

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 539.216.2-026.657

На правах рукописи

СЫС
Анна Дмитриевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **БОДНАРЬ Иван Васильевич**,
доктор химических наук, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ПОЛУБОК Владислав Анатольевич**,
кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер-программист Республиканского унитарного предприятия «Центр информационных технологий Национального статистического комитета Республики Беларусь»

Защита диссертации состоится «27» июня 2018 г. года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс современной науки и техники неразрывно связан с успехами как в развитии и совершенствовании технологии получения традиционных полупроводниковых материалов, так и в разработке и исследовании новых перспективных полупроводников. Поразительные возможности современной полупроводниковой электроники и особенно микроэлектроники реализуются только по мере разработки и освоения выпуска полупроводниковых материалов с разнообразными физическими свойствами, на основе которых могут быть созданы полупроводниковые приборы с новыми функциональными возможностями.

Получение и исследование соединений типа $\text{Cu}_2\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{IV}}\text{X}_4$ является новым перспективным направлением в полупроводниковом материаловедении. Соединения $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ обладают подходящими физическими свойствами для применения в качестве основного поглощающего слоя в тонкопленочных преобразователях солнечной энергии, кроме того, они не содержат таких дорогих и ограниченных в запасе элементов как индий и галлий. Этим материалам также можно найти практическое применение при создании широкополосных фотопреобразователей, приемников для ближней ИК – области спектра и других устройств опто- и микроэлектроники.

Однако на практике реализация потенциальных возможностей этих соединений встречает определенные трудности. Отсутствие надежной информации о связи технологии получения с такими физическими свойствами, как теплопроводность и тепловое расширение указанных кристаллов является на сегодняшний день одним из основных факторов, сдерживающих прикладные разработки на основе этих материалов. Проблема выращивания однородных по составу и свойствам кристаллов этого соединений до сих пор не решена. В литературе имеются лишь отрывочные сведения о выращивании кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, о твердых растворах $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$ в литературе какие-либо данные отсутствуют.

Для преобразования солнечной энергии выбор материала поглотителя – ключевой фактор, который, в конечном счете, определяет эффективность, которая может быть достигнута солнечным элементом, поэтому исследование оптических свойств материалов, перспективных для использования в солнечной энергетике, является необходимым и для прикладных разработок. Одними из таких соединений, являются соединения типа $\text{Cu}_2\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{IV}}\text{X}_4$ (где B^{II} – Zn, Cd; C^{IV} – Si, Ge, Sn; X – S, Se, Te), которые обладают физическими свойствами, дающими возможность использовать их в качестве поглощающего слоя в тонкопленочных преобразователях солнечной энергии.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последнее время соединения $\text{Cu}_2\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{IV}}\text{X}_4$ (где $\text{B}^{\text{II}} - \text{Zn, Cd}$; $\text{C}^{\text{IV}} - \text{Si, Ge, Sn}$; $\text{X} - \text{S, Se, Te}$) привлекли внимание в качестве поглощающего слоя в тонкопленочных солнечных элементах. Это связано с тем, что указанные соединения являются прямозонными материалами, а также из-за их высокого коэффициента поглощения ($>10^4 \text{ см}^{-1}$). К таким соединениям относятся и соединения $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, ширина запрещенной зоны которых изменяется от 1,1 до 1,5 эВ, что является оптимальным значением для солнечных ячеек.

Степень разработанности проблемы

Теоретические и практические вопросы особенности выращивания кристаллов раскрыты в трудах зарубежных ученых Э.К. Арушанова, Т.К. Тодорова, Р. Нитше, С. Шорр, М. Леона и др. Данные вопросы рассматриваются в работах и представителями белорусской науки – И.В. Боднаря, В.Ф. Гременка, И.А. Викторова и др.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является отрывочные сведения о выращивании кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, о твердых растворах $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$ в литературе какие-либо данные отсутствуют.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе определения состава и структуры указанных материалов, а также измерения теплопроводности.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка температурных режимов выращивания кристаллов методом Бриджмена соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$, определение их состава, кристаллической структуры и теплопроводности.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Провести обзор и анализ современной технической литературы по кристаллической структуре соединений $\text{Cu}_2\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{IV}}\text{X}_4$ и диаграмм состояния разрезов $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$ и $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$.
2. Разработать оптимальные режимы выращивания кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$.
3. Определить их состав, кристаллическую структуру и теплопроводность.

Область исследования

Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1 – 38 80 04 Технология приборостроения.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области выращивания монокристаллов: Э.К. Арушанова, Т.К. Тодорова, Р. Нитше и др.

Теоретической основой исследований, проведенных в работе, являются методы синтеза и выращивания кристаллов (методы Бриджмена).

Методологической основой исследования являются разработки отечественных и зарубежных авторов, методические материалы, труды отечественных и зарубежных учёных и научные труды в области синтеза выращивания монокристаллов. В магистерской диссертации используются следующие общенаучные методы: структурный, факторный и сравнительный анализ, метод формализации, метод моделирования. Выращивание монокристаллов исследуется в рамках структурного и компонентного подходов, при создании инструментального средства используется методология системного проектирования, графические нотации. В диссертации используется системный подход к разработке архитектуры инструментального средства. В основу изложения научных результатов положена гипотетико-дедуктивная схема научного исследования.

Информационная база исследования сформирована на основе сведений из научных изданий, ресурсов Интернет, экономических данных по договорам на проведение научно-исследовательских работ, описания результатов НИР, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

Инструментальной базой исследования являются: установка «Stereoscan-360», используемая для микрозондового рентгеноспектрального анализа, рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 М ($CuK\alpha$ –излучение).

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов диссертационной работы заключается в выращивании кристаллов соединений $Cu_2ZnGeSe_4$, $Cu_2ZnSnSe_4$ и твердых растворов на их основе, изучение кристаллической структуры и теплопроводности.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что были разработаны температурные режимы выращивания однородных и гомогенных кристаллов твердых растворов на основе соединений $Cu_2ZnGeSe_4$, $Cu_2ZnSnSe_4$ направленной кристаллизацией расплава (метод Бриджмена), получены данные о кристаллической структуре выращенных кристаллов и их теплопроводности.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что проведенные исследования могут быть использованы в качестве данных для создания на них солнечных элементов и других устройств микро- и нанoeлектроники.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Литературный анализ кристаллической структуры соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$. Исследованы диаграммы состояния систем $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$ и $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$.

2. Температурные режимы выращивания кристаллов направленной кристаллизацией расплава (вертикальный вариант метода Бриджмена).

3. Микрорентгеноспектральный анализ для определения состава монокристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ полученных направленной кристаллизацией расплава (вертикальный метод Бриджмена). Рентгеновский метод определения структуры и параметров кристаллической решетки выращенных монокристаллов. Теплопроводность соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 54-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь, 2018 г.), XXVII Международной научно-практической конференции: «Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия» (г. Москва, Российская Федерация, 2018 г.).

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Электронные системы на возобновляемых источниках энергии».

Публикации

Изложенные в диссертации основные результаты исследований и выводы опубликованы в 4 научных работах, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов исследований, 1 статья в сборнике материалов научной конференции и 1 тезис доклада на научной конференции.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 12 страниц.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе представлен аналитический обзор по кристаллической структуре соединений $\text{Cu}_2\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{IV}}\text{X}_4$ и диаграммам состояния систем $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$, $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$ на которых образуются соединения $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$.

Во второй главе описан метод выращивания кристаллов из расплава (метод Бриджмена) и методики проведения исследований.

В третьей главе представлены результаты определения состава и структуры полученных кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$, а также исследование теплопроводности указанных материалов абсолютным методом.

В приложении представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 62 страницы. Из них 37 страниц основного текста, 11 иллюстраций на 11 страницах, 7 таблицы на 5 страницах, библиографический список из 52 наименований на 4 страницах, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований на 1 странице, 4 приложений на 25 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы поиска недорогого и перспективного соединения с подходящими физическими свойствами для применения в качестве основного поглощающего слоя в тонкопленочных преобразователях солнечной энергии, а также описано обоснование актуальности темы.

В общей характеристике работы показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В первой главе представлен аналитический обзор по кристаллической структуре соединений $\text{Cu}_2\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{IV}}\text{X}_4$ и диаграммам состояния систем $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$, $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$ на которых образуются соединения $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$.

Из литературного анализа следует, что указанные соединения кристаллизуются в тетрагональной структуре (тип кестерит). причем параметры элементарной ячейки указанных соединений у разных авторов мало отличаются между собой. А также данные по методам выращивания кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ достаточно ограничены, а какие-либо сведения о твердых растворах $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ в литературе отсутствуют.

Результаты исследования диаграмм состояния систем $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$ и $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$ показали, что соединения $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ плавятся инконгруэтно, что необходимо учитывать при выращивании кристаллов как соединений, так и твердых растворов на их основе.

Во второй главе представлена метод выращивания кристаллов из расплава. Разработаны температурные режимы выращивания кристаллов направленной кристаллизацией расплава (вертикальный вариант метода Бриджмена), позволяющий получать однородные и гомогенные кристаллы соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ во всем интервале концентраций.

Для определения состава и кристаллической структуры выращенных кристаллов указанных соединений и твердых растворов использовали микро-рентгеноспектральный и рентгеновский анализы, для измерения теплопроводности – абсолютный метод.

Состав полученных кристаллов определяли с помощью микро-рентгеноспектрального анализа, сущность которого заключается в бомбардировке образца микроскопического объема фокусированным электронным пучком (обычно энергия составляет 5-30 кэВ) и анализе рентгеновских волн, возбужденных и испущенных различными видами элементов.

Равновесность соединений и гомогенность твердых растворов устанавливали рентгеновским методом. При исследовании структуры использовалась обычная схема опыта для наблюдения дифракции рентгеновских лучей. Пучок падает на кристалл или пленку и рассеивается атомами химических элементов, входящих в его состав.

Исследование теплопроводности дало возможность получить информацию о механизме кинетических и термодинамических процессов в кристаллах, характере и распределении дефектов.

Полная теплопроводность выражается как сумма двух величин решеточной составляющей (χ_p) и составляющей, обусловленной носителями заряда (χ_s):

$$\chi = \chi_p + \chi_s, \quad (1)$$

Величина составляющей χ_s может быть оценена на основе закона Видемана – Франца:

$$\chi_s = A \frac{k^2}{e^2} \sigma T, \quad (2)$$

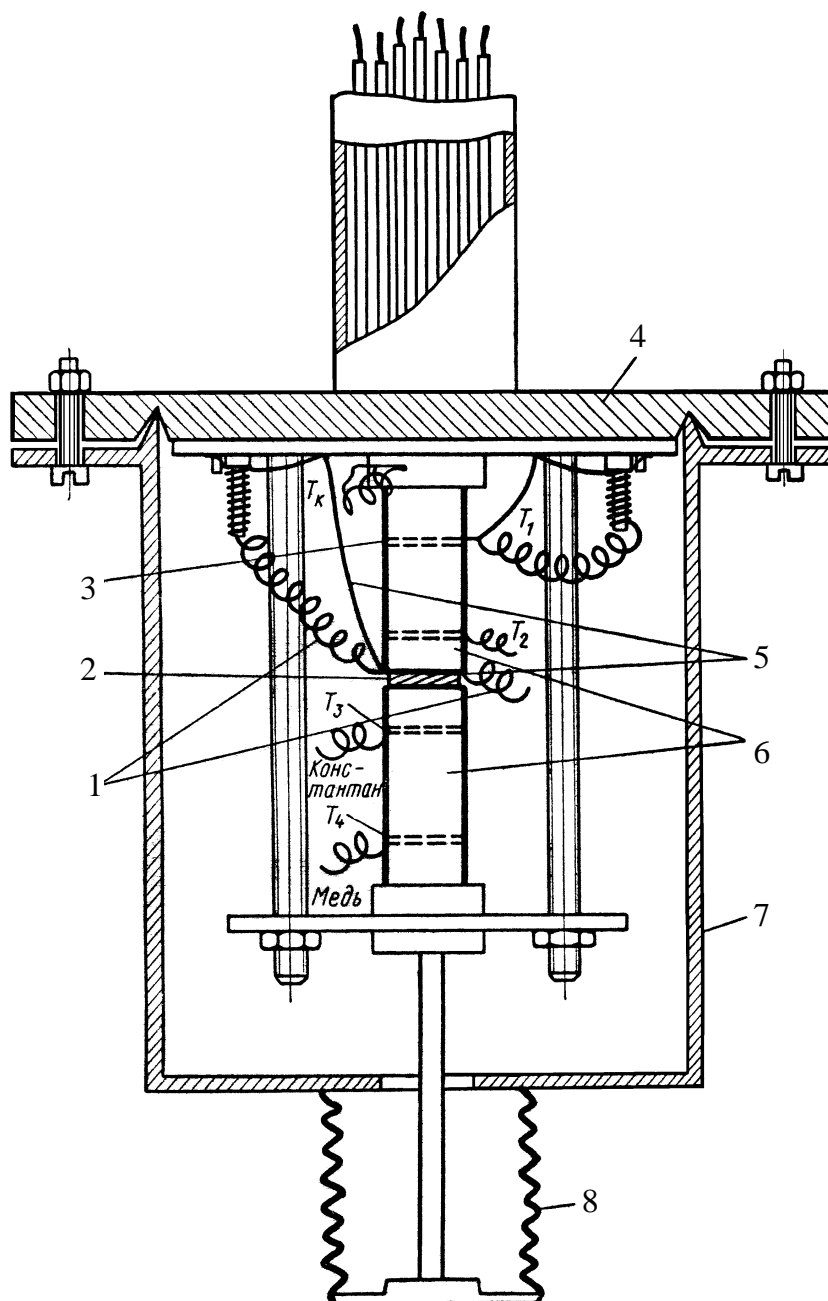
где A – постоянная, в отсутствии вырождения равна 2;

k – постоянная Больцмана;

σ – удельная электропроводность;

T – температура.

Исследование теплопроводности проводили абсолютным методом на установке, схема которой показана на рисунке 2 на образцах, ориентированных перпендикулярно и параллельно главной оси кристалла в интервале температур 300 –600 К.



1 – медные выводы для пропускания тока; 2 – электрический нагреватель; 3 – серебряные штифты; 4 – фланец; 5 – константановые выводы для измерения разности потенциалов; 6 – образцы; 7 – герметичный колпак; 8 – сиффон

Рисунок 2 – Схема установки для измерения теплопроводности

Погрешность измерений составляла ~8 %.

В третьей главе определен состав монокристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ полученных направленной кристаллизацией расплава (вертикальный метод Бриджмена) методом микрорентгеноспектрального анализа. Показано, что содержание компонент в выращенных кристаллах соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте.

Рентгеновским методом определена структура и параметры кристаллической решетки выращенных монокристаллов. Показано, что как соединения $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ так и твердые растворы $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ кристаллизуются в тетрагональной структуре. Параметры элементарной ячейки a и c с составом x изменяются в соответствии с законом Вегарда (линейная зависимость при постоянной температуре между свойствами кристаллической решетки раствора и концентрацией отдельных его элементов) на рисунке 3.

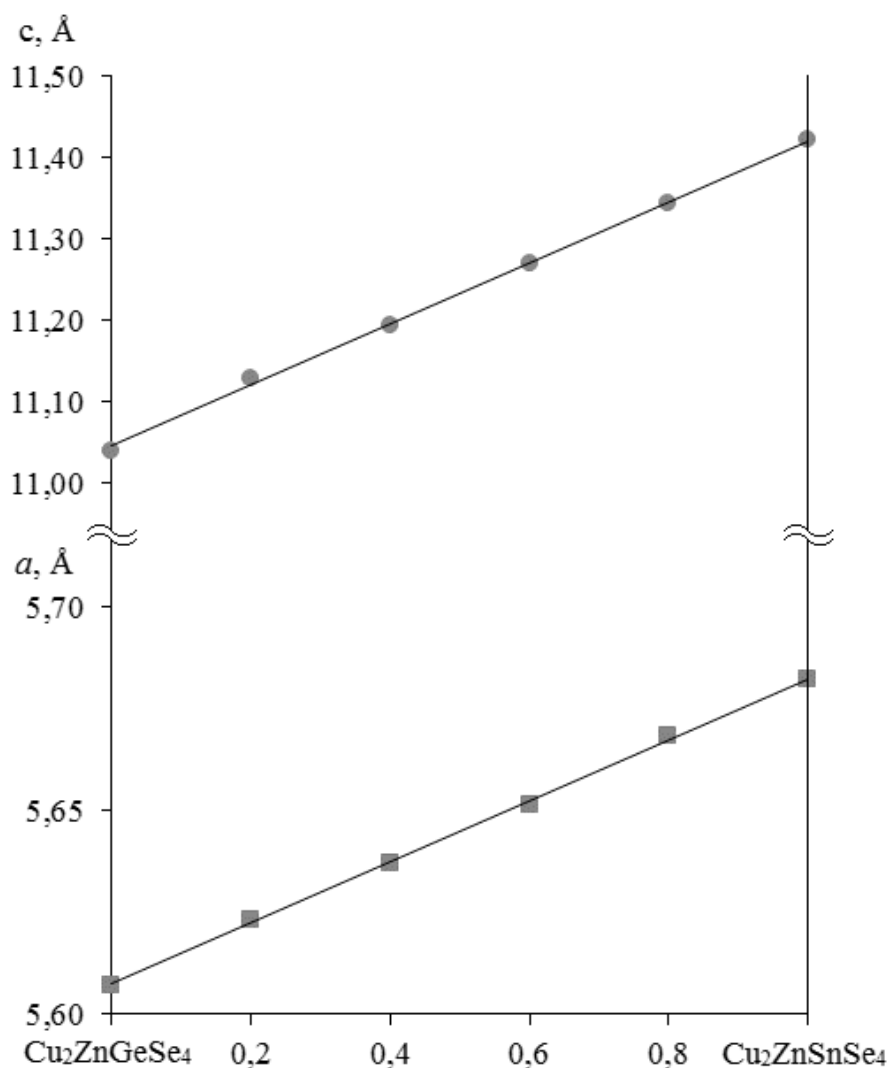


Рисунок 3 – Зависимость параметров элементарной ячейки a и c от состава x для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$

Определены температурные зависимости теплопроводности для соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов на их основе (рисунок 4).

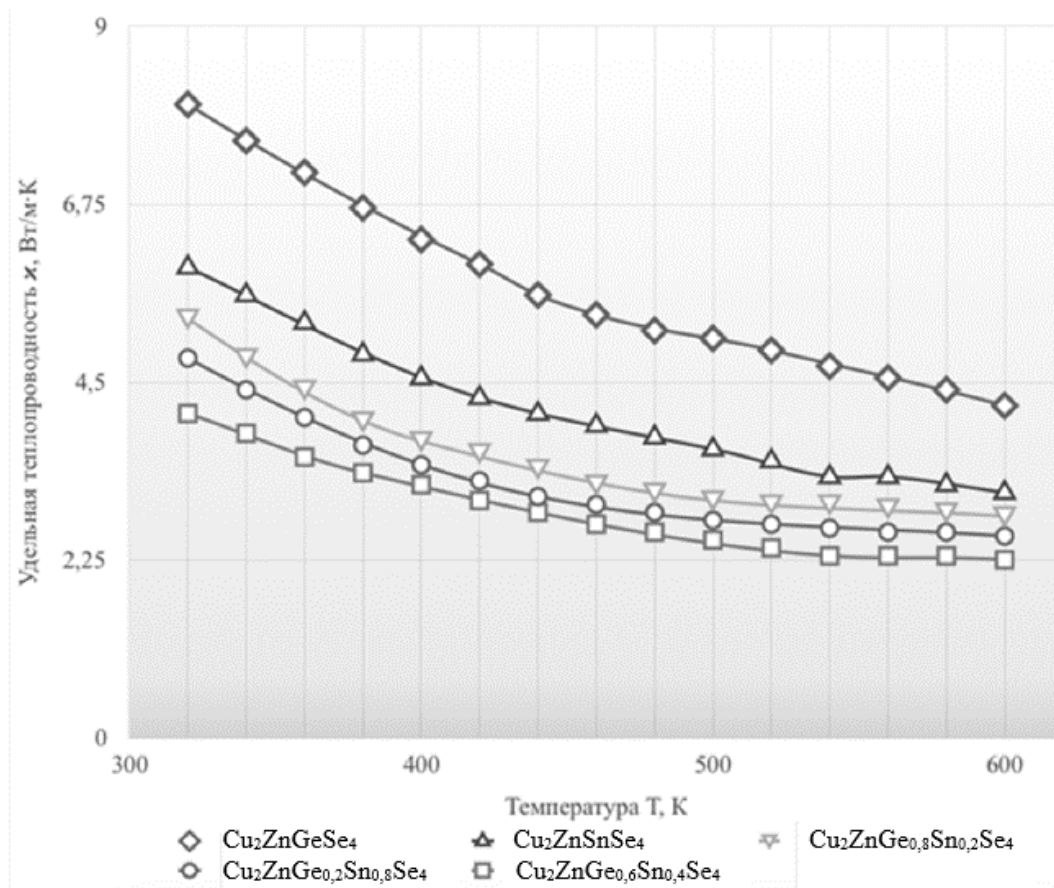


Рисунок 4 – Температурные зависимости теплопроводности для соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$

Из представленного рисунка можно заключить, что измеренная величина теплопроводности обусловлена решеточным вкладом, поскольку электронная составляющая теплопроводности, рассчитанная по соотношению Видемана – Франца (2) составляет $\sim 10^{-2}$ Вт/м·К, что не превышает 1 % от измеренной величины.

Как для соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, так и для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ теплопроводность во всем измеренном интервале температур описывается степенной зависимостью T^{-n} , где $0 < n < 1$, что свидетельствует о преимущественном протекании процессов рассеяния на дефектах кристаллической решетки. Следствием этого является слабая зависимость теплопроводности от температуры.

На рисунке 5 представлена концентрационная зависимость теплопроводности для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$.

Видно, что теплопроводность с составом x изменяется с минимумом, который соответствует среднему составу.

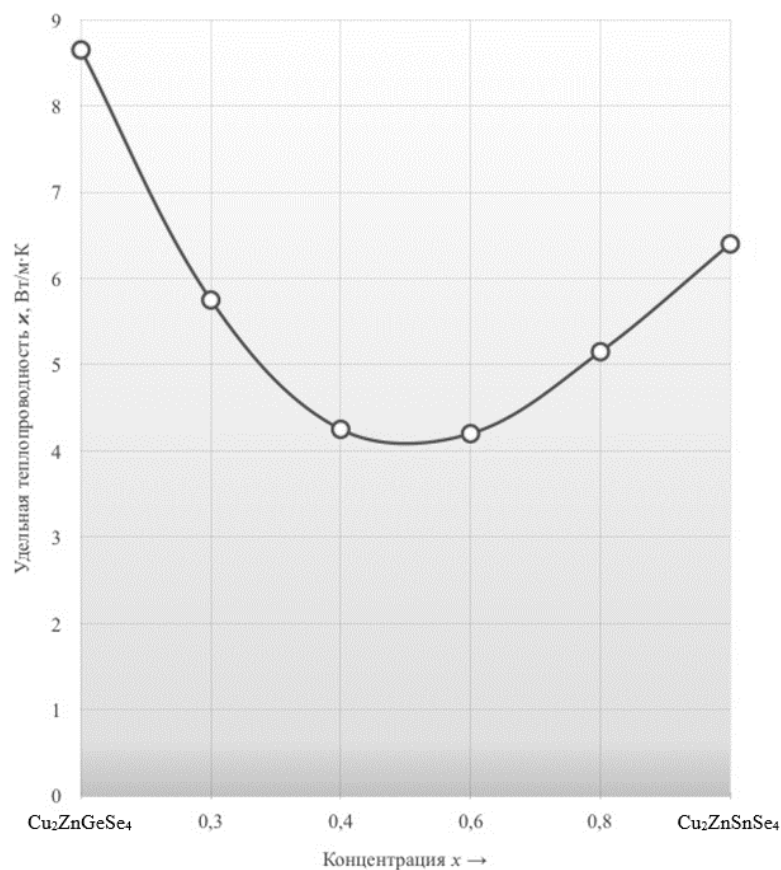


Рисунок 5 – Концентрационная зависимость коэффициента теплопроводности для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$

Значительное снижение теплопроводности для твердых растворов по сравнению с исходными соединениями связано не только с дефектами, которые характерны для исходных соединений, но и с нарушениями периодичности кристаллической решетки в таких материалах из-за статистического распределения атомов по эквивалентным узлам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Методом Бриджмена (вертикальный вариант) впервые выращены однородные кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердые растворы $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ во всем интервале концентраций [1].

2. Определен состав полученных монокристаллов, параметры элементарной ячейки, температуры фазовых превращений и построена диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$. Показано, что содержание компонент в выращенных кристаллах соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте [3].

3. Рентгеновским методом определена структуры полученных кристаллов. Показано, что как исходные соединения $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, так и твердые растворы на их основе кристаллизуются в тетрагональной структуре. Рассчитанные параметры элементарной с составом x изменяются линейно [2].

4. В интервале температур 300–600 К измерена теплопроводность соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$. Установлено, что теплопроводность с составом x изменяется с минимумом для среднего состава [4].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Электронные системы на возобновляемых источниках энергии».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Сыс, А. Д. Выращивание кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ вертикальным методом Бриджмена / А.Д. Сыс // Современные исследования. – 2018 г. – №06 (10). – С. 67 – 70.

2. Сыс, А. Д. Определение структуры кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_4$ рентгеновским методом / А.Д. Сыс // Вопросы науки и образования. – 2018. – №09 (21). – С. 96 – 98.

3. Сыс, А. Д. Твердотельный раствор $\text{Cu}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{ZnSe}_4$: перспективный фотогальванический материал / А.Д. Сыс // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, Республика Беларусь, 23–29 апреля 2018 г. / БГУИР. – Минск, 2018.

4. Сыс, А. Д. Теплопроводность монокристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов на их основе / А.Д. Сыс // Научные исследования. № 7 (27): XXVII международной научно-практической конференции: «Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия», Москва, РФ, 07 июня 2018г. / Научные исследования. – Москва, 2018. – С. 81 – 85.

РЭЗІЮМЭ
Сыс Ганна Дзмітрыеўна
Исследование теплопроводности и теплового
расширения твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$

Ключавыя словы: метада Бриджмена, крышталі.

Мэта працы: распрацоўка тэмпературных рэжымаў вырошчвання крышталяў метадам Бриджмена злучэнняў $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ цвёрдых раствораў $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$, вызначэнне іх складу, крышталя-най структуры і цеплаправоднасці.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Даследаваны дыяграмы стану сістэм $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$ і $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$. Распрацаваны тэмпературныя рэжымы вырошчвання крышталяў накіраванай крышталізацыяй расплаву (вертыкальны варыянт метаду Бриджмена). Вызначаны склад крышталяў метадам микрорентгеноспек-тральных аналізу, вызначана структура і параметры крышталічнай рэ-шэтки вырашчаных крышталяў рэнтгенаўскім метадам. Вымераная теплопро-воднасць злучэнняў $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ і цвёрдых раствораў на іх аснове.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранены ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў навучальны курс «Электронныя сістэмы на аднаўляльных крыніцах энергіі».

Вобласць ужывання: тонкаплёнкавыя пераўтваральнікі сонечнай энергіі.

РЕЗЮМЕ

Сыс Анна Дмитриевна

Исследование теплопроводности и теплового расширения твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$

Ключевые слова: метод Бриджмена, кристаллы.

Цель работы: разработка температурных режимов выращивания кристаллов методом Бриджмена соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$, определение их состава, кристаллической структуры и теплопроводности.

Полученные результаты и их новизна: Исследованы диаграммы состояния систем $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$ и $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$. Разработаны температурные режимы выращивания кристаллов направленной кристаллизацией расплава (вертикальный вариант метода Бриджмена). Определен состав кристаллов методом микрорентгеноспектрального анализа, определена структура и параметры кристаллической решетки выращенных кристаллов рентгеновским методом. Измерена теплопроводность соединений $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов на их основе.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Электронные системы на возобновляемых источниках энергии».

Область применения: тонкопленочные преобразователи солнечной энергии.

SUMMARY

Sys Anna Dmitrievna

Study of thermal conductivity and thermal expansion of solid solutions $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$

Keywords: Bridgman method, crystals.

The object of study: to develop temperature regimes of crystal growth by Bridgman method of $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compounds of solid solutions $\text{Cu}_2\text{ZnGe}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}_4$, determination of their composition, crystalline structure and thermal conductivity.

The results and novelty: The phase diagrams of the $\text{Cu}_2\text{GeSe}_3 - \text{ZnSe}$ and $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{ZnSe}$ systems are studied. The temperature regimes of crystal growth by directional crystallization of the melt (a vertical version of the Bridgman method) have been developed. The composition of the crystals was determined by micro-X-ray spectral analysis, the structure and parameters of the crystal lattice of grown crystals were determined by the X-ray method. The thermal conductivity of $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ and solid solutions on their base.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course «Electronic Systems on Renewable Energy Sources».

Sphere of application: thin-film solar energy converters.