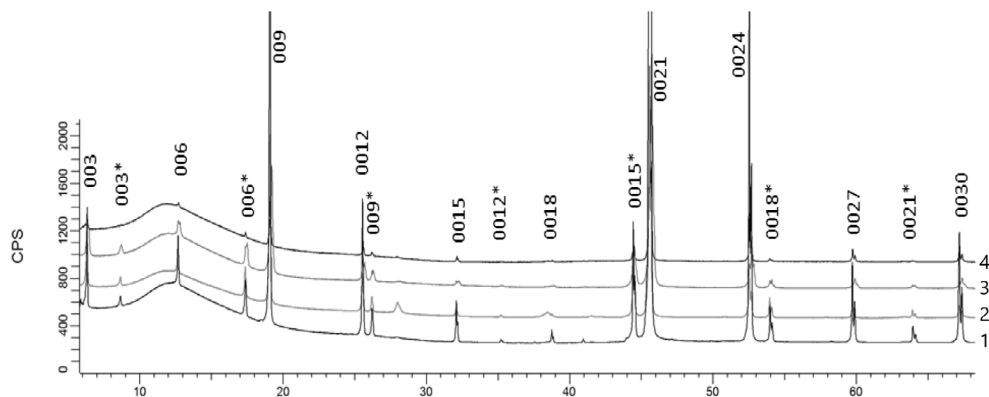


Рис. 2. Дифрактограммы образцов 1 и 2 – без меди, 3 и 4 – легированные Cu (ИНДЕКСЫ дифракции со значком * – принадлежат фазе Sb_2Te_3 , без звездочки – PbSb_2Te_4).

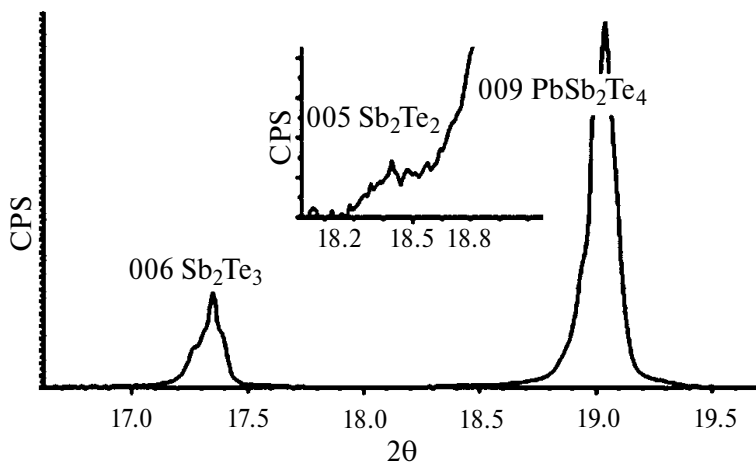


Рис. 3. Вид рефлекса 005 фазы Sb_2Te_2 .

обнаруживают заметных аномалий, что свидетельствует о более низкой чувствительности кинетических коэффициентов к кристаллическому и фазовому составу образцов.

Приведенные в работе [15] экспериментальные данные о температурной зависимости кинетических коэффициентов показывают, что с увеличением температуры наблюдается значительный рост компонент тензора коэффициента Холла как в плоскости скола R_{123} , так и вдоль тригональной оси кристалла R_{321} , который не может быть объяснен в рамках однозонной модели зонной структуры. Однако, двухзонная модель с валентной зоной, содержащей два неэквивалентных экстремума с разными массами плотности состояний [16], позволяет объяснить наблюдаемый рост коэффициента Холла с температурой без учета влияния неоднородности образцов.

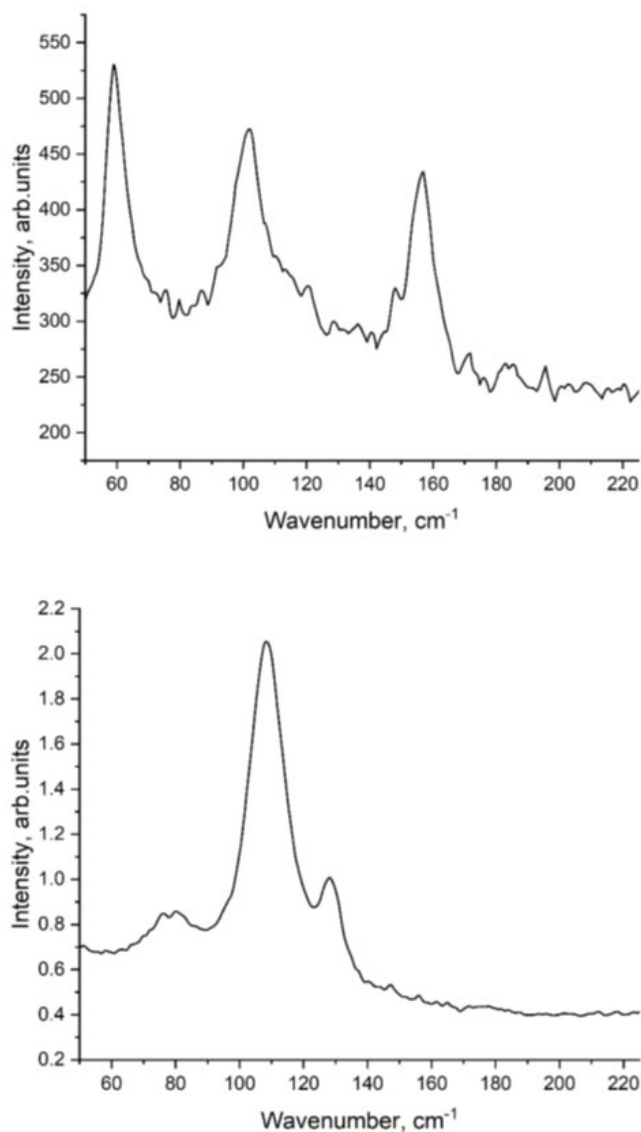


Рис. 4. Спектры КРС от поверхности образца $(\text{PbTe} + \text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.999}\text{Cu}_{0.001}$, полученные для двух различных сколов (А – колебательные моды кристаллической фазы Sb_2Te_3 , Б – колебательные моды кристаллической фазы PbTe)

Исследование спектров отражения и комбинационного рассеяния

Однозначно в пользу сложности состава и структуры слитков свидетельствуют результаты исследования оптических свойств. В частности, спектры отражения в области минимума, связанного с плазмонными колебаниями, имеют точку перегиба и второй минимум. Эти особенности спектров отражения не находят объяснения в рамках традиционной модифицированной теории Друде-Лоренца. Форма зависимости коэффициента отражения от частоты, вероятно, обусловлена ранее

отмеченными особенностями процесса роста исследуемых композитов, а именно наличием в образцах нескольких фаз, с преобладанием в объеме PbSb_2Te_4 и Sb_2Te_3 . Именно эти две фазы отвечают за минимумы в спектре отражения.

Выполненные нами измерения спектров КРС подтвердили существование дополнительной фазы в слитках. Спектры комбинационного рассеяния света измерялись с использованием спектрометра исследовательского класса T64000 (Horiba). Спектрометр оснащен микроскопической приставкой, что позволяет измерять локальные спектры с поверхности образцов диаметром 1 мкм, и тройным монохроматором, обеспечивающим возможность регистрации спектров в низкочастотной области вплоть до 5 см^{-1} . При использовании тройного монохроматора не требуется введение в канал регистрации краевого фильтра, отсекающего лазерную линию возбуждения, что и обеспечивает возможность измерения спектров в области менее 100 см^{-1} . В качестве источника возбуждающего излучения использовался непрерывный лазер с длиной волны генерации 532 нм и максимальной мощностью 100 мВт. Лазерное излучение фокусировалось на поверхности образца при помощи $50\times$ микрообъектива в область площадью около 4 мм^2 . Для измерения спектров КРС готовились свежие сколы вдоль плоскостей слоистых структур.

Для всех образцов получены спектры КРС двух видов (типичные спектры представлены на рис. 4). Полосы с максимумами в области 59 см^{-1} , 102 см^{-1} и 157 см^{-1} (рис. 3а) относятся к A_{1q}^1 , E_q^2 и A_{1q}^2 колебательным модам кристаллической фазы Sb_2Te_3 соответственно [17; 18]. На спектре рис. 4б основными полосами являются 110 см^{-1} и 125 см^{-1} , которые относятся к колебательным модам кристаллической фазы PbTe [19]. Очевидно, наличие двух различных фаз на поверхности подтверждает, что исследуемые кристаллические образцы представляют собой слоистые структуры. В зависимости от того, какая фаза оказывается на поверхности при формировании скола, регистрируются соответствующие спектры КРС.

Образцы, легированные медью

Известно, что исследуемый композитный материал PbSb_2Te_4 обладает дырочной проводимостью с концентрацией носителей заряда порядка $3.2 \times 10^{20}\text{ м}^{-3}$ [20]. Такие высокие значения концентрации дырок являются неоптимальными с точки зрения термоэлектрического применения данного композитного материала.

Снижение концентрации носителей достигается введением в материал донорной примеси, в частности, меди. Легирование PbSb_2Te_4 Cu рассмотрено в работе [21]. Авторами проанализировано влияние меди на электрофизические свойства и структуру образцов. Добавление в шихту донорной примеси позволяет снизить концентрацию носителей с $3.2 \cdot 10^{20}\text{ м}^{-3}$ до $1.6 \cdot 10^{20}\text{ м}^{-3}$ [13].

Рентгенограммы с поверхностей скола легированных слитков также показали наличие PbSb_2Te_4 и Sb_2Te_3 в качестве основных фаз. Сохраняется очень малое количество, на уровне следов, фазы со структурой γ -(Sb,Te).

Характерные участки дифрактограмм ($2\theta = 36\text{--}40^\circ$) исследованных образцов с медью показаны на рис. 5. Параметры решетки c в образце 3 составляют 4.180 нм для PbSb_2Te_4 и 3.053 нм для Sb_2Te_3 , что существенно больше, чем в слитках 1 и 2, не содержащих Cu. При этом размеры по оси a сохраняются практически неизменными. При увеличении доли меди (образец 4) параметры c становятся меньше — 4.171 нм у PbSb_2Te_4 и 3.046 нм для Sb_2Te_3 .

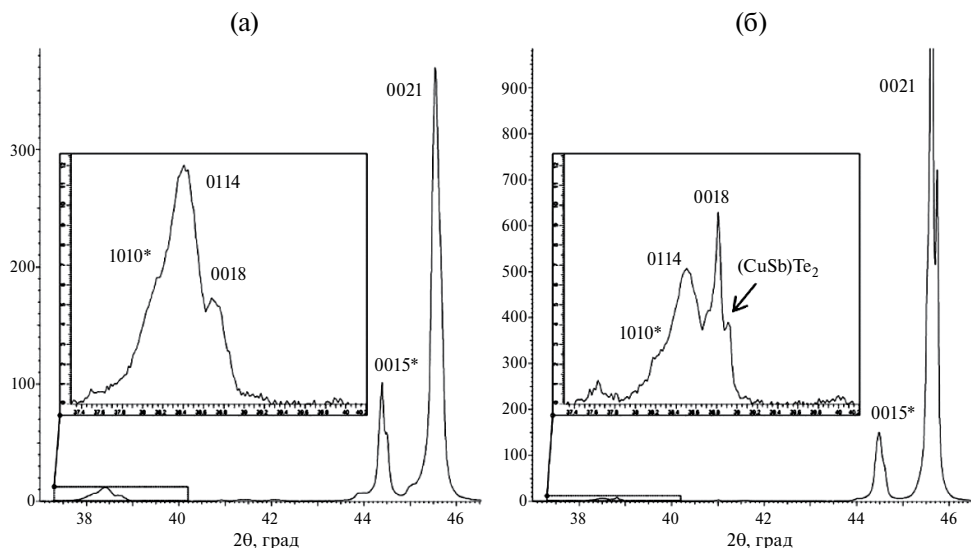


Рис. 5. Участок рентгенограммы легированных образцов с рефлексами фазы $(\text{CuSb})\text{Te}_2$ (линии, отмеченные (*) принадлежат Sb_2Te_3 , не отмеченные – PbSb_2Te_4): А – 0.5 ат. % Cu, Б – 1.0 ат. % Cu.

При этом отчетливо заметно значительное уширение пиков образца 3, содержащего меньшее количество меди и уменьшение их ширины вплоть до расщепления в образце 4.

Вероятнее всего, при небольших содержаниях меди ее атомы, имеющие небольшие по сравнению с Te и Sb размеры (Cu – 0.227 нм, Te – 0.324 нм, Sb – 0.312 нм), располагается в Ван-дер-Ваальсовых межслоевых пространствах, что приводит к увеличению параметра c и значительным микроискажениям решетки.

Так как нет четкого упорядочения в этих отдельных случаях «растворения» Cu в PbSb_2Te_4 и Sb_2Te_3 , разные элементарные слои многослойных структур анализируемых фаз деформируются не одинаково. Это проявляется в асимметрии и даже расщеплении рефлексов типа 003, ориентированных вдоль плоскости скола слитка. С увеличением концентрации Cu до величин 1 ат. % на рентгенограмме появляются слабые рефлексы новых фаз. Одновременно наблюдается сдвиг и уменьшение ширины пиков PbSb_2Te_4 и Sb_2Te_3 . Это может быть связано с тем, что параметры решетки, и, следовательно, концентрация твердого раствора в разных участках распадающегося сплава различны.

Вероятно, часть атомов меди покидают межслоевые пространства в структурах Sb_2Te_3 и PbSb_2Te_4 и образуют фазу $(\text{CuSb})\text{Te}_2$ с ромбоэдрической структурой $R3m$ (160) и параметрами $a = 0.427$ нм, $c = 2.984$ нм (ICDD PDF2 01-082-6362) (рис. 5). Данная фаза также обладает слоистой структурой и имеет параметр a , близкий параметрам Sb_2Te_3 и PbSb_2Te_4 , что может способствовать ее формированию в межслойных пространствах основных фаз.

Наличие широкого диффузного рефлекса в диапазоне $2\theta = 37\text{--}39^\circ$ может быть связано с тем, что в присутствии атомов меди происходит образование сложной фазы типа $\text{Pb}_2\text{Sb}_6\text{Te}_{11}$, не определяемой в нелегированных слитках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы образцы композитного материала PbSb_2Te_4 , полученные методом Чохральского. Получено подтверждение многофазности синтезированных структур на основе анализа спектров отражения и комбинационного рассеяния. По результатам рентгенографических исследований продемонстрировано преобладание фаз PbSb_2Te_4 (около 70–80%) и Sb_2Te_3 (до 20–30%) с ромбоэдрической симметрией и пространственной группой $R\bar{3}m$. Обнаружены следы фаз $(\text{CuSb})\text{Te}_2$ с ромбоэдрической структурой и гексагональной фазы Sb_2Te_2 .

В образцах, легированных медью при содержании меди в исходной шихте 0.5 атомных процента отмечено снижение концентрации дырок, атомы меди располагаются в Ван-дер-Ваальсовой щели между пакетами основных фаз. При увеличении содержания меди в исходной шихте до 1 атомного процента отмечено образование новой фазы $(\text{CuSb})\text{Te}_2$, в результате чего концентрация носителей далее не снижается.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ravindra N.M., Jariwala B., Bañobre A., Maske A., Thermoelectrics. Fundamentals, Materials Selection, Properties, and Performance // Springer International Publishing, Cham, 2019.
2. Xu C., Moore J.E. Stability of the quantum spin Hall effect: effects of interactions, disorder, and Z2 topology // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 045322(10).
3. Moore J.E., Balents L. Topological invariants of time-reversal-invariant band structures // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. P. 121306 (5).
4. Teo J.C.Y., Kane C.L. Topological Defects and Gapless Modes in Insulators and Superconductors // Phys. Rev. B 2010. V. 82. P. 115120 (26).
5. Kane C.L. Condensed matter: An Insulator with a Twist // Nature. 2008. V. 4. P. 348–349.
6. Pesin D., MacDonald A.H. Spintronics and pseudo-spintronics in graphene and topological insulators // Nature Mater. 2012. V.11. P. 409–416.
7. Men'shov V.N., Tugushev V.V., Chulkov E.V. Carrier mediated ferromagnetism on the surface of a topological insulator // J. Exper. and Theoret. Phys. 2011. V. 94 (8). P. 629–634.
8. Grant A. Weird materials could make faster computers. // Science News, Retrieved 2014-07-23. <https://doi.org/10.1038/nature.13534>.
9. Vicarelli L., Vitiello M.S., Coquillat D., Lombardo A., Ferrari A.C., Knap W., Polini M., Pellegrini V., Tredicucci A. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors // Nature Materials. 2012. V. 11. P. 865–872.
10. Fu L., Kane C.L. Superconducting proximity effect and Majorana fermions at the surface of a topological insulator // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 096407 (9).
11. Шелимова Л.Е., Карпинский О.Г., Свечникова Т.Е., Авилов Е.С., Кретова М.А., Земсков В.С. Синтез и структура слоистых соединений в системах $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$ и $\text{PbTe-Sb}_2\text{Te}_3$ // Неорг. матер. 2004. Т. 40. № 12. С. 1440–1447.
12. Ikeda T., Ravi V.A., Snyder G.J. Formation of Sb_2Te_3 Widmanstätten precipitates in thermoelectric PbTe // Acta Met. 2009. V. 57. No 3. P. 666–672.
13. Шелимова Л.Е., Карпинский О.Г., Константинов П.П., Свечникова Т.Е., Житинская М.К., Авилов Е.С., Кретова М.А., Земсков В.С. Анизотропные термоэлектрические

материалы для термогенераторов на основе слоистых тетрадемитоподобных халькогенидов // Перспективные материалы. 2008, № 2. С. 28–38.

14. Немов С.А., Поволоцкий А.В., Алябьев А.Ю., Андреева В.Д., Ким А. Структура и свойства сплавов PbSb_2Te_4 и $\text{Pb}_2\text{Sb}_6\text{Te}_{11}$ // Сборник научных трудов «Нанозифика и Наноматериалы». 2023, С. 23–28.
15. Немов С.А., Блажих Н.М., Андреева В.Д. Описание явлений переноса в PbSb_2Te_4 в двухзонной модели при учете межзонного рассеяния // Научные ведомости Белгородского государственного университета, серия: Математика. Физика. 2013. № 11 (154), вып. 31. С. 181–189.
16. Пшенай-Северин Д.А., Федоров М.И. Влияние особенностей зонной структуры на термоэлектрические свойства полупроводника // Физика твердого тела. 2007. Т. 49, вып. 9, С. 1559–1562.
17. Boschker J., Galves L., Flissikowski T., Lopes J., Riechert H., Calarco R. Coincident-site lattice matching during van der Waals epitaxy // Scientific Report. 2015, V. 5, No. 18079
18. Немов С.А., Андреева В.Д., Улашкевич Ю.В., Поволоцкий А.В., Аллахаха А.А. Особенности спектров ИК отражения и комбинационного рассеяния кристаллов $\text{Sb}_2\text{Te}_3\text{--xSex}$ // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, вып. 10. С. 1197–1202.
19. Romcevic N., Popovich Z., Khokhlov D. Raman-scattering spectra of indium-doped PbTe // Journal of Physics Condensed Matter. 1995, V. 7, No. 26, P. 5105–5109.
20. Evang V., Reindl O., Schäfer L., Rochotzki A., Pletzer-Zelgert P., Wuttig M., Mazzarello R. Thermally controlled charge-carrier transitions in disordered PbSbTe chalcogenides // Advanced Materials. 2022, V. 34, Iss. 3, P. 2106868 (11).
21. Немов С.А., Блажих Н.М., Дема Н.С., Житинская М.К., Прошин В.И., Свечникова Т.Е., Шелимова Л.Е. Влияние легирования медью на кинетические коэффициенты и их анизотропию в PbSb_2Te_4 // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, вып. 4. С. 463–468.