

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592

ФЕЩЕНКО
Артем Александрович

**ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель	Боднарь Иван Васильевич , доктор химических наук, профессор, профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Официальные оппоненты:	Богатырёв Юрий Владимирович , доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» Мухуров Николай Иванович , доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорике Государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Оппонирующая организация	Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Защита состоится «26» 05 2022 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, копр. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail:dissovet@bsuir.by.

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

Автореферат разослан «22» 04 2022 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д 02.15.03
кандидат технических наук, доцент



Г. А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях Республики Беларусь выпускаются современные приборы электронной техники, использующие в своем составе большое количество технических средств. В целях обеспечения развития и конкурентоспособности отечественным производителям необходимо постоянно увеличивать номенклатуру выпускаемых устройств с уникальными эксплуатационными свойствами. Реализовать это возможно за счет повышения качества уже существующих или разработки новых полупроводниковых материалов, используемых в электронной технике.

В настоящее время при создании электронных устройств с новыми функциональными возможностями широкое применение получили соединения группы $B_2^{III}C_3^{VI}$ и $A^I B_5^{III} C_8^{VI}$ ($A - Ag, Cu$; $B^{III} - Al, Ga, In$; $C^{VI} - S, Se, Te$). Из данной группы распространение получили соединения In_2S_3 и $AgIn_5S_8$, которые образуются на разрезах $In - S$ и $Ag_2S - In_2S_3$ и относятся к дефектным полупроводникам с концентрацией вакансий в катионной подрешетке ~ 33 и 25 % соответственно. Данные соединения обладают рядом важных свойств: собственная проводимость всегда электронная, высокие значения коэффициента поглощения, наличие фоточувствительности, малая теплопроводность, значения ширины запрещенной зоны $\sim 1,8 - 2,1$ эВ, не испытывают влияния со стороны посторонних атомов и обладают высокой радиационной стойкостью, имеется возможность заменить токсичный CdS при производстве преобразователей солнечного излучения.

Совокупность вышеперечисленных свойств подтверждает перспективность использования соединений In_2S_3 и $AgIn_5S_8$ при создании ряда оптоэлектронных устройств: ИК-детекторов, оптических фильтров, более дешевых и радиационно стойких преобразователей солнечного излучения.

В настоящее время опубликовано большое количество работ по получению и исследованию характеристик бинарных и тройных соединений In_2S_3 и $AgIn_5S_8$. Наиболее значимые научные результаты были получены белорусскими учеными (В. Ф. Гременок, Г. П. Яблонский, И. В. Боднар, М. С. Тиванов, В. А. Полубок, В. В. Шаталова), среди зарубежных авторов интерес вызывают работы Э. К. Арушанова, N. M. Gasanly, O. Gurlu, Lina Zhao, S. Jeong, A. Serpenguzel, в которых представлены результаты физико-химических свойств сложных полупроводниковых материалов.

Однако публикаций по систематическому исследованию свойств твердых растворов $(In_2S_3)_x \cdot (AgIn_5S_8)_{1-x}$, полученных на основе соединений In_2S_3 и $AgIn_5S_8$, не обнаружено, что вызывает научный интерес благодаря возможности получения новых справочных данных и использования их при реализации практических идей по созданию перспективных приборов электронной техники с уникальными эксплуатационными характеристиками.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» № 1099-о от 21.12.2018 г. Тема работы соответствует п. 8 «Многофункциональные материалы и технологии» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190, и п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156.

Часть результатов работы получена в рамках выполнения исследований по проекту БРФФИ № T20MB-007 (договор № 207011 от 04.05.2020 г.) на тему «Выращивание монокристаллов соединений AgIn_5S_8 , In_2S_3 и твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_{1-x} - (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ » (2020 – 2022 гг., № г. р. 20201264), ГБ 17-2021 «Методы и алгоритмы построения информационно-компьютерных систем» (2017 – 2020 гг., № г. р. 20171045) и ГБ 21-2021 «Методология построения, моделирования и комплексной оценки качества информационных и технических систем» (2021 г. – по наст. время, № г. р. 20211029).

Цель и задачи исследования

Целью исследования является установление температурно-временных режимов синтеза и выращивания гомогенных и оптически однородных монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$, а также закономерности изменения структурных, электрических, оптических, теплофизических свойств в зависимости от состава твердого раствора; формирование фоточувствительных поверхностно-барьерных структур и исследование их фотоэлектрических свойств для использования полученных результатов при усовершенствовании элементов конструкций приборов электронной техники.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Синтезировать двухтемпературным методом из элементарных компонентов поликристаллы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$.
2. Разработать режимы выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ методом Бриджмена (вертикальный вариант).
3. Определить состав, структуру и параметры элементарной ячейки, построить диаграмму состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3 - \text{AgIn}_5\text{S}_8$, установить плотность, микротвердость, оптические и электрические свойства выращенных монокристаллов.

4. Установить закономерности изменения физико-химических и физических свойств выращенных монокристаллов в зависимости от состава твердого раствора.

5. Создать на основе выращенных монокристаллов фоточувствительные поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ и исследовать их фотоэлектрические свойства.

Объект исследования – монокристаллы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$, выращенные методом Бриджмена (вертикальный вариант), а также поверхностно-барьерные структуры, созданные на их основе.

Предмет исследования – физико-химические, оптические, теплофизические свойства выращенных монокристаллов твердых растворов; фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$.

Научная новизна

– установлены температурно-временные режимы выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ (диаметр ~ 16 мм, длина ~ 40 мм) направленной кристаллизацией расплава (метод Бриджмена) с применением вибрационного перемешивания;

– экспериментально получены результаты физико-химических (элементный состав, кристаллическая структура, плотность, микротвердость, температуры фазовых превращений, построена диаграмма состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3 - \text{AgIn}_5\text{S}_8$) и физических (электрические, оптические, теплофизические) свойств твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$, что позволило определить новые справочные данные в области полупроводникового материаловедения;

– установлены закономерности изменения физико-химических и физических свойств выращенных монокристаллов от состава твердого раствора, что позволяет использовать полученные данные при разработке приборов электронной техники;

– исследованы фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ и определены возможности использования данных материалов в качестве широкополосных преобразователей излучения.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально обоснованные режимы синтеза и выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ с применением вибрационного перемешивания: синтез кристаллов – температура расплава 1338 – 1368 К в зависимости от состава (x) твердого раствора, кристаллизация со скоростью ~ 50 К/ч, выращивание монокристаллов – температура расплава 1338 – 1368 К, рост со скоростью 2 К/ч, вибрационное перемешивание – частота колебаний 5 Гц, амплитуда 8 мм, что позволило получить гомогенные монокристаллы диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 40 мм, минимизи-

ровав применение вспомогательных компонентов за счет оптимизации системы роста монокристаллов.

2. Установленные зависимости физико-химических и физических свойств монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$: тип кристаллической решетки – кубическая шпинель, параметры элементарной ячейки – в пределах $a = 10,772 \pm 0,005 \text{ \AA} - 10,827 \pm 0,005 \text{ \AA}$, энергия активации – в пределах $E_a = 0,4 - 0,6 \text{ эВ}$, значения ширины запрещенной зоны – в пределах $E_g = 1,81 - 2,09 \text{ эВ}$, температура фазовых превращений – в пределах $T = 1012 - 1364 \text{ К}$, плотность – в пределах $d = 4,62 - 4,84 \text{ г/см}^3$, микротвердость – в пределах $H = 2,55 - 3,05 \text{ ГПа}$, коэффициент теплового расширения – в пределах $\alpha_L = 1,6 \cdot 10^{-6} - 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, теплопроводность – в пределах $\kappa = 1,95 - 3,48 \text{ Вт/м} \times \text{К}$ при x , равном от 0 до 1, что позволяет использовать новые справочные данные в области полупроводниковых материалов.

3. Установленные фотоэлектрические зависимости созданных поверхностно-барьерных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ (коэффициент выпрямления $K \sim 5$, фоторегистрация в диапазоне $h\nu \approx 0,9 - 2,0 \text{ эВ}$, вольтовая фоточувствительность $S_u^m \approx 120 \text{ В/Вт}$), что подтверждает возможность использования выращенных монокристаллов в качестве материалов для создания широкополосных фотопреобразователей солнечного излучения.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в обосновании режимов синтеза и выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$, определении их состава и структуры, исследовании электрических, оптических и теплофизических свойств, создании образцов фоточувствительных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$.

Определение цели и задач, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились с научным руководителем д-ром хим. наук И. В. Боднарем. Полученные результаты обсуждались с д-ром физ.-мат. наук Г. П. Яблонским, канд. техн. наук В. В. Хорошко, канд. физ.-мат. наук И. В. Викторовым, канд. физ.-мат. наук В. Н. Павловским, Е. И. Свитенковым, на совместно опубликованные работы с авторами приведены ссылки. Результаты, полученные без вклада соискателя, в работу не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований докладывались и обсуждались на 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ (Москва, Российская Федерация, 23 – 29 ноября 2020 г.), XXIX Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, Республика Беларусь, 22 – 23 апреля 2021 г.), 56-й и 57-й научной

конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Республика Беларусь, 2020, 2021 гг.), XXXIX Международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology» (Москва, Российская Федерация, 15 сентября 2021 г.).

Полученные результаты исследований использованы на предприятии ООО «Изовак Технологии» в процессе формирования барьерного слоя в структуре CIGS-полупроводников солнечного модуля методом распыления в вакууме, а также внедрены в учебный процесс УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в качестве лекционного материала для студентов специальностей 1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях» факультета инфокоммуникаций и 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» факультета компьютерного проектирования.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях (4 статьи в научных изданиях, включенных в базу *Scopus*, 2 статьи в научных изданиях, включенных в базу *Web of Science*), 4 статьи в сборниках материалов научных конференций, 2 тезиса докладов на научных конференциях. Получен патент Республики Беларусь на полезную модель.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,5 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 133 страницы. Из них 66 страниц текста, 60 иллюстраций на 28 страницах, 24 таблицы на 13 страницах, библиографический список из 163 источников на 13 страницах, список собственных публикаций соискателя из 13 наименований на 2 страницах, 5 приложений на 11 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** проведен литературный обзор работ по физико-химическим и физическим свойствам бинарных и тройных соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 . Представлены параметры кристаллической решетки и отмечено, что данные соединения кристаллизуются в структуру шпинели и обладают природными дефектами, которые обусловлены особенностями кристаллохимии. Из-за

особенностей структуры данные соединения не испытывают сильного влияния со стороны посторонних атомов, обладают малой теплопроводностью и высокой радиационной стойкостью, стоит отметить, что проводимость данных соединений электронная и присутствует фоточувствительность, что подтверждает перспективность использования данных соединений в качестве полупроводниковых материалов при реализации практических идей по созданию устройств электронной техники с уникальными эксплуатационными свойствами.

Для соединения In_2S_3 выделяют четыре структурные модификации: тетрагональная, кубическая, тригональная, кубическая сверхструктура, которые отличаются температурными диапазонами кристаллизации. Рассмотрены возможные способы синтеза поликристаллов из элементарных компонентов, а также методы выращивания объемных монокристаллов системы $\text{B}_2^{\text{III}}\text{C}_3^{\text{VI}} - \text{A}^{\text{I}}\text{B}_5^{\text{III}}\text{C}_8^{\text{VI}}$. Проведенный литературный анализ по исходным соединениям In_2S_3 и AgIn_5S_8 показал, что данные по физико-химическим свойствам, полученные различными авторами, близкие, но несколько отличаются друг от друга, что обусловлено, видимо, различными методами получения исследуемых соединений. Какие-либо данные по систематическому исследованию твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ в литературе практически отсутствуют.

Во второй главе описан двухтемпературный метод синтеза твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ из элементарных компонентов и система выращивания монокристаллов методом Бриджмена. На первом этапе кристаллы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ синтезировали двухтемпературным методом. В качестве исходных компонентов использовалось серебро чистотой $\sim 99,999\%$, индий марки «Ин00» и сера марки «ОСЧ 14-4».

На втором этапе для выращивания монокристаллов использовалась разработанная и запатентованная автором система для роста монокристаллов твердых растворов (BY 12551 U 2021.02.28). Для роста монокристаллов температура в ростовой печи равномерно повышалась до 1338 – 1368 К в течение ~ 5 ч с выдержкой при данной температуре 2 ч и с применением вибрационного перемешивания. По истечении времени выдержки проводилась направленная кристаллизация расплава монотонным понижением температуры печи со скоростью ~ 2 К/ч до полного затвердевания расплава. После чего для гомогенизации полученных слитков проводился отжиг при 1100 К в течение 400 ч.

Выращенные монокристаллы имели диаметр ~ 16 мм и длину ~ 40 мм, были однородными и гомогенными, что было в дальнейшем установлено методами микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа.

В третьей главе представлены методики и оборудование, использованные при исследовании свойств выращенных монокристаллов. Элементный состав определялся методом дисперсионной спектроскопии на аппарате *Stereoscan-360*. Структура определялась с помощью рентгеноструктурного ана-

лиза, в котором угловые положения линий дифракционного спектра записывали на дифрактометре ДРОН-3М в диапазоне углов $10^\circ - 90^\circ$ с использованием CuK_α -излучения с графитовым монохроматором. Измерение плотности проводилось пикнометрическим методом с использованием жидкости известной плотности (тетрахлорметан). Для исследования микротвердости (H) применялся метод Кнупа с использованием стандартной ромбической пирамиды. Измерения выполнялись на микротвердомере *LIECA VMHT MOT*. Для определения температуры фазовых переходов и построения диаграммы состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3 - \text{AgIn}_5\text{S}_8$ применялся дифференциальный термический анализ, который основан на регистрации разности температур исследуемого материала с инертным образцом и сравнении их результатов при одновременном нагревании и охлаждении.

Исследование оптических свойств монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ при комнатной температуре проводилось на спектрофотометре *MC-121 Proscan Special*. Для исследований температурных зависимостей оптических свойств применялась установка, состоящая из гелиевого рефрижератора замкнутого цикла, монохроматора, кремниевой ПЗС-линейки, галогеновой лампы в качестве источника излучения и персонального компьютера. По снятым спектрам пропускания рассчитывали коэффициент поглощения (α) по формуле, учитывающей многократное внутреннее отражение в плоскопараллельном образце. Ширину запрещенной зоны (E_g) выращенных монокристаллов определяли экстраполяцией прямолинейного участка зависимости $(\alpha \cdot h\nu)^2$ от энергии фотона ($h\nu$) до пересечения с осью абсцисс.

Дилатометрический метод применялся для исследований коэффициента теплового линейного расширения. Для наблюдения и записи линейных изменений в дилатометре предусмотрен температурный контроль, так как при исследовании важно определить не только величину объемных изменений, но и температуру, при которой происходят эти изменения. Полученные данные использовались для расчетов температуры Дебая и среднеквадратичных динамических смещений атомов. Исследование температурных зависимостей удельного сопротивления проводилось четырехзондовым методом на установке *HFMS* на образцах, вырезанных из монокристаллов в виде прямоугольных параллелепипедов. Контакты к образцам изготавливались с помощью ультразвуковой пайки индием. Все используемое измерительное оборудование сертифицировано и проходило юстировку. Погрешность всех экспериментальных измерений не превышала 5 %.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты и установленные концентрационные зависимости физико-химических и физических свойств выращенных монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$.

Полученные результаты микрорентгеноспектрального анализа удовлетворительно согласуются с расчетными данными в исходной шихте (таблица 1). Стоит отметить, что не наблюдается значительных отклонений составов в разных точках монокристаллов твердых растворов, что свидетельствует об их локальной однородности.

Таблица 1. – Результаты микрорентгеноспектральных измерений

Состав, x	Ag, атом. %		In, атом. %		S, атом. %	
	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.
0,0	7,14	7,29	35,72	35,03	57,14	57,68
0,2	6,57	6,87	36,06	35,21	57,37	57,92
0,3	6,19	5,98	36,31	36,44	57,50	57,58
0,4	5,77	6,45	36,53	35,84	57,79	57,71
0,5	5,27	5,83	36,84	36,13	57,89	58,04
0,6	4,65	4,96	37,21	36,98	58,14	58,06
0,8	2,95	3,09	38,25	37,93	58,80	58,98
0,9	1,69	1,78	38,98	38,72	59,39	59,50
1,0	–	–	40,00	40,36	60,00	59,64

Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что монокристаллы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ кристаллизуются в кубическую структуру шпинели (пространственная группа $Fd\bar{3}m - O_h^7$). Разрешение высокоугловых линий на дифрактограммах свидетельствует о равновесности соединений и гомогенности твердых растворов. По полученным значениям углов дифракции и индексов Миллера были рассчитаны параметры элементарной ячейки методом наименьших квадратов, которые равны: $a = 10,772 \pm \pm 0,005 \text{ \AA}$ для In_2S_3 и $a = 10,827 \pm \pm 0,005 \text{ \AA}$ для AgIn_5S_8 . Зависимость параметра элементарной ячейки от состава (x) для твердых растворов представлена на рисунке 1.

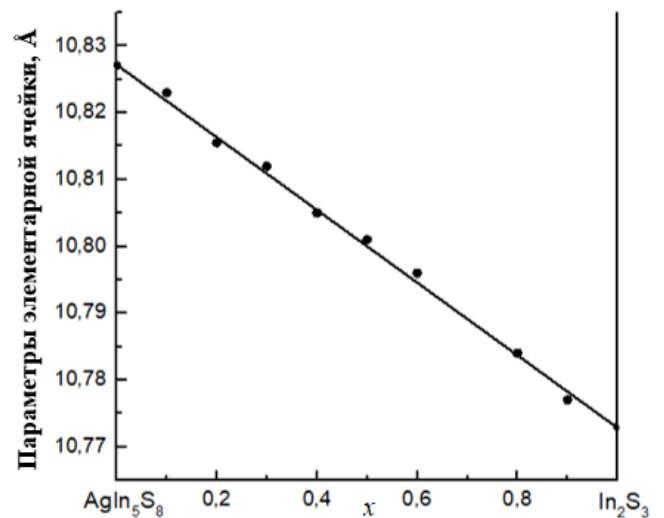


Рисунок 1. – Зависимость $a(x)$ твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

По результатам расчетов параметров элементарной ячейки (a) и построения концентрационной зависимости установлено, что зависимость $a(x)$ имеет линейный характер, что согласуется с законом Вегарда и описывается выражением

$$a = 10,772 + 0,055(1 - x). \quad (1)$$

Плотность твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ определялась по пикнометрическому методу, микротвердость – по методу Кнупа. По полученным данным построена концентрационная зависимость плотности (рисунок 2) и

микротвердости (рисунок 3). Установлено, что плотность, как и параметр элементарной ячейки, с составом (x) изменяется линейно, для зависимости $H(x)$ выполняется закон Курнакова, в котором говорится, что в случае образования в системе непрерывного ряда твердых растворов концентрационная зависимость $H(x)$ описывается плавной кривой с максимумом. В данном случае точка максимума соответствует твердому раствору $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,4} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,6}$, что видно из графика, и сдвинута в сторону соединения с меньшей микротвердостью.

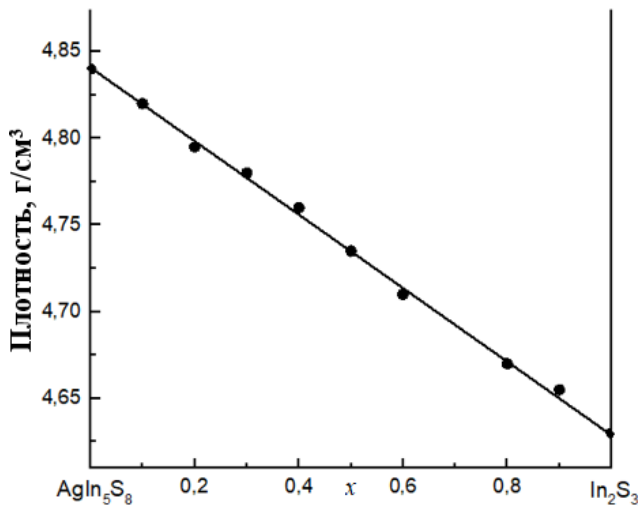


Рисунок 2. – Концентрационная зависимость плотности твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

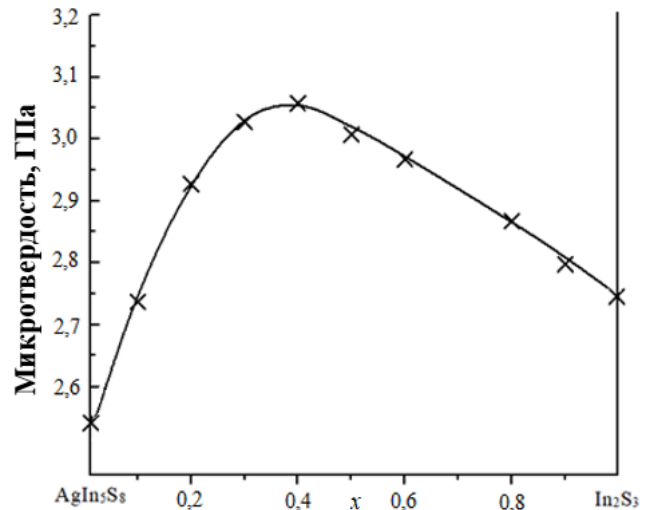


Рисунок 3. – Концентрационная зависимость микротвердости твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Исследование температуры фазовых превращений твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ показало, что для соединения AgIn_5S_8 и твердых растворов присутствует один тепловой эффект, который соответствует температуре плавления для соединения AgIn_5S_8 и точкам солидуса и ликвидуса для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$. Для соединения In_2S_3 присутствуют два тепловых эффекта при температурах 1012 К и 1364 К. Тепловой эффект при температуре 1012 К соответствует твердофазному превращению, при котором кубическая структура шпинели трансформируется в тригональную, а тепловой эффект при температуре 1364 К соответствует температуре плавления данного соединения. По данным дифференциально-термического анализа построена диаграмма состояния (рисунок 4).

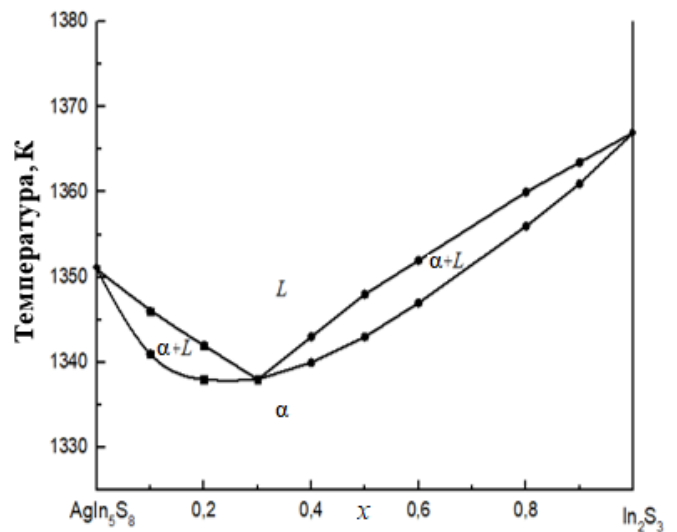
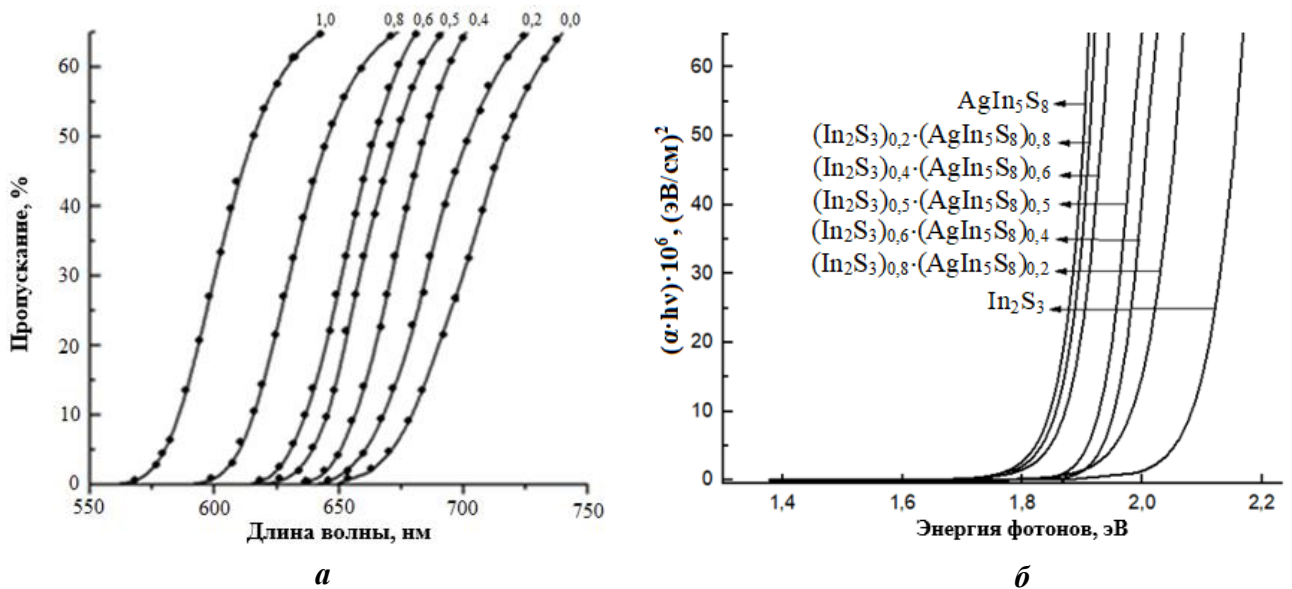


Рисунок 4. – Диаграмма состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3 - \text{AgIn}_5\text{S}_8$

На диаграмме для соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 указаны точки плавления, а для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ – линии ликвидуса и солидуса, а также имеется одна общая точка для твердого раствора $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,3} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$. Из указанной диаграммы состояния можно сделать вывод, что система характеризуется неограниченной растворимостью как в твердом (α), так и в жидком (L) состоянии, а интервал кристаллизации составляет $\sim 2 - 5$ К. Представленная диаграмма относится к третьему типу диаграмм по классификации Розебома.

Результаты измерений оптических свойств выращенных твердых растворов представлены на рисунке 5. Из рисунка 5, *а* видно, что пропускания (T) составляют $> 60\%$. По полученным данным пропускания рассчитан коэффициент поглощения α . Ширина запрещенной зоны (E_g) выращенных монокристаллов определялась экстраполяцией прямолинейного участка зависимости $(\alpha \cdot hv)^2$ от энергии фотона (hv) до пересечения с осью абсцисс (рисунок 5, *б*).



а – спектры пропускания; *б* – спектральные зависимости $(\alpha \cdot hv)^2$ от энергии фотонов hv

Рисунок 5. – Оптические свойства твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Полученные значения ширины запрещенной зоны (E_g) твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ при комнатной температуре приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Ширина запрещенной зоны твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

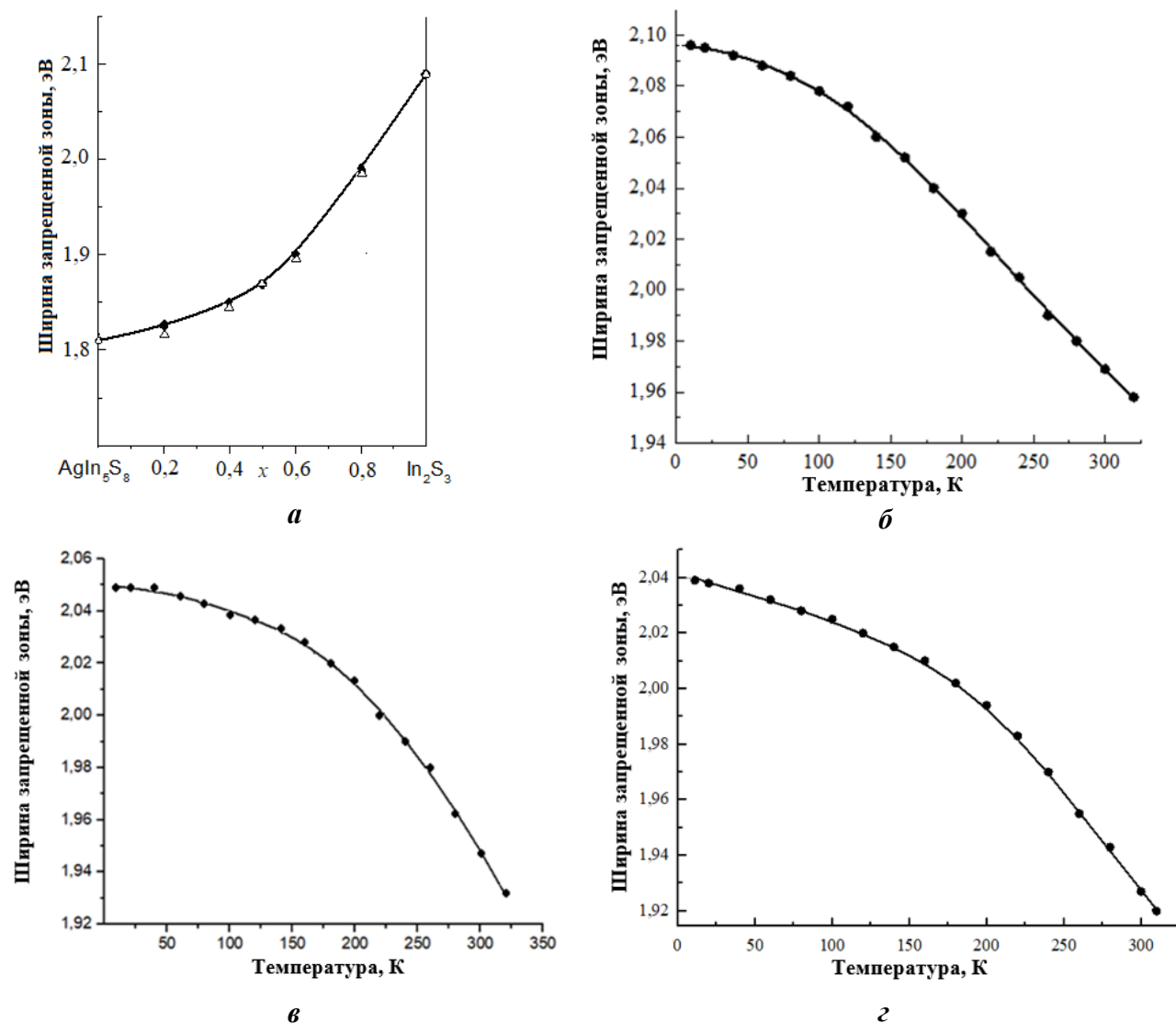
Состав, x	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
E_g , эВ	1,81	1,816	1,850	1,870	1,908	1,984	2,09

По значениям ширины запрещенной зоны построена концентрационная зависимость $E_g(x)$ для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ (рисунок 6, *а*). Установлено, что зависимость $E_g(x)$ имеет нелинейный характер и описывается следующим квадратичным уравнением:

$$E_g(x) = 1,81 - 0,04x + 0,32x^2. \quad (2)$$

Из рисунка б, а видно, что экспериментальные данные (обозначены точками) согласуются с расчетными (обозначены треугольниками).

Для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,8} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,2}$, $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,6} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,4}$, $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,5} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ были измерены спектры пропускания в интервале температур $T = 10 - 320$ К. По полученным данным построены спектральные зависимости и определена ширина запрещенной зоны (E_g). Температурные зависимости ширины запрещенной зоны $E_g(T)$ представлены на рисунке б, б – г (точки).



а – зависимость ширины запрещенной зоны для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$; температурные зависимости ширины запрещенной зоны для твердых растворов: **б** – $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,8} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,2}$; **в** – $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,6} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,4}$; **г** – $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,5} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$

Рисунок 6. – Зависимости ширины запрещенной зоны от состава и температуры

По построенным температурным зависимостям ширины запрещенной зоны видно, что они имеют вид, характерный для большинства многокомпонентных полупроводниковых материалов, с понижением температуры E_g возрастает. Теоретически рассчитанные значения зависимости $E_g(T)$ также представле-

ны на рисунке 6 сплошной линией. Видно, что экспериментальные результаты с высокой точностью согласуются с расчетными величинами.

Измерения теплового расширения выращенных монокристаллов проводились в интервале температур $T = 80 - 550$ К. В исследованном диапазоне никаких аномалий не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии в данном интервале фазовых превращений. По полученным данным был рассчитан коэффициент теплового расширения (α_L). Установлено, что α_L как для исходных соединений, так и для твердых растворов слабо изменяется в интервале температур $T = 80 - 190$ К (рисунок 7). Выше 190 К наблюдается резкий рост α_L вплоть до 300 К, после чего температура мало влияет на коэффициент теплового расширения, что связано с изменением степени ангармонизма тепловых колебаний атомов в исследованных монокристаллах. По полученным значениям коэффициента теплового расширения были рассчитаны температуры Дебая и среднеквадратичные динамические смещения атомов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ (рисунки 8, 9).

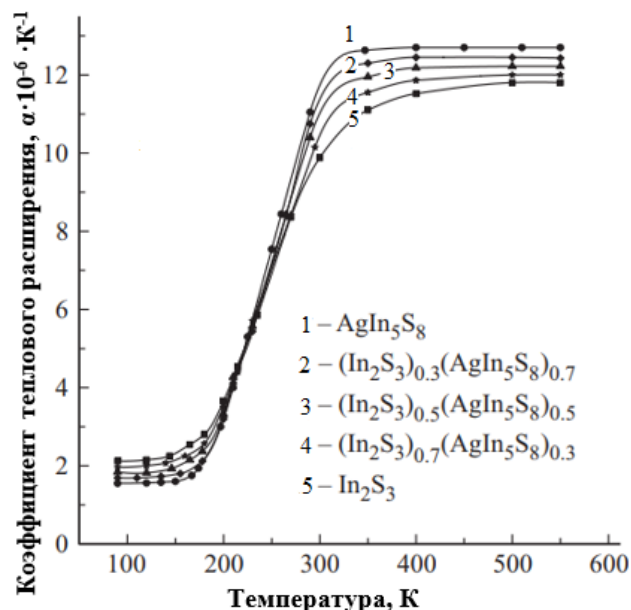


Рисунок 7. – Зависимости $\alpha_L(T)$ твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

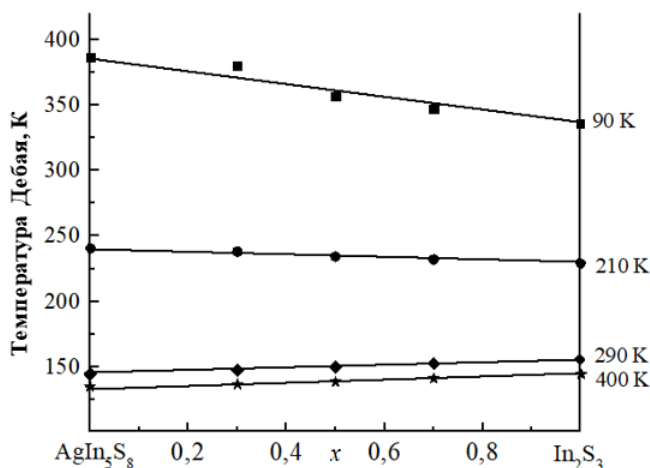


Рисунок 8. – Температуры Дебая твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

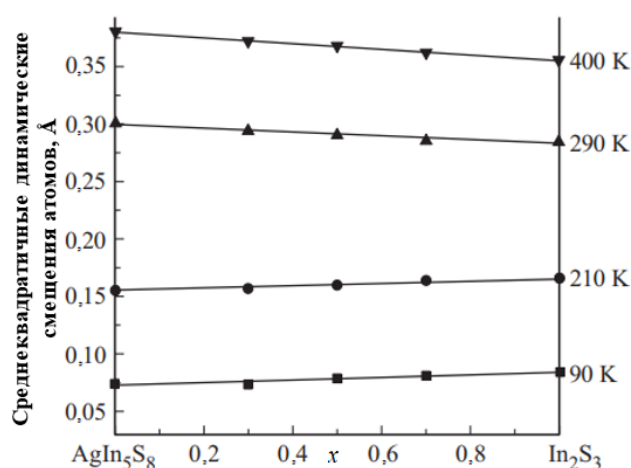


Рисунок 9. – Среднеквадратичные смещения атомов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Теплопроводность измерялась в интервале температур $T = 300 - 540$ К (рисунок 10). Установлено, что в данном диапазоне температур теплопроводность монокристаллов определяется преимущественно решеточным вкладом.

По полученным экспериментальным данным была построена концентрационная зависимость $\kappa(x)$ при комнатной температуре (рисунок 11).

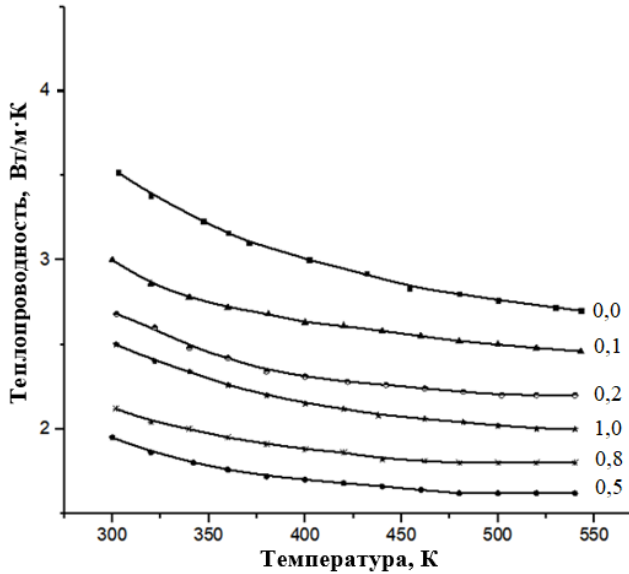


Рисунок 10. – Температурная зависимость теплопроводности твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

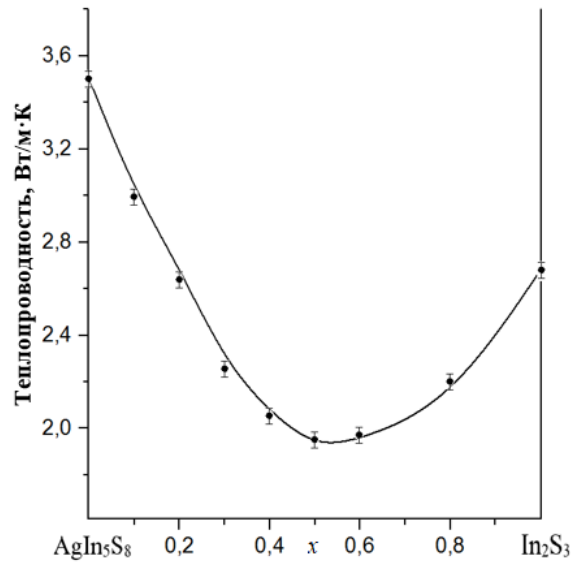


Рисунок 11. – Концентрационная зависимость теплопроводности твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Видно, что зависимость κ от x имеет минимум, соответствующий среднему составу. Такая зависимость $\kappa(x)$ (значительное снижение κ для твердых растворов по сравнению с исходными соединениями) связана не только с дефектностью монокристаллов, но и с нарушениями периодичности кристаллической решетки в твердых растворах из-за статического распределения атомов по эквивалентным узлам. Для твердых растворов максимальное разупорядочение соответствует среднему составу ($x = 0,5$), поэтому и теплопроводность для них минимальна. Концентрационная зависимость $\kappa(x)$ для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ при $T = 300$ К аналитически описывается выражением

$$\kappa = 3,52 - 5,27 \cdot x + 4,34 \cdot x^2. \quad (3)$$

Расчетные значения $\kappa(x)$ для твердых растворов на рисунке 11 представлены сплошной линией. Видно, что экспериментальные данные (точки) согласуются с расчетными величинами (сплошная линия).

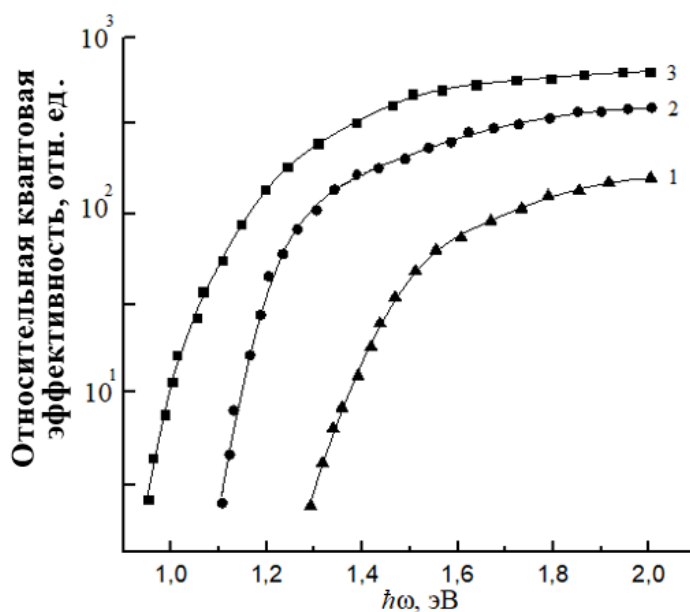
Результаты измерений температурной зависимости удельного электросопротивления твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ в интервале температур $T = 200 - 300$ К показали, что с уменьшением температуры удельное сопротивление исследуемых образцов гиперболически возрастает от 10^4 до $7 \cdot 10^7$ Ом·м. Анализ температурных зависимостей сопротивления показал, что на кривых имеются участки, которые лучше всего линеаризуются в аррениусовых координатах $\ln \rho \sim E_a/kT$, что указывает на активационный механизм электропереноса с энергией активации, лежащей в интервале $E_a = 0,4 - 0,6$ эВ.

В пятой главе для исследования фоточувствительности выращенных монокристаллов формировались поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$. Формирование барьерного слоя индия происходило вакуумным термическим напылением толщиной ~ 1 мкм на поверхность полученных монокристаллов. Напыление происходило при $T \approx 300$ К без нагрева образцов для исключения возможности образования на границе слоя с подложкой других фаз. Для создания омического контакта между проводником и структурой применялся токопроводящий клей «Контактол».

По результатам проведенных исследований стационарных вольт-амперных характеристик поверхностно-барьерных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ установлено, что созданные структуры обладают выпрямлением, которому соответствует отрицательная полярность внешнего смещения на полупроводнике. Коэффициент выпрямления (K) в таких структурах характеризуется отношением прямого тока к обратному и составляет $K \sim 5$ при значении напряжения смещения $U \sim 0,5$ В и $T \approx 300$ К. Освещение созданных поверхностно-барьерных структур светом (длина волны 400 – 1400 нм) сопровождалось появлением фотовольтаического эффекта. Энергия падающих фотонов и интенсивность освещения не влияют на знак фотонапряжения.

На рисунке 12 показаны спектры относительной квантовой эффективности фотопреобразования созданных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$, из которых видно, что при освещении данных структур (видимый свет) идет быстрый рост фотопреобразования в промежутке значений $0,9 \text{ эВ} < \hbar\omega < 2,0 \text{ эВ}$.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что созданные структуры обладают фоточувствительностью в широком спектральном диапазоне энергий от $\hbar\omega \approx 0,9$ эВ до 2,0 эВ при $T \approx 300$ К. Данные воспроизводимые результаты подтверждают возможность использования выращенных монокристаллов в качестве материалов для создания широкополосных фотопреобразователей солнечного излучения.



- 1 – $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,2} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,8}$;
 2 – $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,5} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$;
 3 – $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,8} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,2}$

Рисунок 12. – Спектральная зависимость фотопреобразования поверхностно-барьерных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны и экспериментально обоснованы температурно-временные режимы синтеза и выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ с применением вибрационного перемешивания: синтез кристаллов производился двухтемпературным методом при температуре расплава 1338 – 1368 К со скоростью ~ 50 К/ч; выращивание монокристаллов производилось методом Бриджмена (вертикальный вариант) при температуре расплава 1338 – 1368 К со скоростью ~ 2 К/ч с применением вибрационного перемешивания с частотой колебаний 5 Гц и амплитудой 8 мм, что позволило получить гомогенные и оптически однородные монокристаллы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 40 мм [7, 9, 11, 13].

2. Методом рентгенофазового анализа установлена линейная концентрационная зависимость параметра элементарной ячейки (a), изменяющаяся в пределах $10,772 \pm 0,005 \text{ \AA} - 10,827 \pm 0,005 \text{ \AA}$, что согласуется с законом Вегарда. По результатам дифференциально-термического анализа определены температуры фазовых превращений и построена диаграмма состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3 - \text{AgIn}_5\text{S}_8$. Система характеризуется неограниченной растворимостью как в твердом, так и в жидком состоянии, а интервал кристаллизации составляет $\sim 2 - 5$ К и имеется одна общая точка для состава $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,3} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$. Это позволяет отнести построенную диаграмму к III типу по классификации Розебома [4, 8].

3. Из результатов измерения спектров оптического пропускания монокристаллов твердых растворов установлены концентрационные и температурные зависимости ширины запрещенной зоны. Концентрационная зависимость $E_g(x)$ имеет квадратичную форму, изменяется в пределах 1,81 – 2,09 эВ. Температурная зависимость $E_g(T)$ для составов $x = 0,5; 0,6; 0,8$ с понижением температуры возрастает в пределах 1,916 – 2,039 эВ; 1,931 – 2,048 эВ; 1,958 – 2,097 эВ соответственно, что характерно для большинства многокомпонентных полупроводниковых материалов [1, 2, 5].

4. Для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ проведены исследования микротвердости – метод Кнупа, плотности – пикнометрический метод, электрических свойств – четырехзондовый потенциометрический метод. Показано, что плотность, как и параметр элементарной ячейки, имеет линейную зависимость $d(x)$ в пределах $4,62 - 4,84 \text{ г/см}^3$, микротвердость $H(x)$ в отличие от плотности имеет нелинейную зависимость в пределах 2,55 – 3,05 ГПа, с максимумом, который соответствует твердому раствору $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,4} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,6}$, что согласуется с законом Курнакова. Анализ температурных зависимостей сопротивления показал, что на кривых имеются участки, которые лучше всего линеаризуются в аррениусовых координатах $\ln \rho \sim E_a/kT$, что указывает на активаци-

онный механизм электропереноса с постоянной энергией активации (E_a), лежащей в интервале 0,4 – 0,6 эВ [4, 12].

5. По результатам измерения теплофизических свойств (тепловое расширение – дилатометрический метод, теплопроводность – абсолютный метод) рассчитаны коэффициенты теплового расширения, температура Дебая, среднеквадратичные динамические смещения атомов и установлена следующая закономерность: с ростом температуры значения температуры Дебая уменьшаются, а среднеквадратичные динамические смещения атомов как в исходных соединениях, так и в твердых растворах увеличиваются. По результатам исследований теплопроводности построена концентрационная зависимость $\kappa(x)$, имеющая квадратичную форму с минимумом κ , соответствующим составу твердого раствора $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,5} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ [3].

6. Проведены исследования зависимостей фотоэлектрических свойств сформированных поверхностно-барьерных структур $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$. Структуры характеризуются выпрямительным коэффициентом $K \sim 5$ и напряжением смещения $U \sim 5$ В, при освещении со стороны барьера обеспечивается фоторегистрация в диапазоне длин волн $\sim 400 - 1400$ нм. Относительная фоточувствительность с увеличением концентрации бинарного соединения In_2S_3 имеет тенденцию к смещению в длинноволновую область. Полученные результаты показывают, что созданные структуры могут использоваться в качестве широкополосных преобразователей оптического излучения [6, 10].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Представленные в работе результаты позволяют минимизировать применения вспомогательных реагентов при выращивании монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ за счет оптимизации и замкнутости производственного цикла. Полученные результаты могут использоваться на специализированных предприятиях по производству полупроводниковых материалов.

2. Информация о физико-химических и физических свойствах и их концентрационных зависимостях может использоваться в качестве справочных данных в области полупроводниковых материалов.

3. Результаты внедрены в учебный процесс УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в качестве материалов лекционных курсов для студентов специальностей 1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях», 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств».

4. Выращенные монокристаллы были использованы на предприятии ООО «Изовак Технологии» для формирования в вакууме барьерного слоя в структуре CIGS-полупроводников солнечного модуля методом распыления в вакууме в качестве нетоксичной альтернативы соединению CdS.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Bodnar, I. V. Band Gap of $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ Single-Crystal Alloys / I. V. Bodnar, A. A. Feschenko, V. V. Khoroshko // Semiconductors. – 2020. – Vol. 54, № 12. – P. 1611–1615.
2. Temperature dependence of $\text{AgIn}_{13}\text{S}_{20}$ single crystal band gap/ I. Bodnar, A. Feschenko, V. Khoroshko, V. Pavlovskii, I. Svitsiankou, G. Yablonskii // Exploratory Materials Sci. Research. – 2021. – Vol. 2, № 1. – P. 37–42.
3. Bodnar, I. V. Thermal Expansion and Thermal Conductivity of $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ Alloys / I. V. Bodnar, A. A. Feschenko, V. V. Khoroshko // Semiconductors. – 2021. – Vol. 55, № 2. – P. 133–136.
4. Боднар, И. В. Исследование твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ / И. В. Боднар, А. А. Фещенко, В. В. Хорошко // Вес. НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 119–126.
5. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны монокристаллов $\text{AgIn}_8\text{S}_{12.5}$ / И. В. Боднар, А. А. Фещенко, В. В. Хорошко, В. Н. Павловский, И. Е. Свитенков, Г. П. Яблонский // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55, № 8. – С. 669–672.
6. Фещенко, А. А. Поверхностно-барьерные структуры на основе твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ / А. А. Фещенко, В. В. Хорошко // Докл. НАН Беларусі. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 764–768.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Фещенко, А. А. Синтез и выращивание кристаллов соединения AgIn_5S_8 и In_2S_3 и твердых растворов / А. А. Фещенко // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 23–29 ноября 2020 года. Электроника, фотоника и молекулярная физика / Моск. физ.-техн. ин-т (нац. исслед. ун-т) ; сост.: Д. А. Диких, А. В. Шадрин ; ред. Н. Е. Кобзева. – М., 2020. – С. 172–174.
8. Feshchanka, A. System status diagrams $\text{In}_2\text{S}_3 - \text{AgIn}_5\text{S}_8$ [Electronic resource] / A. Feshchanka // Физика конденсированного состояния : материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно 22–23 апр. 2021 г. : науч. электрон. изд. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Фещенко, А. А. Способы получения объемных структур соединений группы $(\text{A}^I\text{In}_5\text{S}_8)_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ / А. А. Фещенко // Электронные системы и технологии : сб. материалов 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 19–23 апр. 2021 г. / Беларус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихачевский [и др.]. – Минск, 2021. – С. 454–457.
10. Фещенко, А. А. Формирование фоточувствительных поверхностно-барьерных структур на основе монокристаллов In_2S_3 , AgIn_5S_8 . [Электронный

ресурс] / А. А. Фещенко // Centr. Asian Sci. J. : электрон. журн. – 2021. – № 1. – Режим доступа: <https://cajournal.kz/wp-content/uploads/2021/11/Central-Asian-Scientific-Journal-vol1.pdf>. – Дата доступа: 07.02.2022.

Тезисы докладов на научных конференциях

11. Фещенко, А. А. Выращивание, структура и спектры пропускания монокристаллов $\text{AgIn}_7\text{S}_{11}$ / А. А. Фещенко // Электронные системы и технологии : 56-я науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 18–20 мая 2020 г. : сб. тез. докл. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2020. – С. 547–548.

12. Фещенко, А. А. Методика измерения плотности кристаллических образцов In_2S_3 и AgIn_5S_8 , ограниченных поверхностью неправильной формы / А. А. Фещенко // Advances in Science and Technology : XXXIX междунар. науч.-практ. конф., 15 сент. 2021 г. : сб. ст. / Науч.-издат. центр «Актуальность.РФ» [и др.]. – М., 2021. – С. 30–31.

Патент на полезную модель

13. Система для роста монокристаллов соединений группы $\text{A}^I\text{In}_5\text{S}_8$, In_2S_3 и твердых растворов на их основе $(\text{A}^I\text{In}_5\text{S}_8)_{1-x} \cdot (\text{In}_2\text{S}_3)_x$: полез. модель ВУ 12551 / И. В. Боднарь, А. А. Фещенко, В. В. Хорошко. – Оpubл. 28.02.2021.



РЭЗІЮМЭ

Фешчанка Арцём Аляксандравіч

**Вырошчванне і ўласцівасці паўправадніковых монакрышталяў
цвёрдых раствораў $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$**

Ключавыя словы: цвёрдыя растворы, сінтэз і рост крышталяў, метады Брыджмэна, крышталічная структура, аптычныя ўласцівасці, электрычныя ўласцівасці, цеплафізічныя ўласцівасці, фотаадчувальныя структуры.

Мэта працы: усталяваць тэмпературна-часавыя рэжымы сінтэзу і вырошчвання гамагенных і аптычна аднастайных монакрышталяў цвёрдых раствораў $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$, а таксама заканамернасці змены структурных, электрычных, аптычных, цеплафізічных уласцівасцяў у залежнасці ад складу цвёрдага раствора, фарміраванне фотаадчувальных павярхоўна-бар'ерных структур і даследаванне іх фотаэлектрычных уласцівасцей з мэтай выкарыстання атрыманых вынікаў для ўдасканалення элементаў канструкцый прыбораў электроннай тэхнікі.

Метады даследавання: мікрарэнтгенаспектральны, рэнтгенафазавы, дыферэнцыяльна-тэрмічны і спектраметрычны аналіз, дылатаметрычны і пікнаметрычны метады, чатырохзондавы метады.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны тэмпературна-часовыя рэжымы вырошчвання монакрышталяў цвёрдых раствораў $(\text{In}_2\text{S}_3)_x (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ (дыяметр ~ 16, даўжыня ~ 40 мм) накіраванай крышталізацыяй расплаву (метад Брыджмэна) з ужываннем вібрацыйнага мяшання. Устаноўлены залежнасці фізіка-хімічных і фізічных уласцівасцей ад саставу цвёрдага раствора. Створаны фотаадчувальныя структуры $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ і даследаваны іх фотаэлектрычныя ўласцівасці.

Ступень выкарыстання і вобласць ужывання вынікаў: прадстаўленыя навуковыя вынікі дысертацыйнай работы могуць выкарыстоўвацца на прадпрыемствах па вытворчасці складаных паўправадніковых матэрыялаў, а таксама ў якасці даведачных даных паўправадніковых матэрыялаў пры разліку параметраў і мадэляванні прыбораў электроннай тэхнікі. Атрыманыя вынікі дысертацыі выкарыстаны на прадпрыемстве ТАА «Ізавак Тэхналогіі» у працэсе выканання праекта па распрацоўцы тэхналогіі вытворчасці CIGS сонечных элементаў метадам распылення ў вакууме, а таксама ў навучальным працэсе УА «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў якасці матэрыялаў лекцыйнага курсу для студэнтаў спецыяльнасцяў 1-98 01 02 «Абарона інфармацыі ў тэлекамунікацыях», 1-39 02 01 «Мадэляванне і камп'ютэрнае праектаванне радыёэлектронных сродкаў».

РЕЗЮМЕ

Фещенко Артем Александрович

**Выращивание и свойства полупроводниковых монокристаллов
твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$**

Ключевые слова: твердые растворы, синтез и рост кристаллов, метод Бриджмена, кристаллическая структура, оптические свойства, электрические свойства, теплофизические свойства, фоточувствительные структуры.

Цель работы: установить температурно-временные режимы синтеза и выращивания гомогенных и оптически однородных монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$, а также закономерности изменения структурных, электрических, оптических, теплофизических свойств в зависимости от состава твердого раствора, формирование фоточувствительных поверхностно-барьерных структур и исследование их фотоэлектрических свойств с целью использования полученных результатов для усовершенствования элементов конструкций приборов электронной техники.

Методы исследования: микрорентгеноспектральный, рентгенофазовый, дифференциально-термический и спектрометрический анализ, дилатометрический и пикнометрический метод, четырехзондовый метод.

Полученные результаты и их новизна: разработаны температурно-временные режимы выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ (диаметр ~ 16 , длина ~ 40 мм) направленной кристаллизацией расплава (метод Бриджмена) с применением вибрационного перемешивания. Установлены зависимости физико-химических и физических свойств от состава твердого раствора. Созданы фоточувствительные структуры $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ и исследованы их фотоэлектрические свойства.

Степень использования и область применения результатов: представленные научные результаты диссертационной работы могут использоваться на предприятиях по производству сложных полупроводниковых материалов, а также в качестве справочных данных полупроводниковых материалов при расчете параметров и моделировании приборов электронной техники. Полученные результаты диссертации использованы на предприятии ООО «Изовак Технологии» в процессе выполнения проекта по разработке технологии производства CIGS солнечных элементов методом распыления в вакууме, а также в учебном процессе УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в качестве материалов лекционного курса для студентов специальностей 1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях», 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств».

SUMMARY

Feshchanka Artsiom Alexandrovich

**Growing and properties of semiconductor single crystals
solid solutions $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$**

Key words: solid solutions, crystal synthesis and growth, Bridgman method, crystal structure, optical properties, electrical properties, thermophysical properties, photosensitive structures.

Purpose of the work: to establish the temperature-time regimes for the synthesis and growth of homogeneous and optically homogeneous single crystals of solid solutions $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ the formation of photosensitive surface-barrier structures and the study of their photoelectric properties, with the aim of using the results obtained to improve existing and create new electronic devices.

Research methods: micro-X-ray spectral, X-ray phase, differential thermal and spectrometric analysis, dilatometric and pycnometric method, four-probe method.

The results obtained and their novelty: temperature-time regimes for the synthesis and growth of crystals have been developed, which made it possible for the first time to obtain large-size single crystals of solid solutions $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ with a diameter of ~ 16 mm and a length of ~ 40 mm. Dependences of physical and physicochemical properties on the composition of the solid solution have been established. Photosensitive structures $\text{In}/(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ have been created and their photoelectric properties have been investigated.

The degree of use and scope of the results: the presented scientific results of the dissertation work can be used at enterprises for the production of complex semiconductor materials, as well as as reference data for semiconductor materials in the calculation of parameters and modeling of electronic devices. The obtained results of the dissertation were used at the enterprise Izovac Technologies LLC in the process of implementing a project to develop a technology for the production of CIGS solar cells by vacuum sputtering, as well as in the educational process of the educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» as materials of a lecture course for students of specialties 1-98 01 02 «Information security in telecommunications», 1-39 02 01 «Modeling and computer design radioelectronic means».

Научное издание

Фещенко Артем Александрович

**ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Подписано в печать 14.04.2022. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,4. Тираж 60 экз. Заказ 50.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 23.04.2014

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск