

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592

ЧАН
Бинь Тхан

**ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА
МОНОКРИСТАЛЛОВ ТРОЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8
И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$**

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 2019

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: **Мурашкевич Анна Николаевна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Голосов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра 9.1 научно-исследовательской части учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б.И.Степанова Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «23» января 2019 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 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 « » декабря 2019 г.

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



И. В. Дайняк

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большую актуальность приобретает вопрос о создании материалов, которые одновременно обладали бы магнитными и полупроводниковыми свойствами. Все известные вещества обладают той или иной восприимчивостью во внешних магнитных полях. Однако «магнитными» называют лишь те вещества, в которых хотя бы часть атомов или ионов даже в отсутствие внешнего магнитного поля обладает неспаренными электронными спинами, несмотря на наличие механизмов химической связи, характерных для кристаллических состояний вещества. Введение атомов переходных элементов с незаполненными $3d$ -оболочками в целом ряде полупроводниковых материалов приводит к появлению новых, уникальных физических свойств этих материалов, сочетающих в себе как полупроводниковые, так и магнитные свойства. Среди таких свойств в магнитных полупроводниках следует отметить соединения $A^{III}B^V$, содержащих марганец, такие явления, как спиновая инжекция, индуцированный носителями заряда ферромагнетизм, а также оптически контролируемый ферромагнетизм. Преимущества устройств спинтроники: потребляют меньше энергии, не вызывают помех, как заряды, работают быстрее, потому что это не требует времени для переноса заряда, только время обращения спина.

Диссертация посвящена вопросам выращивания монокристаллов и изучению физико-химических и физических свойств соединений $MnIn_2S_4$, $AgIn_5S_8$ и твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x} \cdot (AgIn_5S_8)_x$. Сведения о твердых растворах $(MnIn_2S_4)_{1-x} \cdot (AgIn_5S_8)_x$ в литературе отсутствуют, при этом имеются данные о соединениях $MnIn_2S_4$, $AgIn_5S_8$ и о твердых растворах с другим компонентным составом в работах других авторов (И. В. Боднарь, Н. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, Т. Omiya, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь, М. А. Осипов, Т. М. Алрекаби, Т. Г. Баругу и т. д.), а также в диссертации М. А. М. Жафара, посвященной твердым растворам $(FeIn_2S_4)_{1-x} \cdot (CuIn_5S_8)_x$.

Тройное соединение относится к магнитным полупроводникам $MnIn_2S_4$ и является перспективным материалом создания на его основе лазеров, модуляторов света и других функциональных устройств, управляемых магнитным полем, $AgIn_5S_8$ относится к дефектным полупроводникам с концентрацией вакансий в катионной подрешетке, равной $\sim 25\%$. Это соединение имеет n -тип проводимости, обладает высокой радиационной стойкостью и не испытывает влияния со стороны посторонних атомов, т. е. примеси являются электрически неактивными. Кристаллы $AgIn_5S_8$ перспективны для создания фотопреобразователей солнечного излучения,

электрооптических модуляторов и других устройств микро- и наноэлектроники.

Комплексные исследования и поиск процессов взаимной растворимости на основе тройных соединений MnIn_2S_4 и AgIn_5S_8 открывают новые возможности увеличения диапазона и точности воспроизведения необходимых значений параметров таких материалов. Однако до настоящего времени поиск и обнаружение растворимости в таких материалах оставались практически не тронутыми и, что особенно важно, в плане выяснения детальных зависимостей фундаментальных свойств новых фаз от их атомного состава и обеспечения в них условий, способствующих решению важных прикладных задач путем привлечения новых моделей самоорганизации. Настоящая работа направлена на решение проблем, таких как: поиск и изучение растворимости в системе $\text{MnIn}_2\text{S}_4\text{-AgIn}_5\text{S}_8$; выращивание монокристаллов твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ в области составов $x = 0\text{-}1,0$; определение состава, структуры, плотности, микротвердости полученных монокристаллов; построение диаграммы состояния системы $\text{AgIn}_5\text{S}_8\text{-MnIn}_2\text{S}_4$; изучение оптических, магнитных свойств и теплового расширения в широком интервале температур, а также создание поверхностно-барьерных структур на основе выращенных монокристаллов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь с крупными научными программами, темами

Диссертационная работа выполнялась на кафедре защиты информации БГУИР и в НИЛ 5.1 БГУИР «Монокристаллы сложных полупроводниковых соединений», в том числе с участием соискателя в научных исследованиях по теме «Выращивание монокристаллов тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$: исследование оптических, электрических и магнитных свойств» (№ ГР 20163894), финансируемых Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (2016–2018 гг.).

Тема диссертационной работы соответствует Приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденным Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190 (направления 2 «Химический синтез и продукты», 8 «Многофункциональные материалы и технологии»).

Цель и задачи исследования

Цель исследования – экспериментально определить оптимальные температурные режимы синтеза и выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, определить состав и структуру полученных кристаллов, установить основные закономерности в изменении физико-химических, оптических, тепловых и магнитных свойств полученных монокристаллов, построение диаграммы состояния системы AgIn_5S_8 – MnIn_2S_4 , изучение оптических, магнитных свойств и теплового расширения в широком интервале температур, а также создание поверхностно-барьерных структур на основе выращенных монокристаллов.

Для достижения поставленной цели работа проводилась в несколько этапов, на каждом из которых решались следующие задачи.

Задачи исследования:

1. Двухтемпературным методом синтезировать кристаллы тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$.
2. Разработать оптимальные температурные режимы выращивания монокристаллов указанных соединений и их твердых растворов вертикальным методом Бриджмена.
3. Определить состав, структуру, параметры элементарной ячейки, плотность, микротвердость, температуры фазовых превращений и построить диаграмму состояния системы AgIn_5S_8 – MnIn_2S_4 .
4. Установить основные закономерности в изменении ширины запрещенной зоны, тепловых и магнитных свойств полученных монокристаллов.
5. На основе выращенных монокристаллов создать поверхностно-барьерные структуры и исследовать их свойства.

Научная новизна

Представлены результаты исследования физико-химических и физических свойств впервые выращенных монокристаллов твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ направленной кристаллизацией расплава (вертикальный метод Бриджмена).

В работе:

- экспериментально обоснованы температурные режимы синтеза и выращивания монокристаллов тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, позволяющие получать однородные монокристаллы диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 40 мм;
- методом микрорентгеноспектрального анализа определен состав

выращенных монокристаллов, их кристаллическая структура, параметры элементарной ячейки (a), плотность ($d_{\text{пикн}}$), температуры фазовых превращений и построена диаграмма состояния системы $\text{MnIn}_2\text{S}_4\text{--AgIn}_5\text{S}_8$. Установлено, что параметры элементарной ячейки и плотность с составом x изменяются линейно (a – от $10,722 \pm 0,005 \text{ \AA}$ для MnIn_2S_4 до $10,827 \pm 0,005 \text{ \AA}$ для AgIn_5S_8 ; $d_{\text{пикн}}$ – от $4,36 \text{ г/см}^3$ для MnIn_2S_4 до $4,84 \text{ г/см}^3$ для AgIn_5S_8), микротвердость с максимумом для состава $x = 0,20$, диаграмма состояния системы $\text{MnIn}_2\text{S}_4\text{--AgIn}_5\text{S}_8$ характеризуется небольшим интервалом кристаллизации и ее можно отнести к первому типу по классификации Розебома;

– по спектрам пропускания определена ширина запрещенной зоны (E_g) выращенных монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ и построена ее концентрационная зависимость. Установлено, что E_g с составом x изменяется от $1,793 \text{ эВ}$ для AgIn_5S_8 до $2,092 \text{ эВ}$ для состава с $x = 0,4$, после чего уменьшается до $1,968 \text{ эВ}$ для MnIn_2S_4 . Для твердого раствора $\text{Mn}_{0,5}\text{Ag}_{0,5}\text{In}_{3,5}\text{S}_{6,0}$ в интервале температур $10\text{--}320 \text{ К}$ проведен расчет зависимости $E_g(x)$ в приближениях моделей Ван-Бергштрессера и Хилла–Ричардсона. Показано удовлетворительное согласие между экспериментальными и расчетными величинами;

– дилатометрическим методом измерено тепловое расширение тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, рассчитаны коэффициенты теплового расширения, температуры Дебая и среднеквадратичные динамические смещения атомов. Установлено, что температуры Дебая с ростом температуры уменьшаются, а среднеквадратичные динамические смещения атомов увеличиваются, что свидетельствует о том, что с ростом температуры химические связи между атомами в указанных монокристаллах значительно ослабевают;

– в интервале температур $2\text{--}300 \text{ К}$ измерена магнитная восприимчивость монокристаллов соединений MnIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$. Установлено, что указанные монокристаллы являются парамагнетиками во всем исследованном интервале температур;

– на основе монокристаллов твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ созданы поверхностно-барьерные структуры и исследованы их фотоэлектрические свойства.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально обоснованные температурные режимы синтеза (двухтемпературный метод) – температура зоны расплава $1380\text{--}1420 \text{ К}$, низкотемпературной зоны – 950 К и выращивания монокристаллов (метод

Бриджмена – температура расплава 1380–1420 К, кристаллизация расплава со скоростью ~ 2 К/ч) тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, которые позволяют получать однородные монокристаллы диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 40 мм.

2. Установленные фундаментальные физико-химические и физические параметры монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ (параметры элементарной ячейки, плотность, микротвердость, температуры фазовых превращений и диаграмма состояния системы AgIn_5S_8 – MnIn_2S_4 , ширина запрещенной зоны (E_g), температурная зависимость E_g для твердого раствора $\text{Mn}_{0,5}\text{Ag}_{0,5}\text{In}_{3,5}\text{S}_{6,0}$ в интервале температур 10–320 К, коэффициенты теплового расширения, температуры Дебая, среднеквадратичные динамические смещения атомов, магнитная восприимчивость), что позволяет полученные новые справочные данные использовать в области полупроводникового материаловедения, а также для проектирования приборов микро – и наноэлектроники.

3. Поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$ и $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ обладают спектральной фоточувствительностью в диапазоне 1,0–3,5 эВ и вольтовой фоточувствительностью ~ 120 В/Вт, что позволяет использовать их в качестве широкополосных фотопреобразователей солнечного излучения.

Личный вклад соискателя ученой степени

В диссертационной работе изложены результаты исследований, полученных соискателем лично или в которых соискатель принимал участие в проведении эксперимента, обработке результатов, их обобщении и трактовке, написании статей. Постановку цели и задач исследований, контроль за выращиванием монокристаллов соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, выбор методов исследования, анализ и интерпретацию полученных результатов осуществлял научный руководитель д-р химич. наук, проф. И. В. Боднарь. Основным соавтором работ является д-р химич. наук, проф. И. В. Боднарь.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 55-я Юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, Республика Беларусь, 2019), 17-я Белорусско-российская научно-техническая

конференция «Технические средства защиты информации» (Минск, Республика Беларусь, 2019).

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе в БГУИР на кафедрах защиты информации и проектирования информационно-компьютерных систем, а также при выполнении гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 8 научных работах общим объемом 2,0 авторского листа. Из них 6 статей объемом 1,9 авторского листа в рецензируемых научных журналах в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 2 тезисов докладов на научных конференциях объемом 0,1 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 97 страниц, из них основной текст – 49 страниц, 44 иллюстрации на 21 странице, 18 таблиц на 13 страницах, библиографический список из 86 источников на 6 страницах, список публикаций соискателя из 8 наименований на 1 странице, 6 приложений на 7 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и **общей характеристике работы** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический обзор ранее опубликованных работ по тройным соединениям $MnIn_2S_4$ и $AgIn_5S_8$, связанных с темой диссертационной работы. Представлены основные характеристики кристаллической структуры указанных соединений, а также методы синтеза и выращивания кристаллов. Результаты исследований физико-химических и физических свойств тройных соединений $MnIn_2S_4$ и $AgIn_5S_8$ показали, что данные различных авторов существенно различаются между собой, что связано, вероятнее всего, с тем, что большинство измерений

проводилось на поликристаллических образцах. Отсутствие достоверной информации о методах выращивания монокристаллов ставит задачу разработки оптимальных температурных режимов выращивания однородных монокристаллов как тройных соединений MnIn_2S_4 и AgIn_5S_8 , так и твердых растворов на их основе.

Во **второй главе** представлены методы синтеза (двухтемпературный метод) и выращивания монокристаллов (вертикальный метод Бриджмена) тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов на их основе.

Монокристаллы указанных соединений и их твердых растворов получали в два этапа. Предварительно тройные соединения MnIn_2S_4 и AgIn_5S_8 и твердые растворы $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ синтезировали двухтемпературным методом. Металлические компоненты загружали в кварцевую лодочку, которую располагали в одном конце кварцевой ампулы, в противоположном ее конце находилась сера, взятая с избытком от стехиометрии, необходимым для создания давления ее паров над расплавом ~ 2 атм. После вакуумирования ампулы ее отпаивали от вакуумной системы и располагали в горизонтальной двухзонной печи. Температуру «высокотемпературной» зоны, где находилась лодочка с металлическими компонентами, устанавливали 1380–1420 К (в зависимости от соединения или состава твердого раствора), температуру «холодной» зоны, где находилась сера, повышали со скоростью ~ 100 К/ч до 700 К и выдерживали в течение 2 ч (для протекания реакции между металлическими компонентами и парами серы). Для более полного протекания этой реакции температуру зоны, содержащей серу, с такой же скоростью повышали до 950 К с повторной выдержкой в течение 1 ч. По истечении указанного времени температуру «высокотемпературной» зоны понижали со скоростью 50 К/ч до 800 К и печь отключали от сети [1–4].

Синтезированные слитки измельчали и перегружали в двойные кварцевые ампулы, которые для уменьшения количества центров кристаллизации имели небольшую конусность в области расплава и заканчивались цилиндрическим капилляром для формирования монокристаллической затравки. После вакуумирования внутренней ампулы ее помещали во вторую кварцевую ампулу большего диаметра, которую также откачивали. К наружной ампуле снизу приваривали кварцевый стержень, используемый в качестве держателя, который закрепляли в вибраторе. Выращивание монокристаллов проводили в вертикальной однозонной печи.

Температуру печи повышали со скоростью 250 К/ч до ~ 1380 –1420 К и для гомогенизации расплава выдерживали при этой температуре 2 ч с включением вибрации. После указанного времени выдержки проводили

направленную кристаллизацию расплава, понижая температуру печи со скоростью ~ 2 К/ч до полного затвердевания расплава. Для гомогенизации полученных слитков их отжигали при температуре 1170 К в течение 400 ч. Выращенные в таких условиях монокристаллы MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов на их основе имели диаметр ~ 16 мм и длину ~ 40 мм, были однородными и гомогенными, что было установлено методами микрорентгеноспектрального и рентгеновского анализов [1–4].

В **третьей главе** приведено описание использованных методик исследования. Состав выращенных монокристаллов определяли методом микрорентгеноспектрального анализа. Измерения проводили на установке “Самса – SX 100”, дифрактограммы записывали на рентгеновском аппарате ДРОН–3М в CuK_α -излучении с графитовым монохроматором, плотность измеряли пикнометрическим методом, микротвердость определяли по методу Кнупа на микротвердомере «LEICA VMHTMOT», температуры фазовых превращений определяли методом дифференциального термического анализа (ДТА), ширину запрещенной зоны определяли по спектрам пропускания в области края собственного поглощения, тепловое расширение измеряли на кварцевом dilatометре, магнитные свойства (в интервале температур 4–300 К и полях 0–10 Тл) исследовали на установке Liquid Helium Free High Field Measurement System by Cryogenic Ltd, UK.

В **четвертой главе** изложены результаты исследования физико-химических и физических свойств тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$.

Методом микрорентгеноспектрального анализа установлено, что содержание компонентов в выращенных монокристаллах удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте [3].

Проведенные рентгеновские исследования показали, что на дифрактограммах как соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 , так и твердых растворах на их основе присутствуют рефлексы отражения, характерные для кубической структуры шпинели. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов, равны: $a = 10,722 \pm 0,005$ Å для MnIn_2S_4 и $a = 10,827 \pm 0,005$ Å для AgIn_5S_8 . С составом x изменение указанных параметров осуществляется линейно (в соответствии с законом Вегарда) [3] и описывается следующим выражением:

$$a = 10,722 + 0,105x. \quad (1)$$

Измеренная пикнометрическая плотность и рассчитанная рентгеновская, как и параметр a , изменяются с составом x линейно и описываются выражением

$$d_{\text{пикн}} = 4,36 + 0,48x, d_{\text{рент}} = 4,43 + 0,45x. \quad (2)$$

Микротвердость с составом x для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ изменяется с максимумом при $x = 0,20$, положение которого сдвинуто в сторону соединения с большей микротвердостью [3].

Результаты ДТА показали, что на термограммах как тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 , так и твердых растворах на их основе присутствует один тепловой эффект, который для исходных соединений соответствует температуре плавления, для твердых растворов – точкам солидуса и ликвидуса. По данным ДТА построена диаграмма состояния системы AgIn_5S_8 – MnIn_2S_4 (рисунок 1).

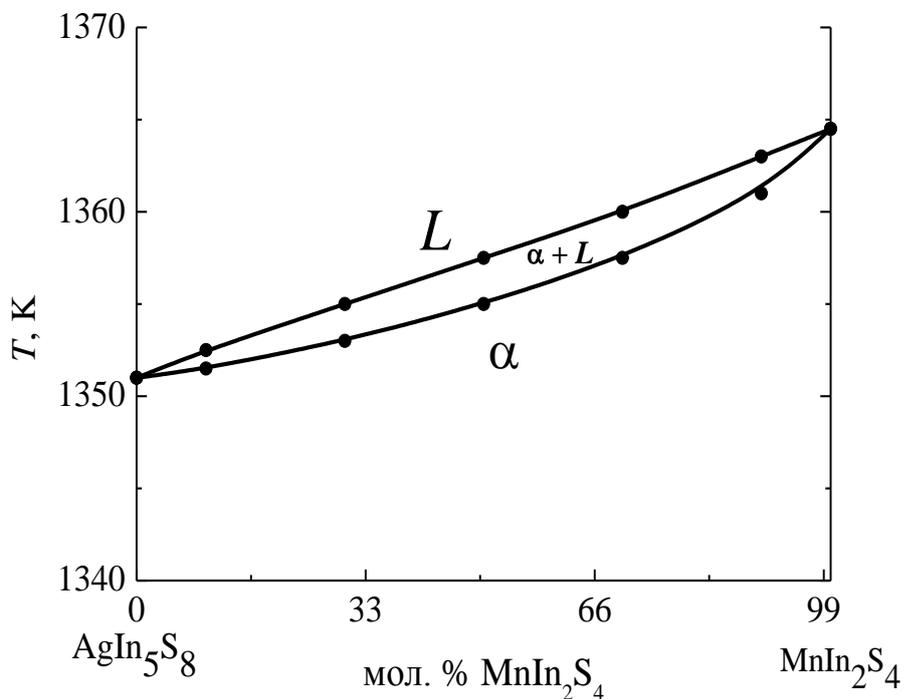


Рисунок 1. – Диаграмма состояния системы AgIn_5S_8 – MnIn_2S_4

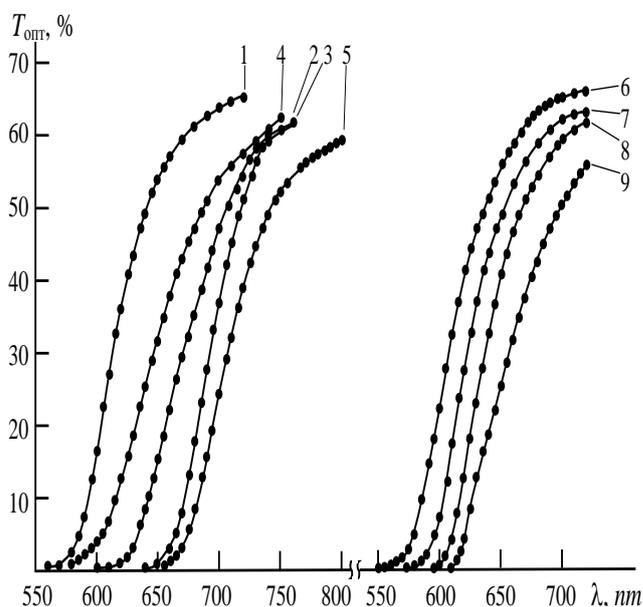
Видно, что приведенная диаграмма состояния характеризуется неограниченной растворимостью как в твердом, так и в жидком состояниях кривые ликвидуса и солидуса вогнуты вниз к оси абсцисс [3].

Спектры пропускания монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ в области края собственного поглощения представлены на рисунке 2.

Из зарегистрированных спектров пропускания рассчитывали коэффициент поглощения (α) по формуле, учитывающей многократное внутренне отражение в плоскопараллельном образце. Ширину запрещенной зоны (E_g) определяли путем экстраполяции прямолинейных участков зависимости $(\alpha \cdot \hbar\omega)^2$ от энергии фотона ($\hbar\omega$) до пересечения с осью абсцисс.

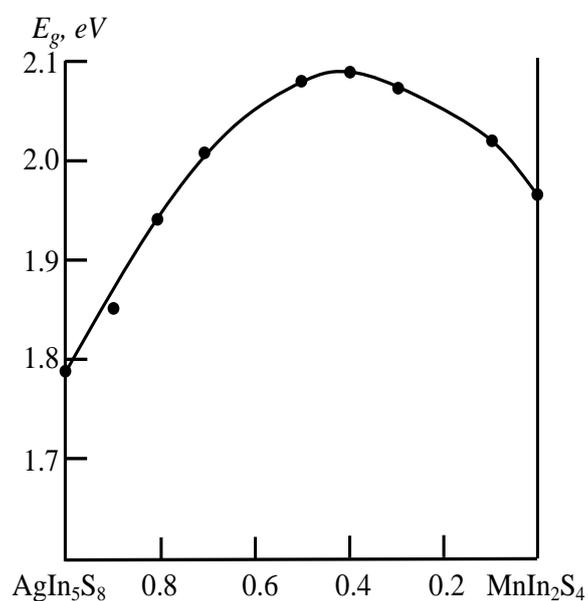
Концентрационная зависимость ширины запрещенной зоны для

твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ представлена на рисунке 3. Видно, что E_g с составом x сначала возрастает от 1,793 эВ для соединения AgIn_5S_8 до 2,092 эВ для состава $x = 0,6$, после чего уменьшается до 1,968 эВ для соединения MnIn_2S_4 .



1 – $x = 1,0$; 2 – $x = 0,9$; 3 – $x = 0,8$; 4 – $x = 0,7$;
5 – $x = 0,5$; 6 – $x = 0,4$; 7 – $x = 0,0$; 8 – $x = 0,2$; 9 – $x = 0,3$

Рисунок 2. – Спектры пропускания
монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8
и твердых растворов
 $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$



точки – эксперимент;

сплошная линия – расчет

Рисунок 3. – Концентрационная
зависимость ширины запрещенной
зоны для твердых растворов
 $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

Такое поведение ширины запрещенной зоны можно объяснить, по-видимому, с перестройкой кристаллической решетки в твердых растворах [1, 2].

Представленная концентрационная зависимость E_g для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ при $T = 300$ К описывается следующим выражением:

$$E_g^{300}(x) = 1,793 + 0,973x - 0,798x^2. \quad (3)$$

Спектры пропускания монокристаллов твердого раствора $\text{Mn}_{0,5}\text{Ag}_{0,5}\text{In}_{3,5}\text{S}_{6,0}$ в интервале температур $T = 10 - 320$ К представлены на рисунке 4. Видно, что с понижением температуры указанные спектры смещаются в коротковолновую область.

На рисунке 5 представлены температурные зависимости $E_g(T)$. Видно, что с увеличением температуры E_g уменьшается, что характерно для полупроводниковых материалов [6].

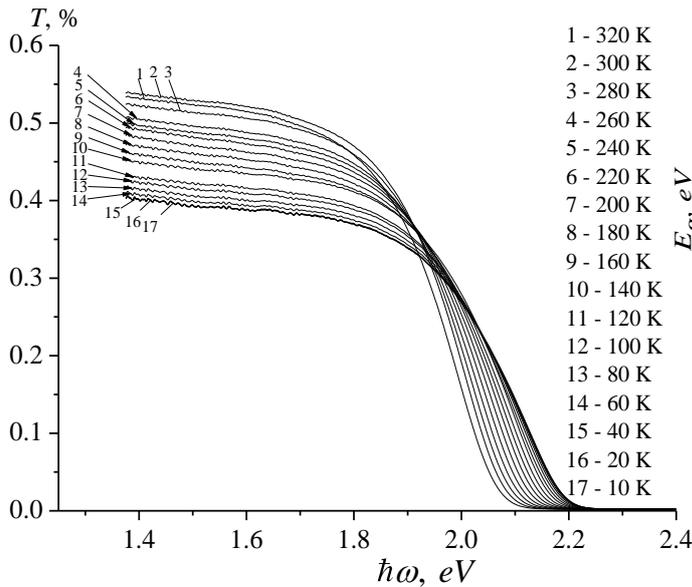


Рисунок 4. – Спектры пропускания монокристаллов $\text{Mn}_{0,5}\text{Ag}_{0,5}\text{In}_{3,5}\text{S}_{6,0}$

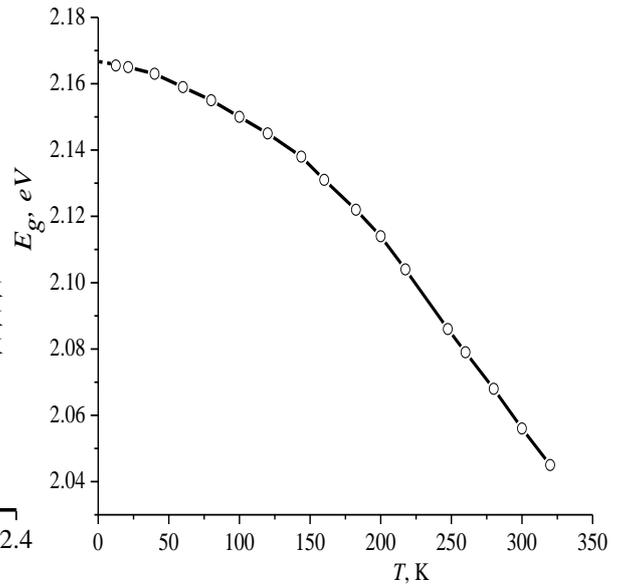


Рисунок 5. – Температурная зависимость E_g для монокристаллов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$

Температурные зависимости коэффициентов теплового расширения MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ представлены на рисунке 6. Из рисунка 6 видно, что α_L в интервале температур 80–250 К очень слабо изменяется с ростом температуры как для соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 , так и для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$. Выше температуры 250 К наблюдается резкий рост коэффициента теплового расширения вплоть до 400 К, после чего влияние температуры на величину α_L не оказывает. Такое поведение α_L связано, по-видимому, с изменением степени ангармонизма тепловых колебаний атомов в указанных кристаллах.

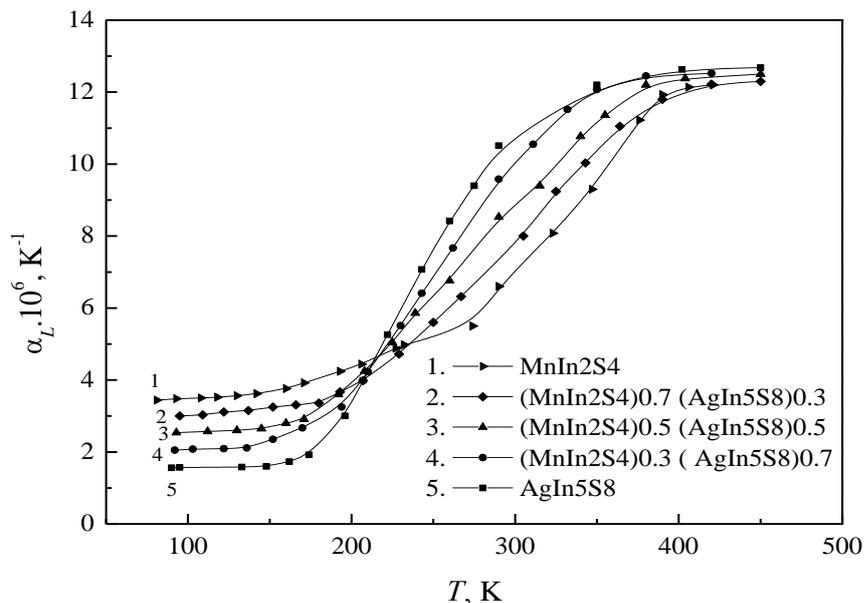


Рисунок 6. – Температурные зависимости коэффициента теплового расширения монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

На рисунке 7 представлены изотермы концентрационных зависимостей α_L при различных температурах. Видно, что указанные зависимости $\alpha_L(x)$ при различных температурах имеют линейный характер.

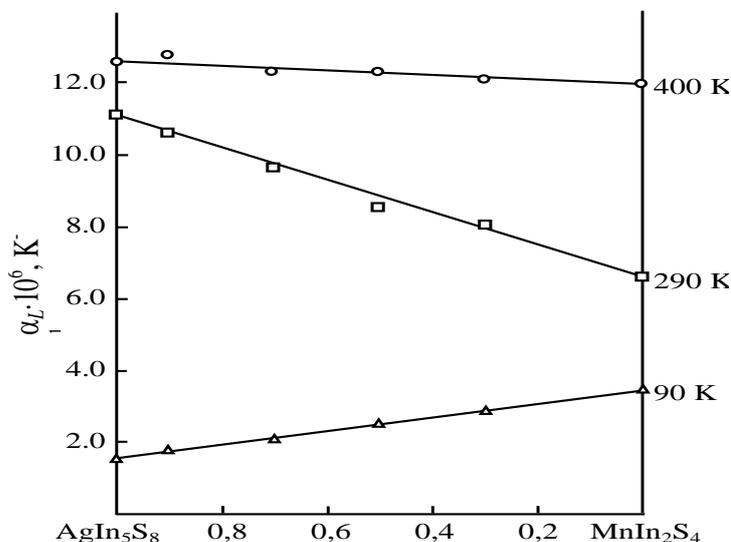


Рисунок 7. – Изотермы концентрационных зависимостей α_L для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

Полученные значения коэффициентов теплового расширения были использованы для расчета температуры Дебая (Θ_D) и среднеквадратичных динамических смещений атомов ($\sqrt{u^2}$). Установлено, что с повышением температуры значения Θ_D уменьшаются, а $\sqrt{u^2}$ увеличиваются. Такое поведение указанных величин свидетельствует о том, что с ростом температуры химические связи между атомами в указанных монокристаллах значительно ослабевают [4].

На рисунке 8 представлены результаты магнитных измерений монокристаллов тройного соединения MnIn_2S_4 .

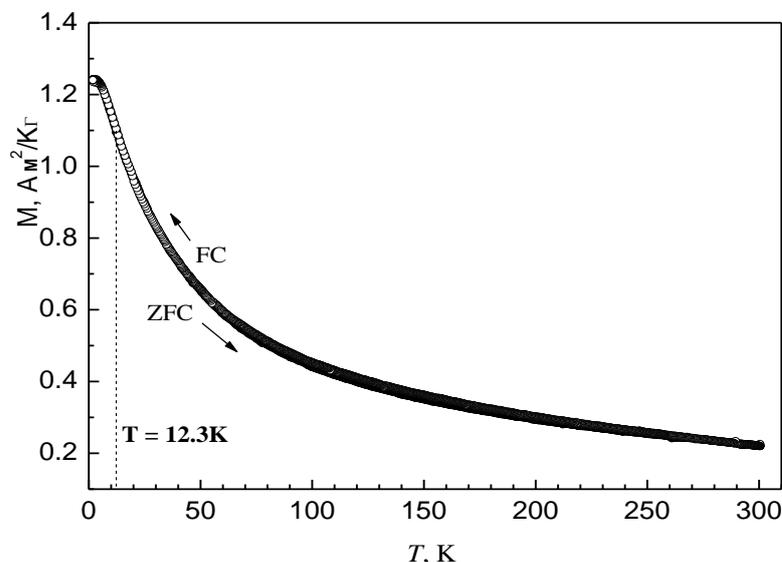
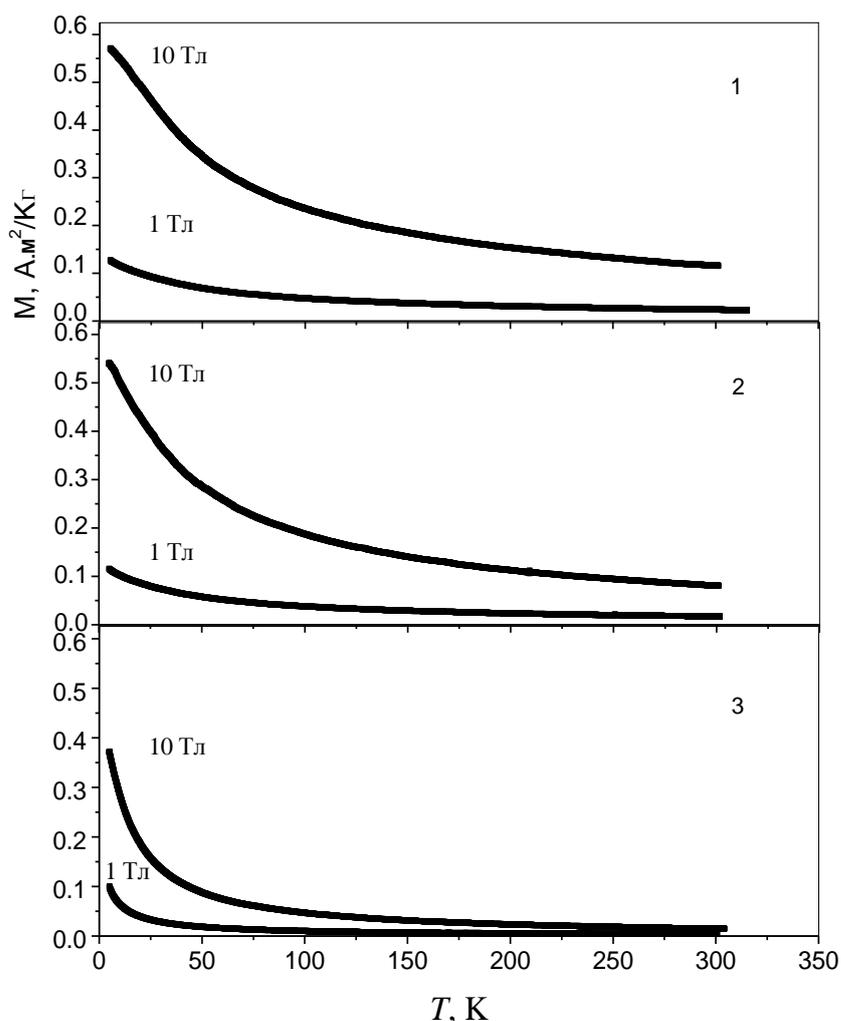


Рисунок 8. – Температурная зависимость ZFC (черные символы) и FC (белые символы) удельного магнитного момента в поле 10 Тл для монокристаллов MnIn_2S_4

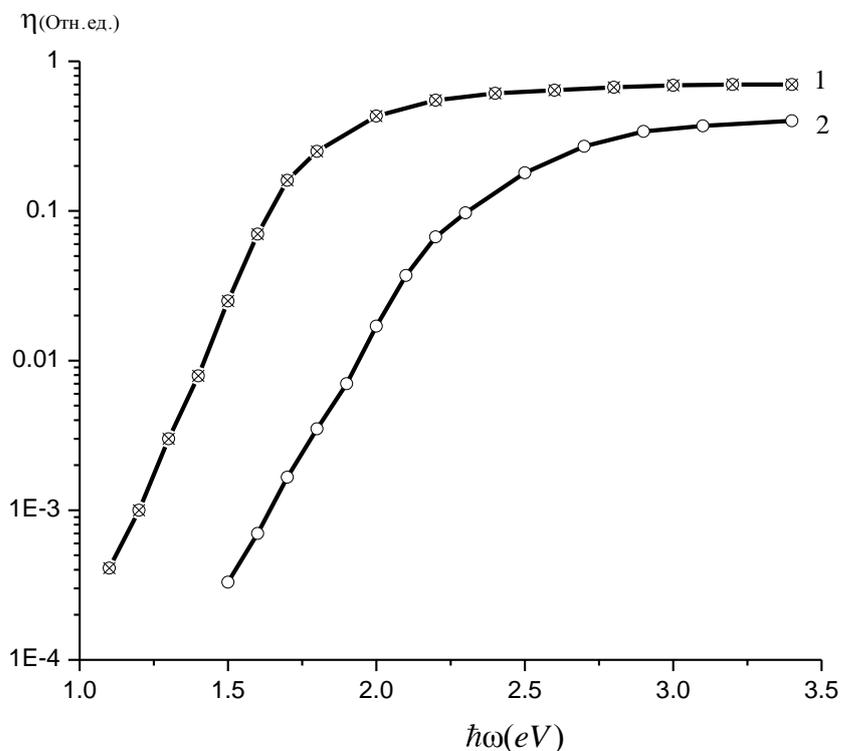
Видно, что удельный магнитный момент кристаллов монотонно возрастает с уменьшением температуры. Во внешнем магнитном поле 10 Тл температура магнитного упорядочения $T_{\text{упор}}$ составляет ~ 12.3 К. Установлено отсутствие различий при измерении FC -кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, что наблюдается при магнитных переходах II-рода.

Аналогичные измерения были проведены и для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ (рисунок 9). Результаты измерений показали, что исследуемые кристаллы твердых растворов является парамагнетиками во всем исследованном интервале температур. Из рисунка 9 видно, что температурные зависимости удельного магнитного момента в полях 1 и 10 Тл для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ как для ZFC , так и для FC кривых уменьшаются с понижением температуры. При измерении FC -кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, какие-либо различия отсутствуют [5,7].



1 – $\text{Mn}_{0,9}\text{Ag}_{0,1}\text{In}_{2,3}\text{S}_{4,4}$; 2 – $\text{Mn}_{0,7}\text{Ag}_{0,3}\text{In}_{2,9}\text{S}_{5,2}$; 3 – $\text{Mn}_{0,2}\text{Ag}_{0,8}\text{In}_{4,4}\text{S}_{7,2}$
 Рисунок 9. – Температурная зависимость удельного магнитного момента в полях 1 и 10 Тл монокристаллов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

На основе монокристаллов сформированы фоточувствительные поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ и $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ (рисунок 10). Структуры получали вакуумным термическим испарением металлического индия. Омический контакт создавался нанесением серебряной пасты.



1 – $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$; 2 – $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$
 Рисунок 10. – Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования структур $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ и $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$

Исследования полученных структур показали, что при их освещении воспроизводимо проявляется фотовольтаический эффект, знак которого согласуется с направлением выпрямления, а изменения в локализации светового зонда на фотоприемной поверхности таких структур, энергии падающих фотонов и интенсивности освещения не влияют на знак фотонапряжения. Эти результаты служат основанием для того, чтобы наблюдаемый фотовольтаический эффект приписать образованию энергетического барьера на контакте металла (In) с монокристаллами. Из рисунка 10 также следует, что в условиях освещения структур со стороны барьерных пленок индия быстрый рост η наступает при $\hbar\omega > 1$ эВ и этот рост практически одинаков для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ и $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$. Из рисунка 10 также видно, что спектры фотопреобразования характеризуются практически одинаковым по структуре контуром и обеспечивают непрерывно возрастающую с ростом энергии

фотонов фоточувствительность в весьма широком спектральном диапазоне (от 1,1 до 3,5 эВ) [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Методом направленной кристаллизации (вертикальный вариант метода Бриджмена) впервые выращены однородные монокристаллы твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 40 мм. Определен состав полученных монокристаллов, параметры элементарной ячейки, плотность, микротвердость, температуры фазовых превращений и построена диаграмма состояния системы $\text{AgIn}_5\text{S}_8\text{--MnIn}_2\text{S}_4$ [1–3].

2. По спектрам пропускания в области края собственного поглощения определена ширина запрещенной зоны монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ и построена ее концентрационная зависимость. Установлено, что E_g с составом изменяется с максимумом для $x = 0,4$ [1, 2]. Для твердого раствора $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ интервале температур 10–320 К измерены спектры пропускания, определена ширина запрещенной зоны и построена ее температурная зависимость. Установлено, что E_g с ростом температуры уменьшается [6]. Дилатометрическим методом исследовано тепловое расширение монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов на их основе и рассчитаны коэффициенты теплового расширения. Показано, что α_L с составом x при различных температурах имеют линейный характер. По данным α_L рассчитаны температуры Дебая и среднеквадратичные динамические смещения атомов. Установлено, что температуры Дебая с ростом температуры уменьшаются, а среднеквадратичные динамические смещения атомов увеличиваются, что свидетельствует об ослаблении химической связи в твердых растворах $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ [1, 4].

3. В интервале температур $T = 4\text{--}300$ К измерены магнитные свойства твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$. Установлено, что указанные твердые растворы являются парамагнетиками во всем исследованном интервале температур [5, 7].

4. На основе монокристаллов твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ и $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$ сформированы фоточувствительные поверхностно-барьерные структуры и исследованы их фотоэлектрические свойства. Показано, что указанные структуры могут быть использованы в качестве широкополосных преобразователей солнечного излучения [8].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

1. Разработанные оптимальные температурные режимы синтеза (двухтемпературный метод) и выращивания однородных монокристаллов (вертикальный метод Бриджмена) тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов на их основе диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 40 мм могут использоваться в организациях, которые занимаются синтезом и выращиванием монокристаллов сложных полупроводниковых соединений и твердых растворов на их основе [1–3].

2. Результаты исследования физико-химических, оптических, тепловых и магнитных свойств имеют фундаментальный характер и могут использоваться как справочные данные при расчете и конструировании приборов микро- и наноэлектроники [1–8].

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре защиты информации и кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по дисциплинам «Прикладная химия», «Датчики электронных систем безопасности», «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Боднар, И. В. Монокристаллы $Mn_{0,1}Ag_{0,9}In_{4,7}S_{7,6}$: кристаллическая структура, ширина запрещенной зоны и тепловое расширение / И. В. Боднар, Бинь Тхан Чан // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 8. – С. 1071–1074.
2. Боднар, И. В. Кристаллическая структура и ширина запрещенной зоны твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x} \cdot (AgIn_5S_8)_x$ / И. В. Боднар, Бинь Тхан Чан // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 8. – С. 958–962.
3. Боднар, И. В. Исследование системы $MnIn_2S_4-AgIn_5S_8$ / И. В. Боднар, Бинь Тхан Чан // Доклады БГУИР. – 2018. – № 1. – С. 57–64.
4. Боднар, И. В. Тепловое расширение твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x} \cdot (AgIn_5S_8)_x$ / И. В. Боднар, Бинь Тхан Чан // Доклады БГУИР. – 2019. – № 1. – С. 32–37.
5. Боднар, И. В. Магнитные свойства монокристаллов твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x} \cdot (AgIn_5S_8)_x$ / И. В. Боднар, Бинь Тхан Чан // Доклады БГУИР. – 2019. – № 6. – С. 95–99.
6. Боднар, И. В. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны монокристаллов $MnAgIn_7S_{12}$ / И. В. Боднар, Бинь Тхан Чан // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53, № 12. – С. 1621–1624.

Тезисы докладов на научных конференциях

7. Чан, Бинь Тхан. Рост и магнитные свойства монокристаллов $(MnIn_2S_4)_{0,9} \cdot (AgIn_5S_8)_{0,1}$ / Бинь Тхан Чан // Электронные системы и технологии : материалы 55-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2019. – С. 239.
8. Чан, Бинь Тхан. Фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур / Бинь Тхан Чан // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 11 июня 2019 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники / редкол. : Т. В. Борботько [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 76.



РЭЗІЮМЭ

Чан БінъТхан

Вырошчванне і ўласцівасці монакрышталяў патройных злучэнняў MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 і цвёрдых раствораў $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

Ключавыя словы: патройнае злучэнне, двухтэмпературны сінтэз, метады Брыджмена, шырыня забароненай зоны, цеплавое пашырэнне, магнітныя ўласцівасці, паверхнева-бар’ерныя структуры.

Мэта працы: распрацоўка тэмпературных рэжымаў сінтэзу і вырошчвання аднародных монакрышталяў патройных злучэнняў MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 і цвёрдых раствораў $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, даследаванне фізіка-хімічных, аптычных, цеплавых і магнітных уласцівасцяў, стварэнне паверхнева-бар’ерных структур.

Метады даследавання: мікрарэнтгенаспектральны і рэнтгенаўскі аналізы, аптычныя спектры прапускання, магнітныя вымярэнні.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваныя тэмпературныя рэжымы вырошчвання аднародных монакрышталяў MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 і цвёрдых раствораў $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ дыяметрамі ~ 16 і даўжынёй ~ 40 мм. Вызначаны іх склад, структура, пікнаметрычная шчыльнасць, мікрацвёрдасць і пабудаваны іх канцэнтрацыйныя залежнасці. Па спектрах прапускання вызначана шырыня забароненай зоны, дылатаметрычным метадам даследавана цеплавое расшырэнне ў інтэрвале тэмператур 80–450 К.

Праведзеныя магнітныя вымярэнні паказалі, што монакрышталі, якія даследаваліся, з’яўляюцца парамагнетыкамі ва ўсім інтэрвале тэмператур, які быў даследаваны. Тэмпературныя залежнасці ўдзельнага магнітнага моманту ў палях 1 і 10 Т паказалі, што як *ZFC*-, так і *FC*-крывыя змяншаюцца з паніжэннем тэмпературы і назіраюцца пры магнітных пераходах II-роду.

На падставе монакрышталяў цвёрдых раствораў сфарміраваны паверхнева-бар’ерныя структуры $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$, $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ і даследаваны іх фотаэлектрычныя ўласцівасці.

Ступень выкарыстання: атрыманыя ў рабоце вынікі выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе БДУІР.

Вобласць прымянення: распрацаваныя аптымальныя рэжымы сінтэзу і вырошчвання монакрышталяў могуць выкарыстоўвацца для стварэння шырокапаалосных фотаператваральнікаў сонечнага выпраменьвання.

РЕЗЮМЕ

Чан Бинь Тхан

Выращивание и свойства монокристаллов тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

Ключевые слова: тройные соединения, двухтемпературный синтез, метод Бриджмена, ширина запрещенной зоны, тепловое расширение, магнитные свойства, поверхностно-барьерные структуры.

Цель работы: разработка температурных режимов синтеза и выращивания однородных монокристаллов тройных соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, исследование физико-химических, оптических, тепловых и магнитных свойств, создание поверхностно-барьерных структур.

Методы исследования: микрорентгеноспектральный и рентгеновский анализы, оптические спектры пропускания, магнитные измерения.

Полученные результаты и их новизна: разработаны температурные режимы выращивания однородных монокристаллов MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 40 мм. Определен их состав, структура, пикнометрическая плотность, микротвердость и построены их концентрационные зависимости. По спектрам пропускания определена ширина запрещенной зоны, dilatометрическим методом исследовано тепловое расширение в интервале температур 80–450 К.

Проведенные магнитные измерения показали, что исследуемые монокристаллы являются парамагнетиками во всем исследованном интервале температур. Температурные зависимости удельного магнитного момента в полях 1 и 10 Тл показали, что как *ZFC*-, так и *FC*-кривые уменьшаются с понижением температуры и наблюдаются при магнитных переходах II-рода.

На основе монокристаллов твердых растворов сформированы поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$, $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ и исследованы их фотоэлектрические свойства.

Степень использования: полученные в работе результаты внедрены в учебный процесс БГУИР.

Область применения: разработанные оптимальные режимы синтеза и выращивания монокристаллов могут использоваться для создания широкополосных фотопреобразователей солнечного излучения.

SUMMARY

Tran Binh Than

The growth and properties of the ternary compounds MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 single crystals and solid solutions $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

Key words: ternary compounds, two temperature synthesis, Bridgeman method, band gap width, thermal expansion, magnetic properties, surface barrier structures.

Aim of the work: elaboration of the temperature regime of the synthesis and growth of the homogenous single crystals of MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 ternary compounds and solid solutions $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$, the study of their physical and chemical, optical, thermal and magnetic properties, creation of the surface barrier structures.

Methods of the study: micro X-ray spectral and X-ray analysis, optical spectra of transmission, magnetic measurements.

Obtained results and their novelty: the thermal regimes of growth of the homogenous single crystals MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 and solid solutions $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ of ~ 16 mm diameter and ~ 40 mm long were elaborated. Their composition, structure, pycnometric density, micro solidity was determined and their concentration dependences were built. The band gap width was determined on the transmission spectra and the thermal expansion in 80–450 K range was studied with the dilatometric method.

The magnetic measurements show that the given crystals are paramagnetic in the whole range of the temperatures. The temperature dependences of the specific magnetic in fields 1 and 5 Tl show that both ZFC- and FC-curves decrease with the temperature decrease and that is normally observed in the magnetic transitions of the II-type.

The surface barrier structures $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,3}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$, $\text{In}/(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{0,5}\cdot(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ were formed on the basis of the single crystals and their photo electrical properties were studied.

Degree of use: the results of the research are used in the educational process of the BSUIR.

Area of application: the optimal regimes for the synthesis and growth of single crystals and can be used to create broadband photo transformers of the solar radiation.

Научное издание

Чан Бинь Тхан

**ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ
ТРОЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ $MnIn_2S_4$, $AgIn_5S_8$
И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(MnIn_2S_4)_{1-x} \cdot (AgIn_5S_8)_x$**

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 . . . 2019.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.	Тираж 60 экз.	Заказ.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/238 от 24.03.2014.
№2/113 от 07.04.2014. №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровка, 6