

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592

ЖАФАР

Махмуд Ахмед Махмуд

**ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТРОЙНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
 $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$**

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 2018

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

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

Официальные оппоненты **Яблонский Геннадий Петрович**, доктор физико–математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики и техники полупроводников государственного научного учреждения «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»

Стемпницкий Виктор Романович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится « 14 » июня 2018 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, 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 « » мая 2018 г.

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

И.В. Дайняк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие микро-, нано- и оптоэлектроники ставит задачу разработки и исследования эффективных полупроводниковых материалов с физическими свойствами, на основе которых могут быть созданы полупроводниковые приборы с новыми функциональными возможностями. Интерес к тройным соединениям обусловлен поиском новых материалов, обладающих одновременно зарядовыми и спиновыми свойствами, подходящими для спинтронных приборов. Зарядовые и спиновые свойства используются, как правило, в различных материалах типа полупроводниковых и ферромагнитных соответственно, однако наиболее перспективным было бы использование этих свойств в одном материале. Экспериментальные данные свидетельствуют, что легирование полупроводниковых соединений магнитными примесями может привести к появлению ферромагнетизма при комнатной температуре. Высокотемпературный ферромагнетизм в таких соединениях делает их привлекательными, однако роль магнитных примесей в появлении ферромагнетизма в этих тройных соединениях до сих пор не исследована. Вопрос о стабильности легированных систем также требует дополнительных исследований.

В последнее время значительное внимание уделяется изучению магнитных полупроводников типа $MB^{III}_2C^{VI}_4$ ($M - Mn, Fe$), $B^{III} - Ga, In, Al$; $C^{VI} - S, Se$). Эти соединения, в частности $FeIn_2S_4$, кристаллизуются в кубической структуре (тип шпинели) и являются перспективными для создания на их основе лазеров, модуляторов света и других функциональных устройств, управляемых магнитным полем.

Соединение $CuIn_5S_8$ характеризуется прямыми межзонными переходами и является перспективным оптическим полупроводниковым материалом для создания ряда новых опто-электронных приборов: широкополосных преобразователей естественного излучения, высокоэффективных радиационно стойких преобразователей солнечной энергии, инфракрасных детекторов и других устройств.

Однако практическая реализация этой идеи затруднена, что обусловлено рядом факторов. Одним из них, и самым главным, является то, что до сих пор не решена проблема выращивания гомогенных и однородных монокристаллов твердых растворов на основе соединений $FeIn_2S_4$ и $CuIn_5S_8$.

Все вышесказанное определило направление диссертационной работы, задачей которой являлось определение оптимальных режимов синтеза и выращивания однородных и гомогенных монокристаллов соединений $FeIn_2S_4$, $CuIn_5S_8$ и твердых растворов на их основе, определение состава и структуры полученных монокристаллов, изучение оптических, электрических и магнитных свойств, теплового расширения в широком интервале температур, а также создание экранов электромагнитного излучения и поверхностно-барьерных структур на основе выращенных

монокристаллов и исследование их свойств. В литературе практически отсутствуют какие-либо сведения о твердых растворах $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Тема работы соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 1196 от 12 августа 2010 г., в частности, разделу 2 «Супрамолекулярная химия, химический синтез новых веществ и материалов с заданной структурой, функциональными и физико-химическими свойствами. Новые химические продукты и технологии», пункту 2.1 «Направленный синтез новых функциональных химических соединений и исследование зависимостей «структура – свойства», супрамолекулярные, гибридные и молекулярно-организованные вещества и материалы на их основе, процессы полимеризации, структура и физико-химические свойства синтетических и природных полимеров»; разделу 6 «Лазерные, оптические, оптико-, опто-, микро- и радиоэлектронные технологии и системы», пункту 6.2 «Новые оптические, волоконно-оптические и нелинейно-оптические компоненты, материалы и покрытия, новые материалы для приборов функциональной микро-, опто-, нано- и СВЧ-электроники»; разделу 8 «Новые материалы для промышленности, медицины и строительства, наукоемкие технологии их производства. Металлургические и литейные процессы», пункту 8.1 «Структура и физические свойства конденсированных сред, новые магнитные, сегнетоэлектрические, полупроводниковые, сверхпроводящие, радиационно стойкие и сверхтвердые материалы и композиты, фотонные и нелинейно-оптические кристаллы».

Диссертационная работа выполнялась на кафедрах химии, защиты информации БГУИР и НИЛ 5.1 НИЧ БГУИР «Монокристаллы сложных полупроводниковых соединений» в рамках Государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», подпрограмма «Кристаллические и молекулярные структуры», задание 1.16 «Разработка технологии выращивания и исследование свойств кристаллов разбавленных магнитных полупроводников группы $\text{MB}^{\text{III}}_2\text{C}^{\text{VI}}_4$ (M – Cu, Fe; B^{III} – In; C^{VI} – S) для спинтроники» (2014–2015; № ГР 20142500).

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработать температурные режимы синтеза и выращивания монокристаллов тройных соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$, установить основные закономерности в изменении физико-химических, оптических, электрических, теплофизических и магнитных свойств полученных

монокристаллов, а также создать элементы экранов электромагнитного излучения и поверхностно-барьерные структуры на их основе.

Задачи исследования:

1. Определить температурные режимы синтеза (двухтемпературный метод) и выращивания монокристаллов (метод Бриджмена) тройных соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$.
2. Определить состав, структуру, параметры элементарной ячейки, плотность, температуры фазовых превращений, спектры ядерного гамма-резонанса (спектры ЯГР) указанных соединений и их твердых растворов.
3. Установить основные закономерности в изменении физико-химических, оптических, электрических, теплофизических и магнитных свойств выращенных монокристаллов в зависимости от состава x .
4. На основе порошков тройных соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ создать элементы экранов электромагнитного излучения и исследовать их частотные характеристики.
5. На основе монокристаллов твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ сформировать поверхностно-барьерные структуры и исследовать их фотоэлектрические свойства.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в том, что в ней представлены результаты исследования физико-химических и физических свойств впервые полученных монокристаллов тройных соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$. В работе:

- методом микрорентгеноспектрального анализа определен состав выращенных монокристаллов, их кристаллическая структура, параметры элементарной ячейки, плотность, температуры фазовых превращений и построена диаграмма состояния системы $\text{FeIn}_2\text{S}_4 - \text{CuIn}_5\text{S}_8$;

- по спектрам ЯГР изучены локальные конфигурации ионов железа в структуре соединения FeIn_2S_4 и твердых растворах $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$. Установлено, что ионы железа занимают соответственно октаэдрические позиции B и тетраэдрические позиции A ;

- по спектрам пропускания определена ширина запрещенной зоны (E_g) полученных монокристаллов и построена ее концентрационная зависимость. Показано, что E_g с составом x изменяется с максимумом для среднего состава;

- дилатометрическим методом исследовано тепловое расширение соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов на их основе, рассчитаны коэффициенты теплового расширения, температуры Дебая и среднеквадратичные динамические смещения атомов;

- в интервале температур 150 – 300 К измерено удельное электросопротивление (ρ) твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$.

Установлено, что все выращенные монокристаллы демонстрируют активационный характер ρ , которое непрерывно возрастает с уменьшением температуры;

– измерена магнитная восприимчивость монокристаллов FeIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$. Установлено, что указанные монокристаллы являются парамагнетиками вплоть до температур ~ 5 К;

– исследованы фотоэлектрические свойства поверхностно–барьерных структур $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально обоснованные температурные режимы синтеза и выращивания монокристаллов FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и их твердых растворов методом Бриджмена (температура расплава 1390–1420 К, кристаллизация расплава со скоростью ~ 2 К/ч), которые позволили получить оптически однородные монокристаллы указанных соединений и твердых растворов диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 45 мм.

2. Экспериментально установленные фундаментальные физико-химические, оптические, теплофизические, электрические и магнитные параметры монокристаллов FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ (параметры элементарной ячейки, плотность, диаграмма состояния системы FeIn_2S_4 – CuIn_5S_8 , спектры ядерного гамма-резонанса, ширина запрещенной зоны (E_g), коэффициенты теплового расширения, температуры Дебая, среднеквадратичные динамические смещения атомов, удельное электросопротивление, магнитная восприимчивость), что позволяет полученные новые справочные данные использовать в области полупроводникового материаловедения, а также для проектирования приборов опто- и микроэлектроники.

3. Поверхностно–барьерные структуры на основе твердого раствора $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ обладают спектральной фоточувствительностью в диапазоне 1,1–3,5 эВ и вольтовой фоточувствительностью ~ 60 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 и отчетов. Участие соавторов заключалось как в проведении совместных исследований по согласованной схеме, так и в обсуждении полученных результатов. Постановку цели и задач исследований, контроль за выращиванием монокристаллов соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$, выбор методов исследования, анализ и интерпретацию полученных результатов осуществлял

научный руководитель д-р хим. наук, профессор И. В. Боднарь. Основными соавторами работ являются канд. физ.-мат. наук И. А. Викторов (в проведении дифференциального термического анализа) и канд. физ.-мат. наук С. В. Труханов (в совместном исследовании магнитных свойств).

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 8-я Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, Россия, 2014); 5-я Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, Республика Беларусь, 2016); Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, Республика Беларусь, 2016); 15-я Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Минск, Республика Беларусь, 2017).

Разработанные оптимальные температурные режимы синтеза и выращивания оптически однородных монокристаллов соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 45 мм могут быть использованы организациями, которые занимаются синтезом и выращиванием монокристаллов сложных полупроводниковых соединений и твердых растворов на их основе.

Результаты исследования физико-химических и физических свойств имеют фундаментальный характер и могут использоваться как справочные данные.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по дисциплине «Прикладная химия» (приложение Г).

Опубликование результатов диссертации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 11 научных работах, из них 6 статей в рецензируемых научных изданиях, соответствующих пункту 18 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», общим объемом 3 авторских листа, 4 статьи в сборниках научных трудов международных конференций, 1 тезисы доклада.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка и 4 приложений.

Общий объем диссертации составляет 99 страниц, из них основной текст – 66 страниц, 41 иллюстрация представлена на 35 страницах, 15 таблиц – на 14 страницах, библиографический список из 104 источников – на 7 страницах, список публикаций соискателя из 11 наименований – на 2 страницах, 4 приложения – на 4 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 анализ научной литературы по теме диссертации, представлены основные характеристики кристаллической структуры соединений FeIn_2S_4 и CuIn_5S_8 . Показано, что эти соединения кристаллизуются в структуре шпинели, для которой характерна кубическая плотнейшая упаковка анионов, октаэдрические и тетраэдрические пустоты которой частично заняты катионами, рассмотрены диаграммы состояния систем $\text{In}_2\text{S}_3\text{--FeS}$ и $\text{Cu}_2\text{S--In}_2\text{S}_3$, на которых образуются соединения FeIn_2S_4 и CuIn_5S_8 , методы синтеза и выращивания кристаллов указанных соединений. Анализ физико-химических и физических свойств указанных соединений показал, что данные различных авторов существенно отличаются между собой, что связано, вероятнее всего, с тем, что большинство измерений проводилось на поликристаллических образцах. Отсутствие надежной информации о методах выращивания монокристаллов ставит задачу разработки оптимальных температурных режимов выращивания однородных монокристаллов как соединений FeIn_2S_4 и CuIn_5S_8 , так и твердых растворов на их основе.

Во **второй главе** представлены методы синтеза и выращивания соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$, а также методики исследований.

Монокристаллы указанных соединений и их твердых растворов получали в два этапа. Предварительно указанные соединения и твердые растворы 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 $\sim 202,65$ кПа. После вакуумирования ампулы до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па ее отпаивали от вакуумной системы и располагали в горизонтальной двухзонной печи. Температуру зоны, где находилась лодочка с металлическими компонентами, устанавливали 1390 – 1420 К (в зависимости от соединения или состава твердого раствора), температуру зоны, где находилась сера, повышали со скоростью ~ 100 К/ч до 680 – 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 зоны с металлическими компонентами понижали со скоростью 50 К/ч до 800 К и печь отключали от сети.

Монокристаллы указанных соединений и твердых растворов выращивали методом Бриджмена. Полученные слитки, как описано выше, перегружали в двойные кварцевые ампулы, из которых внутренняя ампула заканчивалась цилиндрическим капилляром, который обеспечивал формирование монокристаллической затравки. К наружной ампуле снизу приваривали кварцевый стержень, служивший держателем. После вакуумирования ампулы ее помещали в вертикальную однозонную печь с заданным температурным градиентом, в которой проводили выращивание монокристаллов. Температуру печи повышали до $\sim 1390 - 1420$ К и для гомогенизации расплава выдерживали при этой температуре 2 ч. 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 1020 К в течение 300 – 400 ч. Выращенные в таких условиях монокристаллы имели диаметр ~ 16 мм и длину ~ 45 мм.

Приведено описание методик исследования физико-химических и физических свойств: состав выращенных монокристаллов определяли методом микрорентгеноспектрального анализа. Измерения проводили на установке «Stereoscan – 360». В качестве анализатора рентгеновского спектра использовали рентгеновский спектрометр «AVALON-8000». Относительная погрешность определения компонентов составляла ± 5 %, дифрактограммы записывали на рентгеновском аппарате ДРОН–3М в $\text{CuK}\alpha$ -излучении с графитовым монохроматором, плотность измеряли пикнометрическим методом, температуры фазовых превращений определяли методом дифференциального термического анализа (ДТА), спектры ядерного гамма-резонанса регистрировали на спектрометре MS2000 с источником $^{57}\text{Fe}/\text{Rh}$ (40 mCi), ширину запрещенной зоны определяли по спектрам пропускания в области края собственного поглощения на спектрофотометре “Cary-500”, тепловое расширение измеряли на кварцевом dilatометре, электрические (в интервале температур 130 – 300 К) и магнитные (в интервале температур 5 – 300 К и полях 0 – 14 Тл) свойства исследовали на установке Liquid Helium Free High Field Measurement System by Cryogenic Ltd, UK.

В **третьей главе** изложены результаты исследования физико-химических свойств соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$.

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

Проведенные рентгеновские исследования показали, что на дифрактограммах как соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 , так и твердых растворов на их основе присутствуют рефлексы отражения, характерные для

кубической структуры шпинели. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов, равны: $a = 10,612 \pm 0,005 \text{ \AA}$ для FeIn_2S_4 и $a = 10,682 \pm 0,005 \text{ \AA}$ для CuIn_5S_8 . С составом x изменение указанных параметров осуществляется линейно.

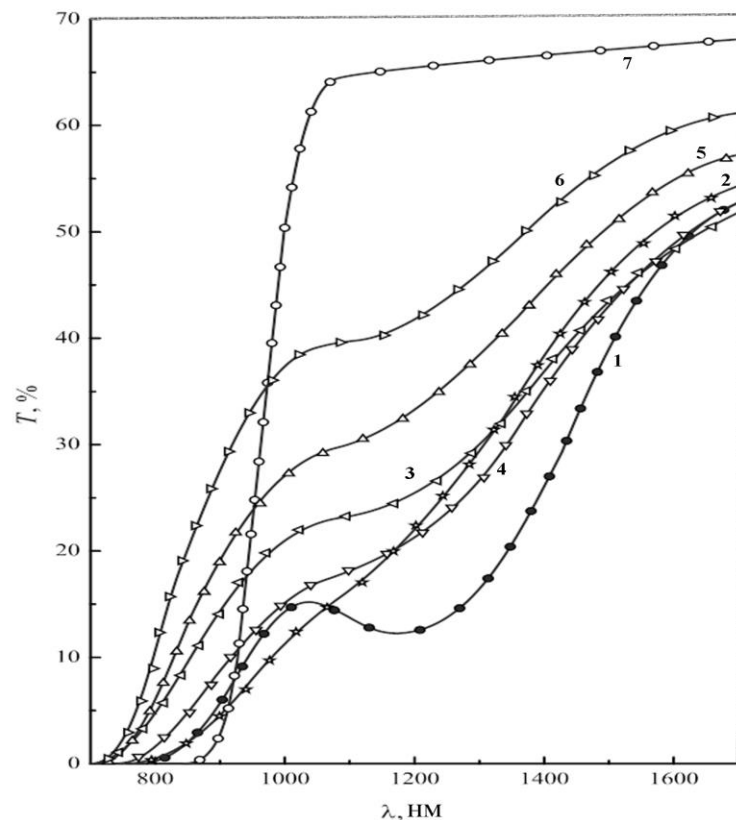
Измеренная плотность, как и параметр a , изменяется с составом x линейно от $4,35 \text{ г/см}^3$ для FeIn_2S_4 до $4,68 \text{ г/см}^3$ для CuIn_5S_8 .

Результаты ДТА показали, что на всех зарегистрированных термограммах 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 CuIn_5S_8 – FeIn_2S_4 , которая характеризуется небольшим интервалом кристаллизации ($\sim 5 \text{ K}$).

Методом ЯГР-спектроскопии определены параметры сверхтонких взаимодействий ионов железа в соединении FeIn_2S_4 и твердых растворах $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ (изомерный сдвиг, локальное состояние, квадрупольное расщепление).

В четвертой главе изложены результаты исследования физических свойств.

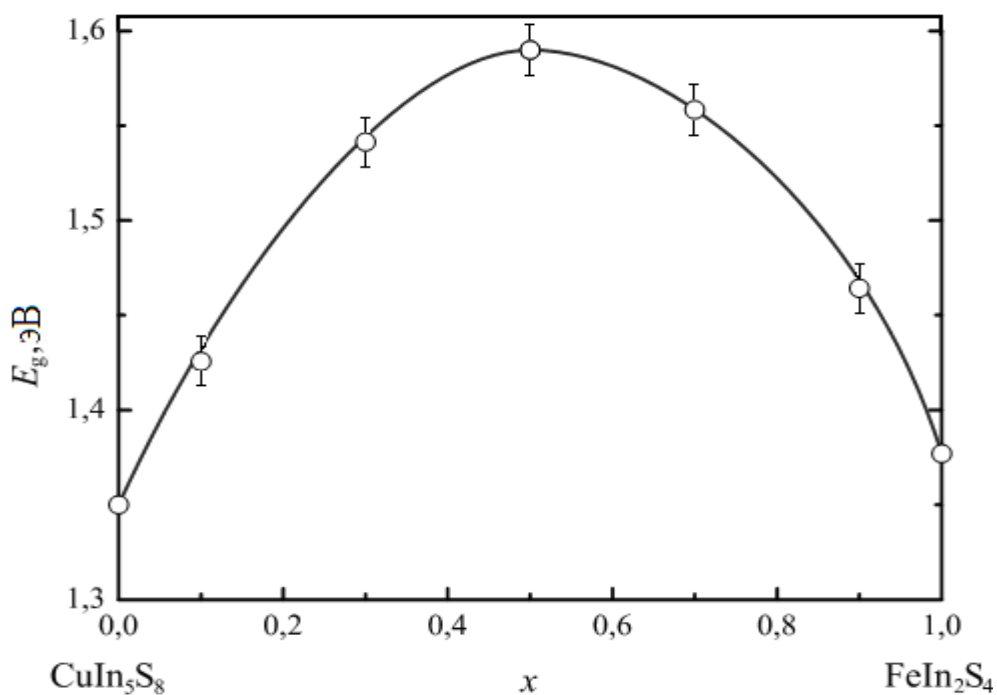
Спектры пропускания исследуемых монокристаллов представлены на рисунке 1. Видно, что указанные спектры имеют сложный характер поведения в исследованной области длин волн. Спектр состоит из трех



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

Рисунок 1. – Спектры пропускания монокристаллов соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$

участков: на первом участке начинается рост величины пропускания, затем происходит некоторое замедление роста пропускания, после чего начинается дальнейший рост величины пропускания. В связи с отсутствием теоретических расчетов зонной структуры указанного класса материалов провести интерпретацию наблюдаемых полос в области края собственного поглощения весьма сложно. Однако можно предположить, что рост пропускания в области длин волн 500 – 1000 нм (для разных x) связан с началом межзонных переходов в монокристаллах. Увеличение пропускания в области длин > 1000 нм указывает на то, что край собственного поглощения как в кристаллах тройных соединений FeIn_2S_4 и CuIn_5S_8 , так и твердых растворах на их основе обусловлен прямыми межзонными переходами. По спектрам пропускания определена ширина запрещенной зоны (E_g), которая составляет 1,350 эВ для CuIn_5S_8 и 1,377 эВ для FeIn_2S_4 . На рисунке 2 представлена концентрационная зависимость $E_g(x)$. Видно, что ширина запрещенной зоны с x сначала возрастает от 1,350 эВ для CuIn_5S_8 до 1,592 эВ для среднего состава ($x = 0,5$), после чего уменьшается до 1,377 эВ для FeIn_2S_4 . Такое поведение ширины запрещенной зоны можно объяснить, по-видимому, перестройкой кристаллической решетки в твердых растворах. Известно, что соединение FeIn_2S_4 обладает структурой обращенной шпинели, а соединение CuIn_5S_8 – нормальной шпинели. При образовании твердых растворов, вероятнее всего, происходит перестройка кристаллической решетки от обращенной шпинели, характерной для соединения FeIn_2S_4 , к структуре нормальной шпинели, характерной для соединения CuIn_5S_8 . Такая перестройка приводит, по-видимому, к усилению

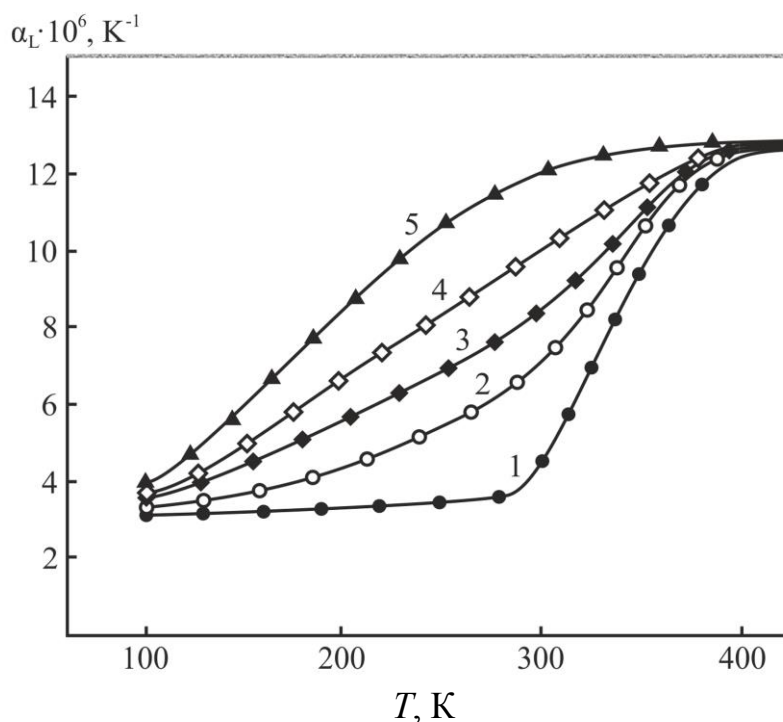


точки – эксперимент; сплошная линия – расчет

Рисунок 2. – Концентрационные зависимости ширины запрещенной зоны для твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$

химической связи для указанных твердых растворов.

На монокристаллах тройных соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворах на их основе проведены измерения теплового расширения в интервале 90–450 К (рисунок 3). Анализ полученных результатов показывает, что коэффициент теплового расширения (α_L) для соединения FeIn_2S_4 слабо изменяется в интервале температур 90–275 К (от $3,0$ до $3,6 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$), затем наблюдается резкий рост α_L вплоть до 400 К (от $3,6$ до $12,4 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$), после чего температура не оказывает влияния на величину α_L . Иной характер поведения α_L для соединения CuIn_5S_8 и твердых растворов. Видно, что α_L растет в интервале температур 90 – 360 К, выше 360 К рост α_L замедляется и слабо зависит от температуры. Такое поведение α_L связано, вероятнее всего, с изменением степени ангармонизма тепловых колебаний атомов в исследуемых материалах. Зависимости коэффициентов теплового расширения (α_L) от состава x при различных температурах имеют линейный характер.



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

Рисунок 3. – Температурные зависимости α_L твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$

Проведенные измерения удельного электросопротивления в интервале температур 150 – 300 К показали, что как соединения FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 , так и твердые растворы на их основе демонстрируют активационный характер. Установлено, что наибольшим значением удельного сопротивления при $T = 300 \text{ K}$ обладает образец с $x = 0,3$ – $\rho = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, наименьшим значением – образец с $x = 0,7$ – $\rho = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. С понижением температуры для образца $x = 0,7$ наблюдается увеличение ρ на 3 порядка, в то время как для

остальных – только на 2 порядка. В измеренном интервале температур ρ удовлетворительно описывается выражением $\ln \rho \sim T^{-1}$. По углу наклона зависимости $\ln \rho(T^{-1})$ определена энергия активации, которая при комнатной температуре возрастает почти линейно с ростом x от 0,28 до 0,41 эВ.

Исследованием магнитных свойств монокристаллов соединения FeIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ в интервале температур 4–300 К и полях 0–14 Тл установлено, что все они являются парамагнетиками, вплоть до температур ~ 5 К (рисунок 4). Удельный магнитный момент монотонно

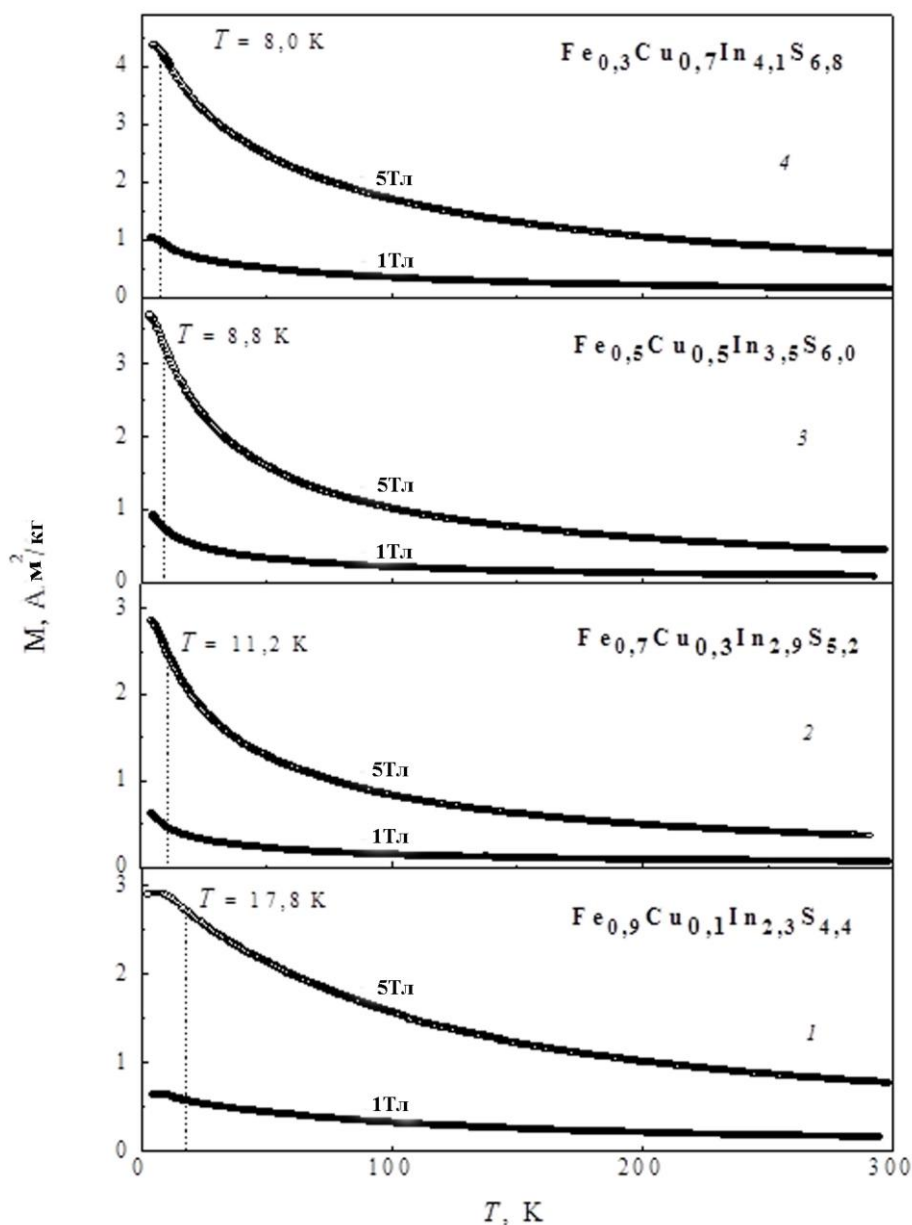


Рисунок 4. – Температурные зависимости удельного магнитного момента в полях 1 Тл и 5 Тл для твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$

возрастает с уменьшением температуры для всех составов за исключением $x = 0,1$. Ниже 5 К наблюдается тенденция к насыщению удельного магнитного момента. Температура магнитного упорядочения постепенно возрастает с ростом концентрации катионов железа Fe^{2+} от ~ 8 К ($x = 0,7$) до ~ 18 К ($x = 0,1$).

Для выяснения природы низкотемпературного магнитного фазового состояния были выполнены измерения полевых зависимостей атомного магнитного момента (рисунок 5).

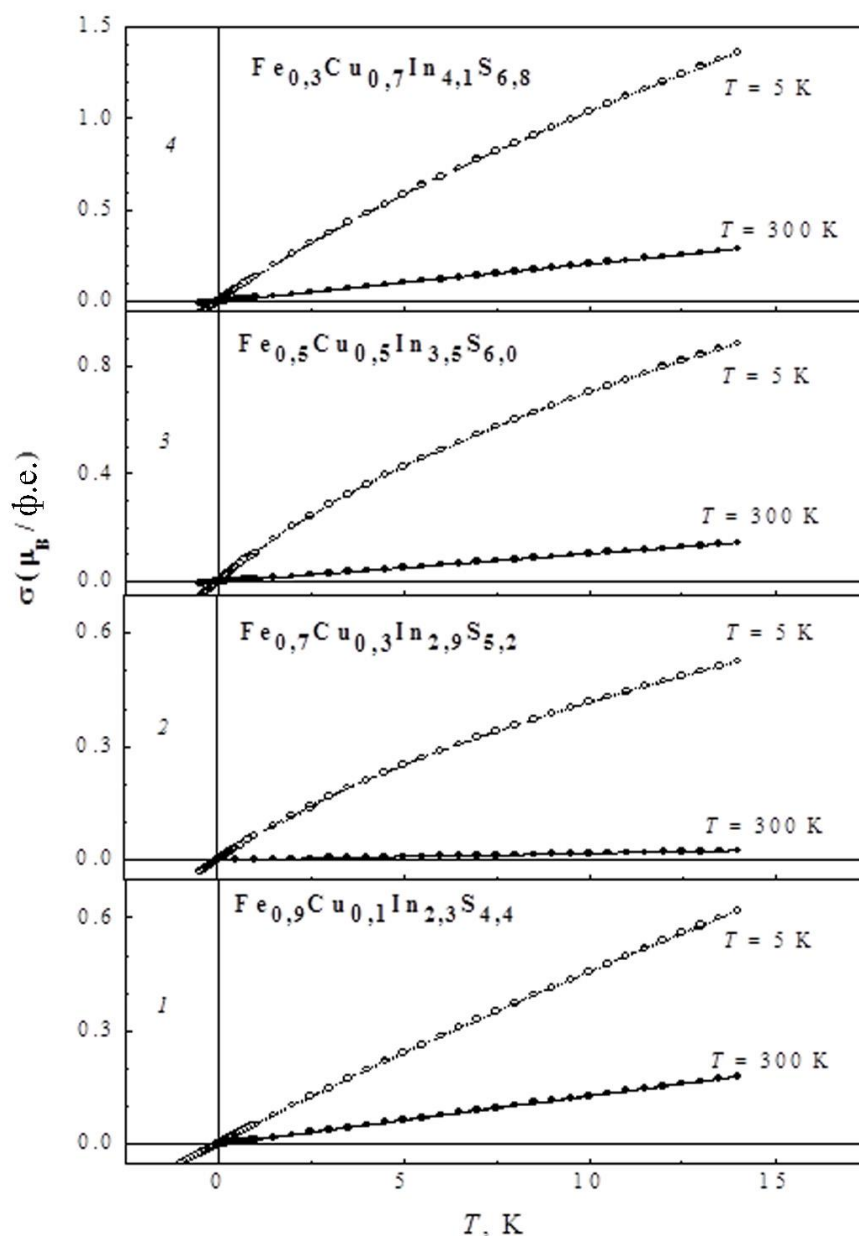
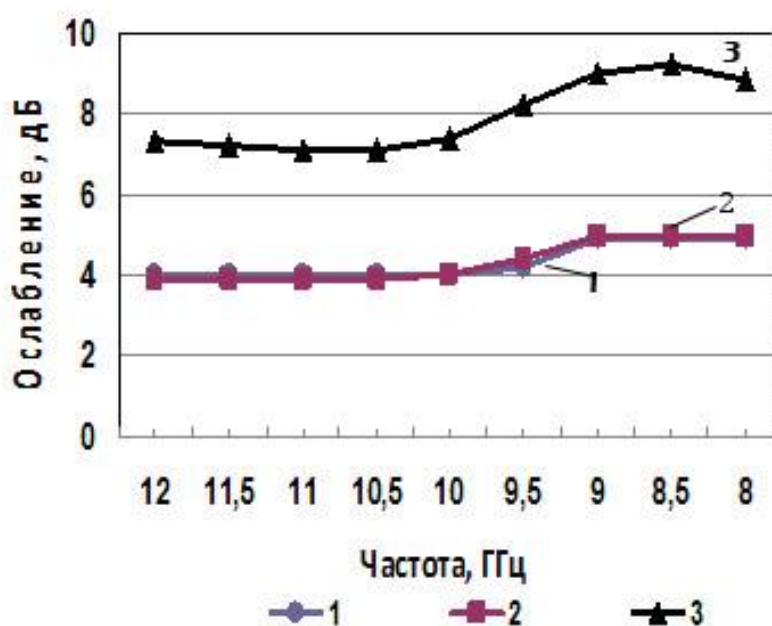


Рисунок 5. – Полевые зависимости атомного магнитного момента при температурах 5 К (светлые кружки) и 300 К (темные кружки) для твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$

Установлено, что вплоть до температуры ~ 5 К все полевые зависимости почти линейны, что характерно для антиферромагнитного или парамагнитного состояния. Незначительная величина атомного магнитного момента указывает, скорее всего, на антиферромагнитное состояние. В низкотемпературной области (~ 5 К) наблюдаются ненулевые значения спонтанного и остаточного атомного магнитного момента, а также коэрцитивной силы, свойственные для ферромагнитного упорядоченного состояния или наличия ферромагнитных корреляций ближнего порядка. Такое поведение не соответствует однородному антиферромагнитному состоянию, а свойственно, вероятнее всего, слабому ферромагнитному состоянию или наличию корреляций ближнего порядка.

На основе соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов на их основе сформированы элементы экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) и исследованы их экранирующие свойства. На рисунке 6 представлена частотная зависимость ослабления ЭМИ порошками на основе кристаллов соединения CuIn_5S_8 и некоторых твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$



1 – $x = 0,3$; 2 – $x = 0,5$; 3 – $x = 1,0$

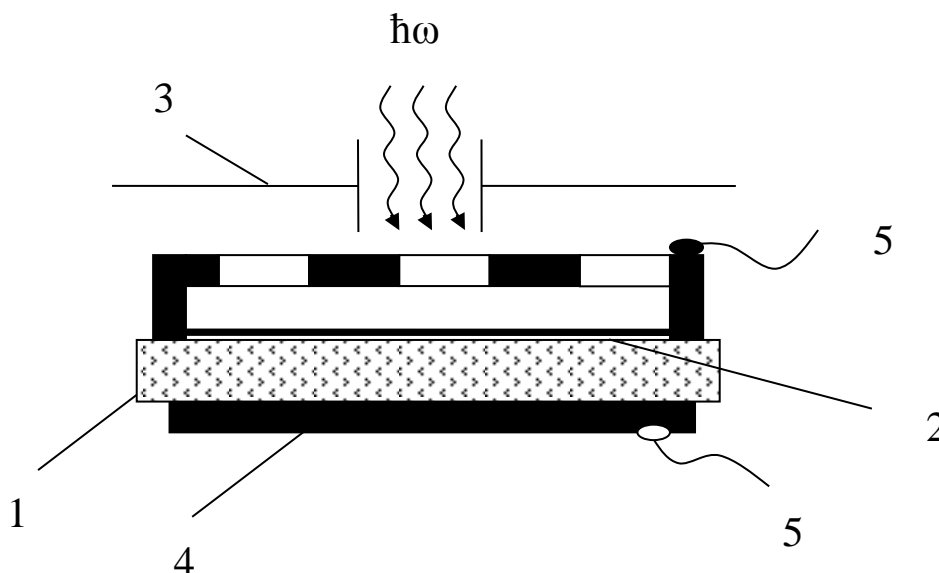
Рисунок 6. – Частотная характеристика ослабления на основе твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ диапазоне 8 – 12 ГГц

Видно, что ослабление ЭМИ образцами толщиной порядка 1,0 мм составляет от 5 до 9 дБ. Наибольшее ослабление характерно для образца, на основе CuIn_5S_8 (рисунок 6). Исследование твердых растворов различного состава не приводит к увеличению данной электромагнитной характеристики.

На основе монокристаллов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ сформированы поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$.

Структуры получали вакуумным термическим испарением металлического индия (толщина слоя ~ 2 мкм) на поверхность монокристаллов, находившихся при комнатной температуре и не подвергавшихся какому-либо нагреву при напылении слоев металлов, что позволяло не учитывать возможность образования на границе слоя с подложкой других фаз. Омический контакт создавался нанесением серебряной пасты (рисунок 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



1 – пластина монокристалла $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$; 2 – пленка металлического In;
3 – диафрагма; 4 – омический контакт к пластине монокристалла $\text{FeCuIn}_7\text{S}_{12}$;
5 – токоподводящие проводники

Рисунок 7. – Схема фоточувствительной структуры $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$

$(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$. Вольтовая фоточувствительность (S_U) сформированных структур преобладает при их освещении со стороны барьерной пленки. На рисунке 8 представлены спектры относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(\hbar\omega)$ поверхностно-барьерных структур $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$. Из представленного рисунка видно, что в условиях освещения структур со стороны барьерных пленок индия быстрый рост η наступает при $\hbar\omega > 1,0$ эВ.

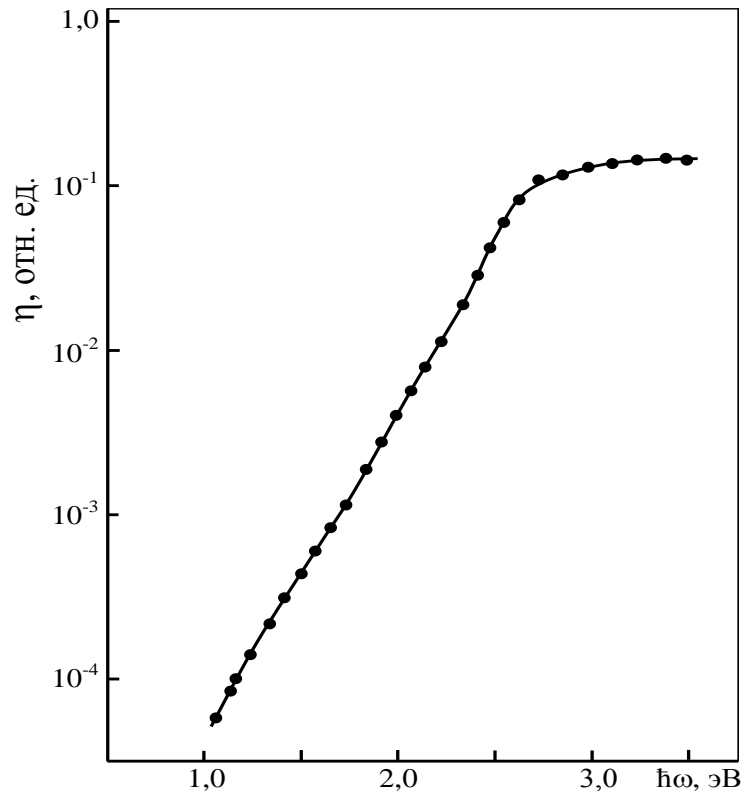


Рисунок 8. – Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования структуры $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$

Из рисунка 8 также следует, что созданные поверхностно-барьерные структуры обеспечивают фоточувствительность в спектральном диапазоне от 1,0 до 3,5 эВ при $T = 300$ К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны оптимальные температурные режимы выращивания оптически однородных монокристаллов соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ направленной кристаллизацией расплава (вертикальный метод Бриджмена) диаметром ~ 16 мм и длиной ~ 45 мм, определен их состав, структура, параметры элементарной ячейки и плотность. Изучение локальных конфигураций ионов железа в структуре соединения FeIn_2S_4 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ методом ЯГР показало, что ионы железа занимают соответственно октаэдрические позиции B и тетраэдрические позиции A [2, 3, 4, 7, 8, 9].

2. По спектрам пропускания в области края собственного поглощения определена ширина запрещенной зоны соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ и построена ее концентрационная зависимость. Установлено, что E_g с составом x изменяется с максимумом для среднего состава и описывается квадратичной зависимостью.

Дилатометрическим методом исследовано тепловое расширение соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов на их основе, 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 об ослаблении химической связи в твердых растворах $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ [2, 3, 4].

3. Измерение удельного сопротивления (ρ) показало, что наибольшим значением ρ при $T = 300 \text{ K}$ обладает образец с $x = 0,3 - 1,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, наименьшим значением – образец с $x = 0,7 - 1,4 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. С понижением температуры для образца $x = 0,7$ наблюдается увеличение удельного электросопротивления на 3 порядка, в то время как для остальных – на 2 порядка, энергия активации увеличивается с ростом x от 0,28 до 0,41 эВ. Магнитные измерения показали, что для соединения FeIn_2S_4 твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ основным магнитным фазовым состоянием является состояние спинового стекла с температурой замерзания, монотонно возрастающей с ростом концентрации катионов Fe^{2+} [1, 2].

4. На основе соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ сформированы элементы экранов электромагнитного излучения и исследованы их экранирующие свойства. Установлено, что наибольшей эффективностью экранирования обладают кристаллы, обладающие n -типом проводимости. Показано, что в диапазоне 8 – 12 ГГц такие экраны характеризуются отражательной способностью от –8 до –10 дБ, что позволяет предложить их использовать для создания экранирующих средств, а также в целях обеспечения электромагнитной совместимости. На основе монокристаллов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ сформированы поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ и исследованы их фотоэлектрические свойства. Показано, что указанные структуры могут быть использованы в качестве широкополосных фотопреобразователей естественного излучения с вольтовой фоточувствительностью $\sim 60 \text{ В/Вт}$ при $T = 300 \text{ K}$ [5, 6, 10, 11].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

1. Разработанные оптимальные температурные режимы синтеза и выращивания оптически однородных монокристаллов соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ диаметром $\sim 16 \text{ мм}$ и длиной $\sim 45 \text{ мм}$ могут быть использованы организациями, которые занимаются синтезом и выращиванием монокристаллов сложных полупроводниковых соединений и твердых растворов на их основе [2, 3, 4, 7, 9].

2. Результаты исследования физико-химических, оптических, электрических, теплофизических и магнитных свойств имеют фундаментальный характер и могут использоваться как справочные данные при расчете и конструировании полупроводниковых приборов и приборов спинтроники [1–11].

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по дисциплине «Прикладная химия» (приложение Г).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Trukhanov, S. V. Magnetic and electrical properties of the $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ solid solutions / S. V. Trukhanov, I. V. Bodnar, M. A. Zhaafar // J. Magnet. Magnetic Mater. – 2015. – Vol. 379. – P. 22–27.

2. Bodnar, I. Growth, optical, magnetic and electrical properties of $\text{CuFe}_{2.33}\text{In}_{9.67}\text{S}_{17.33}$ single crystal / I. Bodnar, M. Jaafar, S. Pauliukavets // Mater. Res. Express. – 2015. – Vol. 2, № 8. – P. 085901 (4 с.).

3. Концентрационная зависимость ширины запрещенной зоны твердых растворов $(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{1-x} \cdot (\text{FeIn}_2\text{S}_4)_x$ / И. В. Боднар, И. А. Викторов, М. А. Жафар, С. А. Павлюковец // ФТП. – 2016. – Т. 50, № 2. – С. 154–157.

4. Монокристаллы твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_x \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)$: кристаллическая структура, спектры ядерного гамма резонанса и тепловое расширение / И. В. Боднар, М. А. Жафар, Ю. В. Касюк, Ю. А. Федотова // ФТП. – 2017. – Т. 51, № 3. – С. 291–296.

5. Пухир, Г. А. Особенности взаимодействия твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ с электромагнитным излучением СВЧ диапазона / Г. А. Пухир, М. А. Жафар, И. В. Боднар // Доклады БГУИР. – 2017. – № 3. – С. 58–64.

6. Боднар, И. В. Поверхностно-барьерные структуры на основе монокристаллов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ / И. В. Боднар, М. А. Жафар // Доклады БГУИР. – 2017. – № 5. – С. 40–45.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Твердые растворы в системе $\text{FeIn}_2\text{S}_4 - \text{CuIn}_5\text{S}_8$ / И. В. Боднар, И. А. Викторов, М. А. Жафар, С. В. Труханов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб. тр. VIII Междунар. науч. конф. – СПб., 2014. – С. 218–219.

8. ЯГР-спектры твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ / И. В. Боднар, М. А. Жафар, Ю. В. Касюк, Ю. А. Федотова // Актуальные проблемы ФТТ : сб. докл. VII Междунар. науч. конф. – Минск, 2016. – С. 83–85.

9. Жафар, М. А. Получение и свойства монокристаллов $\text{CuFeIn}_7\text{S}_{12}$ / М. А. Жафар // Актуальные вопросы физики и техники : сб. докл. 5-й науч. конф. студ. и асп. – Гомель, 2016. – С. 45–47.

10. Жафар, М. А. Экранирующие электромагнитное излучение СВЧ-диапазона свойства порошков кристаллов CuIn_5S_8 , FeIn_2S_4 / М. А. Жафар, Г. А. Пухир, Е. Ю. Рожков // Управление информационными ресурсами: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2016. – С. 188–190.

Тезисы докладов на научных конференциях

11. Жафар, М. А. Поверхностно-барьерные структуры на основе монокристаллов $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ / М. А. Жафар // Технические средства защиты информации : тез. докл. XV Белорусско-российской науч. конф. – Минск, 2017. – С. 88.

РЭЗІЮМЭ

Жафар Махмуд Ахмед Махмуд

Вырошчванне і ўласцівасці монакрышталяў трайных спалучэнняў FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 і цвёрдых раствораў $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$

Ключавыя словы: монакрышталі, метады Брыджмена, параметры элементарнай ячэйкі, шырыня забароненай зоны, магнітныя ўласцівасці.

Мэта працы: распрацоўка аптымальных рэжымаў сінтэзу і вырошчвання аптычна аднародных монакрышталяў трайных злучэнняў FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 і іх цвёрдых раствораў, даследаванне фізіка-хімічных, структурных, аптычных, цеплавых, электрычных і магнітных уласцівасцяў, стварэнне экрану электрамагнітнага выпраменьвання і паверхнева-бар’ерных структураў.

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

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны аптымальныя рэжымы сінтэзу і вырошчвання аднародных монакрышталяў FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 і цвёрдых раствораў $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ дыяметрам ~ 16 і даўжынёй ~ 45 мм. Вызначаны іх склад, структура, шчыльнасць і пабудаваны іх канцэнтрацыйныя залежнасці. Па спектрах прапускання вызначана шырыня забароненай зоны, дылатаметрычным метадам даследавана цеплавое пашырэнне паказаных злучэнняў і цвёрдых раствораў у інтэрвале тэмператур 90–450 К. У інтэрвале тэмператур 150–300 К вымерана ўдзельнае супраціўленне. Праведзеныя магнітныя вымярэнні паказалі, што асноўным магнітным фазавым станам з’яўляецца стан спінавага шкла з тэмпературай замярзання, манатонна ўзрастаючай з ростам канцэнтрацыі катыёнаў Fe^{2+} . На аснове злучэнняў FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 і іх цвёрдых раствораў створаны элементы экранов электрамагнітнага выпраменьвання і даследаваны іх экрануючыя ўласцівасці, а на аснове монакрышталяў $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ сфарміраваны паверхнева-бар’ерныя структуры $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ і даследаваны іх фотаэлектрычныя ўласцівасці.

Ступень выкарыстання: атрыманыя вынікі працы ўкараненыя ў навучальны працэс УА «БДУІР».

Вобласць прымянення: распрацаваныя аптымальныя рэжымы сінтэзу вырошчвання монакрышталяў могуць быць выкарыстаныя арганізацыямі, якія займаюцца аналагічнымі пытаннямі; вырашчаныя монакрышталі могуць выкарыстоўвацца для стварэння шырокапалосных фотоператваральнікаў сонечнага выпраменьвання.

РЕЗЮМЕ

Жафар Махмуд Ахмед Махмуд

Выращивание и свойства монокристаллов тройных соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$

Ключевые слова: монокристаллы, метод Бриджмена, параметры элементарной ячейки, ширина запрещенной зоны, магнитные свойства.

Цель работы: разработка оптимальных режимов синтеза и выращивания оптически однородных монокристаллов тройных соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и их твердых растворов, исследование физико-химических, оптических, тепловых, электрических и магнитных свойств, создание элементов экранов и поверхностно-барьерных структур.

Методы исследования: микрорентгеноспектральный и рентгеновский анализы, ЯГР- и оптические спектры, электрические и магнитные измерения.

Полученные результаты и их новизна: разработаны оптимальные режимы выращивания однородных монокристаллов FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ диаметром ~ 16 и длиной ~ 45 мм. Определен их состав, структура, плотность, построены их концентрационные зависимости. По спектрам пропускания определена ширина запрещенной зоны, dilatометрическим методом исследовано тепловое расширение в интервале температур 90–450 К. В интервале температур 150–300 К измерено удельное сопротивление. Проведенные магнитные измерения показали, что основным магнитным фазовым состоянием является состояние спинового стекла с температурой замерзания, монотонно возрастающей с ростом концентрации катионов Fe^{2+} . На основе соединений FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 и их твердых растворов созданы элементы экранов электромагнитного излучения и исследованы их экранирующие свойства, на основе монокристаллов $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ сформированы поверхностно-барьерные структуры $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ и исследованы их фотоэлектрические свойства.

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

Область применения: разработанные оптимальные режимы синтеза и выращивания монокристаллов могут быть использованы организациями, занимающимися аналогичными вопросами; выращенные монокристаллы могут использоваться для создания широкополосных фотопреобразователей солнечного излучения.

SUMMARY

Jaafar Mahmoud Ahmed Mahmoud

Single crystals of ternary compounds FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 and solid solutions $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$: growth and properties

Key words: single crystals, Bridgeman method, elementary cell parameters, band gap width, magnetic properties, electromagnetic radiation screen, surface barrier structures.

The goal of the work: elaboration of the optimum synthesis and growth mode of the optically homogenous single crystals of the ternary compounds FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 and solid solutions $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$; the investigation of the physical and chemical, structural, optical, thermal, electrical and magnetic properties and the creation of the electromagnetic radiation screens and the surface barrier structures.

Study methods: micro X-ray spectral and X-ray analyzes, nuclear gamma-resonant spectroscopy and optical spectra, electric and magnetic measurements.

The results obtained and their novelty. The optimum mode of the synthesis and growth of the optically homogenous crystals FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 and solid solutions $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ with 16 diameter and ~ 45 mm of the length has been elaborated. Their composition, the crystalline structure, density were determined and their concentration dependence was built. According to the transmission spectra the band gap width was determined. Employing the dilatometric method the thermal expansion of the pointed compounds and solutions was studied in the range of temperatures 90 – 450 K. Debye temperatures and RMS dynamic bias of atoms were calculated. The resistivity of the crystals was measured in 150–300 K temperature region. The magnetic measurement showed that the main phase state for the compound FeIn_2S_4 and solid solution $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ was the state of the spine glass with the freezing temperature that was monotonically increasing with the concentration of Fe^{2+} cations. Basing on the compounds FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 and solid solutions $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$ the electromagnetic radiation screens were created and their screening properties were studied. The surface barrier structures $\text{In}/(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$ were formed on the basis of the single crystals $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,5} \cdot (\text{CuIn}_5\text{S}_8)_{0,5}$. Their photo electrical properties were studied.

Application area: the results are introduced to the educational process of the BSUIR.

Научное издание

Жафар Махмуд Ахмед Махмуд

**ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТРОЙНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ FeIn_2S_4 , CuIn_5S_8 И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
 $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$**

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

Подписано в печать . . . 2018.	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. Бровки, 6