

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

*На правах рукописи*

УДК 548.55+621.3.085.345-026.66

СЕНИБАБНОВ  
Артем Игоревич

**ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ  $In_2S_3$ ,  
СВОЙСТВА И ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ИХ ОСНОВЕ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения

Научный руководитель  
канд. техн. наук, доцент  
Павлюковец Сергей Анатольевич

Минск 2016

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

Научный руководитель:

**Павлюковец Сергей Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой химии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Стемпичский Виктор Романович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный экономический университет»

Защита диссертации состоится «20» января 2016 г. года в 11<sup>40</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, ауд. 415 – 1 корпус, тел.: 293-20-30, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by).

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

## ВВЕДЕНИЕ

Алмазоподобные полупроводники завоевали широкую известность благодаря сочетанию ряда важных полупроводниковых свойств – высокой подвижности носителей тока, фото- и термоэлектрических свойств, малой теплопроводности. Одновременно с изучением свойств неорганических полупроводниковых соединений с нормальной структурой типа сфалерита и вюрцита проводят изучение соединений с дефектной структурой. В отличие от соединений-аналогов  $A^{III}B^V$  или  $A^{II}B^{VI}$  соединения типа  $B_2^{III}C_3^{VI}$  (где  $B^{III}$  -  $B, Al, Ga, In, Tl$ ;  $C^{VI}$  -  $S, Se, Te$ ) из-за дефектной структуры обладают специфическими свойствами.

В настоящее время полупроводниковые соединения типа  $B_2^{III}C_3^{VI}$  широко исследуются на предмет использования их при создании высокоэффективных радиационно-стойких солнечных элементов в тонкопленочном исполнении. Из указанного класса соединений значительный интерес представляет бинарное соединение  $In_2S_3$ . Данное соединение образуется на разрезе  $In - S$ , и кристаллизуется в структуру типа шпинели. Существует четыре модификации, одна из которых, тетрагональная, стабильна при комнатной температуре, а три остальные – высокотемпературные, и в комнатных условиях не существуют.

Интерес к монокристаллам  $In_2S_3$  вызван следующими обстоятельствами: а) собственная проводимость является всегда электронной из-за избыточного числа атомов халькогена; б) значения ширины запрещенной зоны этого соединения близко к оптимальному ( $E_g = 1,9...2,2$  эВ) для разработок преобразователей солнечного излучения; г) коэффициент оптического поглощения, в пределах спектрального диапазона солнечного излучения, достигает больших значений ( $\alpha > 10^4$  см<sup>-1</sup>), что обеспечивает высокую поглощающую способность падающего излучения в тонких пленках; в) благодаря большому количеству дефектов (~33 %) кристаллы  $In_2S_3$  обладают высокой радиационной стойкостью; г) возможность  $In_2S_3$  заменить токсичный  $CdS$  при производстве преобразователей солнечного излучения. Сочетание этих свойств обуславливает перспективность данного соединения при реализации разнообразных технических устройств: светодиодов линейно-поляризованного излучения, дисплеев, электрооптических модуляторов, фотопреобразователей солнечного излучения с высоким КПД (~ 12...18%).

Все вышесказанное определило направление данной работы, задачей которой являлось определение оптимальных режимов выращивания качественных и оптически однородных монокристаллов бинарных соединений  $In_2S_3$  двух структурных модификаций и изучение их оптических, электрических и тепловых свойств; получение пленок на основе монокристаллов и исследование их основных характеристик, а также создание поверхностно-барьерных структур на основе монокристаллов  $In_2S_3$  двух структурных модификаций и пленок и исследование их фотоэлектрических свойств.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

Сложные полупроводниковые фазы, образующиеся на границах соединений  $A^I_2C^{VI}-B^{III}_2C^{VI}_3$ , становятся объектом быстро расширяющихся исследований в связи с возможностями использования их в полупроводниковой опто- и фотоэлектронике. Теоретические исследования процессов взаимодействия в таких системах указывают на возможности существования в них целого ряда областей стабильности с образованием позиционно-упорядоченных фаз, содержащих стехиометрические вакансии. Сведения о бинарных фазах  $B^{III}_2C^{VI}_3$ , входящих в квазибинарный разрез  $A^I_2C^{VI}-B^{III}_2C^{VI}_3$ , пока весьма ограничены. В связи с необходимостью анализа взаимодействий в рассматриваемых системах расширение исследований указанных фаз становится весьма актуальным. Данная работа посвящена изучению физических свойств одного из таких соединений –  $In_2S_3$  и созданию электромагнитных экранов на их основе.

## Степень разработанности проблемы

Полупроводниковые соединения и их твердые растворы широко исследуются на предмет создания высокоэффективных радиационно-стойких солнечных элементов в тонкопленочном исполнении. Вместе с тем изучение фазового взаимодействия в системах  $B^{III}_2C^{VI}_3$  позволило установить, что в них могут образовываться наряду с известными фазами  $I-III-VI_2$  еще множество позиционно упорядоченных фаз типа  $I-III_n-VI_m$  (где  $n=3,5$ ;  $m=5,8$ ), включающих и соединения с упорядоченными вакансиями. Наличие прямых межзонных переходов при комнатной температуре делает эти материалы перспективными для создания на их основе ряда оптоэлектронных приборов. До сих пор не решена проблема выращивания больших гомогенных и оптически однородных монокристаллов этого класса. Результаты исследований физико-химических, оптических и электрических свойств, приведенные различными авторами, значительно отличаются друг от друга, что можно объяснить проведением исследований в основном на поликристаллических образцах.

## Цель и задачи исследования

Целью диссертации является синтез и выращивание однородных монокристаллов двух структурных модификаций (кубической и тетрагональной)  $In_2S_3$ , установление закономерностей изменения физических и физико-химических свойств от способа получения, а также создание экранов электромагнитного излучения на основе указанных монокристаллов и исследование их свойств.

## Задачи исследования:

1. Определить оптимальные режимы синтеза и выращивания объемных монокристаллов  $In_2S_3$  кубической и тетрагональной модификаций из расплава методом Бриджмена – Стокбаргера.

2. Определить состав и структуру монокристаллов  $In_2S_3$ .
3. Установить закономерности изменения оптических, теплофизических и электрических свойств монокристаллов  $In_2S_3$ .
4. Изготовить экраны электромагнитного излучения на основе монокристаллов  $In_2S_3$  и исследовать их свойства.

**Объектом** исследования являются монокристаллы  $In_2S_3$  и экраны на их основе.

**Предметом** работы являются физико-химические, оптические, теплофизические и электрические свойства.

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

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

Теоретической и методологической основой исследований являются разработки отечественных и зарубежных авторов, методические материалы, труды отечественных и зарубежных учёных в области синтеза и выращивания монокристаллов. В магистерской диссертации используются следующие общенаучные методы: эмпирического исследования (эксперимент, измерение, научное исследование), общелогические (анализ, аналогия, системный подход), метод факторного и сравнительного анализа.

**Информационная база** исследования по синтезу и выращиванию монокристаллов сформирована на основе научных публикаций известных зарубежных ученых (*R.S. Becker, C. Paorici, H.D. Lutz, D. Bidjin, R.H. Bube, W. Rehwald, R. Ranjith, R. Pai, L. Bhira, P.M. Ratheesh Kumar, T.T. John, S. Spiering, Zi Ping Ai, J.C. Bernede, P.M. Sirimanne, T. Asikainen, B. Yahmadi, M. Afzaal, P. O'Brien, V.G. Bessergenev, B. Asenjo, H. Hahn, A.A. Лаврентьев, Г.Ш. Гасанов, Н.Н. Сырбу*) и ученых Республики Беларусь (*И.В. Боднар, Г.П. Яблонский*).

**Инструментальной базой** исследования являются: рентгеновский спектрометр *Cameca-SX100*, дифрактометр ДРОН-3М, двухкоординатный самописец типа Н 307/1, цифровой вольтметр В7-23, терморегулятор РИФ-101, микротвердомер *LEICA VMHT MOT*, кварцевый dilatометр, спектрофотометр *Cary500*, панорамный измеритель ослабления и КСВН Я2Р-67 с ГКЧ-61 и волноводным трактом, панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения *SNA 0,01-18*.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** магистерской диссертационной работы заключается в следующем:

1. Определены оптимальные скорости нагрева исходных компонентов (50 К/ч), температура изотермического отжига ( $T = 1020$  К) и скорость протягивания (0,18 мм/ч) позволяют получать качественные монокристаллы  $In_2S_3$  тетрагональной модификации; оптимальные скорости нагрева исходных

компонентов (50 К/ч), температура изотермического отжига ( $T = 1020$  К), скорость протягивания (0,18 мм/ч) и температура ( $T = 77$  К, жидкий азот) при которой проводилась закалка позволяют получать качественные монокристаллы  $In_2S_3$  кубической модификации.

2. Проведены оптические измерения ширины запрещенной зоны для кристаллов (2,09...2,13 эВ)  $In_2S_3$  показали, что данное соединение является перспективным материалом для солнечных элементов в качестве буферного слоя.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре химии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по дисциплине «Физико-химические процессы».

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методика получения монокристаллов  $In_2S_3$  кубической модификации модифицированным методом Бриджмен-Стокбаргера, основанная на использовании сверхбыстрого термического охлаждения после изотермического отжига при температуре  $T = 720 \pm 5$  К, что позволило впервые сформировать монокристаллы с размерами: диаметр  $\sim 12$  мм и длина  $\sim 35$  мм.

2. Методика получения монокристаллов  $In_2S_3$  тетрагональной модификации модифицированным методом Бриджмена-Стокбаргера, основанная на использовании изотермического отжига в течении 150 часов при температуре  $T = 720 \pm 5$  К и оптимальной скорости протягивания  $\sim 0,18$  мм/ч, что позволило впервые сформировать монокристаллы с размерами: диаметр  $\sim 20$  мм и длиной  $\sim 50$  мм.

3. Экспериментально установленные физико-химические параметры выращенных монокристаллов  $In_2S_3$  двух структурных модификаций и тонких пленок на их основе, что позволило получить новые справочные данные в области материаловедения, в частности:

- тетрагональная модификация монокристаллов  $In_2S_3$ : параметры элементарной ячейки ( $a = 7,618 \pm 0,005$  Å,  $c = 32,25 \pm 0,05$  Å); коэффициент теплового расширения ( $\alpha = (8,6...10)10^6$  К<sup>-1</sup>); температура Дебая ( $\Theta_D = 135...147$  К); среднеквадратичное динамическое смещение ( $u^2 = 0,31...0,35$  Å<sup>2</sup>), температурная зависимость ширины запрещенной зоны;

- кубическая модификация монокристаллов  $In_2S_3$ : параметры элементарной ячейки ( $a = 10,77 \pm 0,01$  Å); коэффициент теплового расширения ( $\alpha \sim 9,6 \cdot 10^6$  К<sup>-1</sup>); температура Дебая ( $\Theta \sim 160$  К); среднеквадратичное динамическое смещение ( $u^2 \sim 0,28^2$ ), температурная зависимость ширины запрещенной зоны.

4. Предложены и реализованы экраны электромагнитного излучения на основе выращенных монокристаллов  $In_2S_3$ .

### **Теоретическая значимость**

Установлены физико-химические, оптические, теплофизические и электрические параметры выращенных монокристаллов, что позволило по-

лучить новые справочные данные в области материаловедения.

#### **Практическая значимость**

На основе выращенных монокристаллов впервые получены экраны электромагнитного излучения.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Основные положения диссертации и результаты исследований изложены в шести опубликованных работах, которые докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 11-ая международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ – 2015», Севастополь, Российская Федерация, 16 – 20 ноября 2015 г.; III Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники», Гомель, Республика Беларусь, 15 апреля 2015 г.; 51-ая научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств», Минск, Республика Беларусь, 13 – 17 апреля 2015 г.

#### **Структура и объем работы**

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации – 127 страниц. Работа содержит 17 таблиц, 34 рисунков. Библиографический список включает 112 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор по теме диссертации. В ней проведен анализ методов выращивания, структуры и свойств кристаллов  $In_2S_3$ . Результаты исследований физико-химических, оптических и электрических свойств, приведенные различными авторами, значительно отличаются друг от друга. Отсутствие достоверной информации о методах получения ставит наукоемкую задачу поиска оптимальных режимов выращивания монокристаллов  $In_2S_3$ .

Во **второй главе** изложены экспериментальные методы синтеза и выращивания монокристаллов  $In_2S_3$  двух структурных модификаций. Использование модифицированного метода Бриджмена-Стокбаргера связано с высокой технологичностью и возможностью поддержания постоянного градиента температуры на фронте кристаллизации, а так же управлением скоростью кристаллизации.

Синтез кристаллов соединения  $In_2S_3$  проводили двухтемпературным методом, поскольку при использовании одготемпературного метода синтеза часто происходили взрывы ампул. Сказанное связано с образованием на поверхности расплава соединений  $In_2S$ ,  $InS$  и  $In_2S_3$ , которые препятствуют дальнейшему протеканию реакции между металлическим индием и парообразной серой, вызывая резкое увеличение давления ее паров в ампуле, что, в конечном итоге, приводит к разрушению ампулы и потере продукта синтеза. Процесс синтеза соединения  $In_2S_3$  проводили следующим образом. Металлический индий загружали в кварцевую лодочку длиной 50 мм, 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. Ампулу откачивали до остаточного давления  $10^{-3}$  Па, запаивали и размещали в горизонтальной двухзонной печи. Температуру зоны с индием быстро (в течение 3 ч) устанавливали 1420 К, температуру зоны, где находилась сера, постепенно повышали со скоростью 100 К/ч до 680...700 К и выдерживали в течение 2 ч для протекания реакции между расплавом индия и парами серы. Для более полного протекания этой реакции температуру зоны повышали с той же скоростью до 960 К с повторной выдержкой в течение 1 ч. По истечении указанного времени проводили понижение температуры в зоне, где находился индий, со скоростью 50 К/ч до 700 К и печь отключали от сети.

Для выращивания монокристаллов тетрагональной модификации соединения  $In_2S_3$  ( $t-In_2S_3$ ) использовался вертикальный вариант направленной кристаллизации расплава (метод Бриджмена - Стокбаргера).

Выращивание монокристаллов проводили в вертикальной трехзонной печи. Технологические особенности метода следующие. Поликристаллические слитки, полученные как описано выше, растирали в порошок и загружали в кварцевые ампулы внутренним диаметром 20 мм, причем ампула для уменьшения количества центров кристаллизации имела небольшую конусность в области расплава и заканчивалась цилиндрическим капилляром для формирования монокристаллической затравки. Затем ампулу вакуумировали до остаточного давления  $10^{-3}$  Па и помещали во вторую ампулу большего диаметра. Наличие двойной ампулы способствовало сдерживанию анизотропного расширения материала. Откачанную до  $10^{-3}$  Па и запаянную ампулу устанавливали в верхней зоне печи. Температуру зоны расплава устанавливали 1400 К. Ампулу в печи с расплавом выдерживали в течение 24 ч, а затем опускали ее через фронт кристаллизации в нижнюю зону со скоростью 0,18 мм/ч при градиенте температуры 40 К/см.

В начальной стадии процесса выращивания были подобраны условия получения монокристаллической затравки. Для образования затравки часть расплава (длина участка 7 мм) закристаллизовывали путем опускания ампулы, а затем в течение 72 ч проводили ее рекристаллизационный отжиг. На сформированной таким образом монокристаллической затравке проводили выращивание монокристаллов  $In_2S_3$ . После кристаллизации всего расплава, полученные кристаллы отжигали в течение 150 ч при температуре 1020 К.



Указанные условия позволили вырастить монокристаллы  $t\text{-In}_2\text{S}_3$  диаметром 20 мм и длиной 50 мм.

Выращивание монокристаллов соединения  $\text{In}_2\text{S}_3$  кубической модификации ( $c\text{-In}_2\text{S}_3$ ) проводили по аналогичной методике с некоторыми технологическими изменениями. Полученные двухтемпературным методом поликристаллические слитки после растирания загружали в двойные кварцевые ампулы, из которых внутренняя ампула была диаметром 12 мм, имела небольшую конусность в области расплава и заканчивалась цилиндрическим капилляром, который обеспечивал формирование монокристаллической затравки. После вакуумирования ампулу размещали в верхней зоне где температуру поддерживали 1400 К, в зоне отжига 920 К. Ампулу опускали в печи со скоростью 0,18 мм/ч при градиенте температуры 40 К/см. Как и в случае тетрагональной модификации подбирали условия формирования затравки путем опускания ампулы 7 мм и затем проводили ее рекристаллизационный отжиг в течение 48 ч. После кристаллизации всего расплава проводили гомогенизирующий отжиг полученных кристаллов при 720 К в течение 150 ч. Для стабилизации кубической модификации монокристаллов соединения  $c\text{-In}_2\text{S}_3$  проводили их закалку в жидкий азот. Полученные монокристаллы имели диаметр 12 мм и длину 35 мм.

В третьей главе приведено описание использованных методик исследования свойств монокристаллов  $\text{In}_2\text{S}_3$  и основные результаты магистерской работы.

Состав выращенных монокристаллов определяли с помощью микро-рентгеноспектрального анализа на установке «Cameca-SX100». Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав полученных кристаллов соединения  $\text{In}_2\text{S}_3$

Образец	Весовые, %		Атомные, %	
	In	S	In	S
$t\text{-In}_2\text{S}_3$	70,48	29,52	39,70	60,30
$c\text{-In}_2\text{S}_3$	70,48	29,52	39,75	60,25

Равновесность полученных кристаллов определяли рентгеновским методом на рентгеновском аппарате ДРОН-3М в  $\text{CuK}\alpha$  - излучении с графитовым монохроматором. Дифрактограммы соединения  $\text{In}_2\text{S}_3$  показаны на рисунке 1 и 2.

Параметры элементарной ячейки для кристаллов соединения  $\text{In}_2\text{S}_3$ , рассчитанные по рефлексам, для которых  $2\Theta > 60^\circ$ , приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры элементарных ячеек монокристаллов  $\text{In}_2\text{S}_3$

Параметр элементарной ячейки	Монокристаллы	
	$c\text{-In}_2\text{S}_3$	$t\text{-In}_2\text{S}_3$
$a, \text{Å}$	$10,77 \pm 0,01$	$7,618 \pm 0,005$
$c, \text{Å}$	-	$32,25 \pm 0,05$

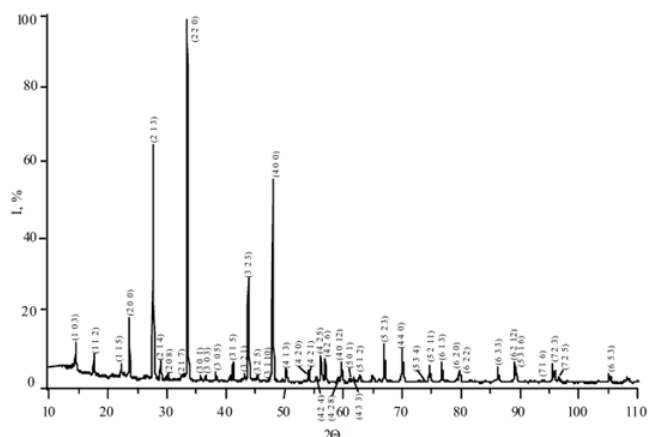


Рисунок 1 – Дифрактограмма  $t\text{-In}_2\text{S}_3$

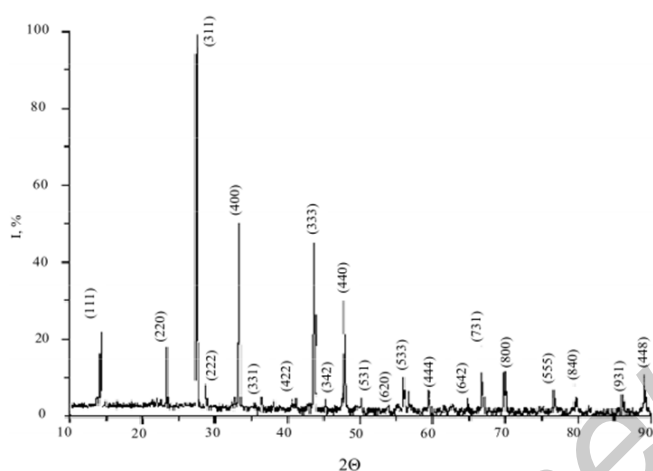


Рисунок 2 – Дифрактограмма  $c\text{-In}_2\text{S}_3$

На выращенных монокристаллах двух структурных модификаций соединения  $\text{In}_2\text{S}_3$  проведены измерения удельной электропроводности ( $\rho$ ) и эффекта Холла.

Результаты измерений удельного сопротивления, подвижности и концентрации носителей заряда представлены в таблице 3.

Для определения ширины запрещенной зоны  $E_g$  соединения  $\text{In}_2\text{S}_3$  были измерены спектры пропускания в области края основной полосы оптического поглощения.

По зарегистрированным спектрам пропускания рассчитывали коэффициент поглощения  $\alpha$ .

На рисунке 3 и 4 представлены спектральные зависимости  $(\alpha \cdot hv)^2$  от энергии фотонов  $hv$  для монокристаллов  $c\text{-In}_2\text{S}_3$  и  $t\text{-In}_2\text{S}_3$ . Ширину запрещенной зоны определяли экстраполяцией прямолинейных участков зависимости

$(\alpha \cdot hv)^2$  от  $hv$  до пересечения с осью абсцисс. Полученные нами значения  $E_g$  для соединения  $c\text{-In}_2\text{S}_3$  равны  $2,09 \pm 0,01$  эВ (300 К),  $2,23 \pm 0,01$  эВ (80 К) и  $2,27 \pm 0,01$  эВ (20 К), а для соединения  $t\text{-In}_2\text{S}_3$  равны  $2,13 \pm 0,01$  эВ (300 К),  $2,26 \pm 0,01$  эВ (80 К) и  $2,29 \pm 0,01$  эВ (20 К).

Таблица 3 – Результаты измеренных электрических параметров монокристаллов  $\text{In}_2\text{S}_3$  двух структурных модификаций

Тип структуры	Величина удельного сопротивления, Ом·см	Тип носителей заряда	Подвижность носителей заряда, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Концентрация носителей зарядов, $\text{см}^{-3}$
$t\text{-In}_2\text{S}_3$	$5 \cdot 10^2$	$n$	210	$6 \cdot 10^{13}$
$c\text{-In}_2\text{S}_3$	$1,3 \cdot 10^3$	$n$	78	$1 \cdot 10^{13}$

Для приготовления радиопоглощающих покрытий использовали рамки из органического стекла  $100 \times 50 \times 5$   $\text{см}^3$ .

В работе в качестве связующего состава использовался силикон строительный не кислотный. Выбор не кислотного силикона связан с тем, что во время эксплуатации кислотного герметика выделяется уксусная кислота.

Выделяемая кислота может вызвать коррозию в бинарном соединении  $In_2S_3$ .

В качестве порошковых наполнителей использовались монокристаллы соединения  $In_2S_3$ . С помощью ступки измельчали монокристаллы  $In_2S_3$  и взвешивали на электронных весах 2 г полученного порошка. Затем смешивали 20 мл герметика с навеской  $In_2S_3$ . Путем тщательного перемешивания, добивались получения однородной массы. Однородный состав равномерно распределяли по заранее подготовленной форме с помощью лопатки. В результате, заполненную рамку отправляли на сушку при комнатной температуре на 12 часов.

Для исследования экранирующих характеристик в диапазоне 8...12 ГГц использовался панорамный измеритель ослабления и КСВН Я2Р-67 с ГКЧ-61 и волноводным трактом, который обеспечивает выделение и детектирование уровней падающей и отраженной (или прошедшей) волн электромагнитного излучения.

Для измерения коэффициентов передачи и отражения конструкций экранов использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18. В результате исследований были получены значения (таблица 4).

Таблица 4 – Коэффициенты отражения  $S_{11отр}$  и передачи  $S_{21}$

Частота, ГГц		8	9	10	11	12
калибр.	$S_{21}$ , Дб	-0,75	-0,5	0	0	-0,4
	$S_{11}$ , Дб					
	$S_{11+Me}$ , Дб	4,65	4,65	3,7	2,4	2
$In_2S_3$	$S_{21}$ , Дб	-5,755	-5,246	-5,414	-5,764	-6,490
	$S_{11}$ , Дб	-6,707	-7,299	-4,765	-4,12	-3,522
	$S_{11+Me}$ , Дб	4,65	4,65	3,7	2,4	2

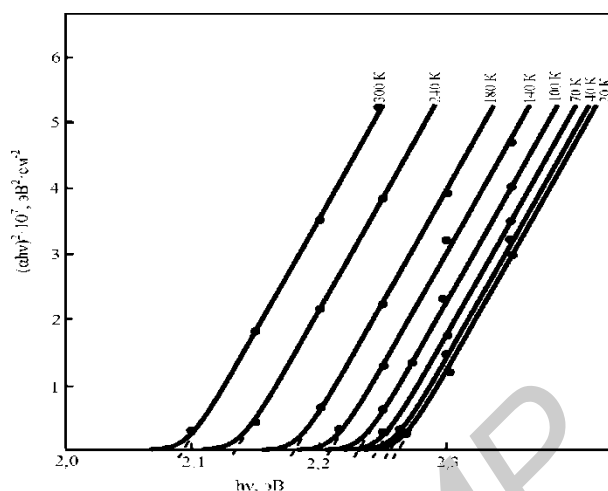


Рисунок 3 –  $(\alpha \cdot hv)^2$  от  $hv$  для монокристаллов  $c-In_2S_3$

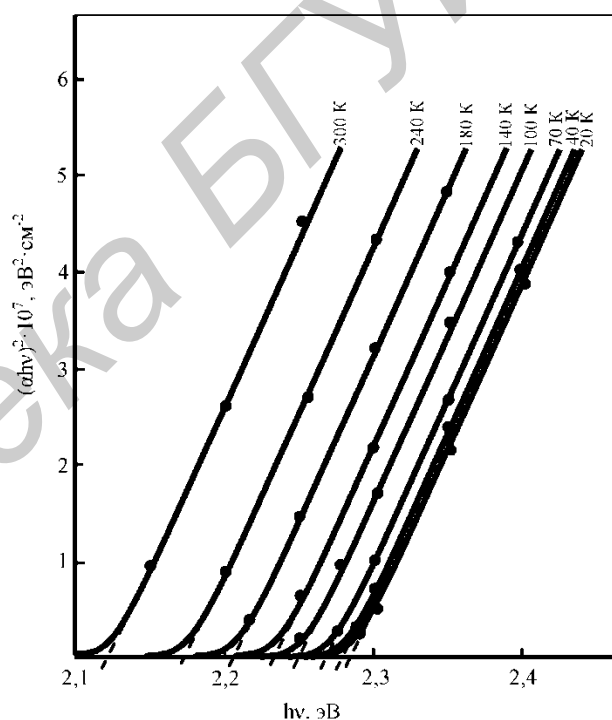


Рисунок 4 –  $(\alpha \cdot hv)^2$  от  $hv$  для монокристаллов  $t-In_2S_3$

Полимеры на основе композитных материалов, применённые для электромагнитного экранирования, могут значительно увеличить эффективность защиты от электромагнитных помех, а также обеспечить значительную экономию веса, устойчивость к коррозии и другой экологической деградации.

**В приложении** представлены акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс, копии публикаций соискателя и презентация магистерской диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые разработаны методики выращивания монокристаллов  $In_2S_3$  тетрагональной (диаметром  $\sim 20$  мм и длиной  $\sim 50$  мм) и кубической модификаций (диаметром  $\sim 12$  мм и длиной  $\sim 35$  мм), основанные на использовании метода Бриджмена - Стокбаргера. Определены значения микротвердости для монокристаллов тетрагональной ( $\sim 2,7$  ГПа) и кубической модификаций ( $\sim 3,5$  ГПа) и температур фазовых превращений ( $T1 = 693$  К,  $T2 = 1013$  К,  $T3 = 1361$  К), установлено, что монокристаллы  $In_2S_3$  обладают  $n$ -типом проводимости, удельным сопротивлением  $\rho \sim 5 \cdot 10^2$  Ом·см для монокристаллов тетрагональной модификации  $n \sim 1,3 \cdot 10^3$  Ом·см для кубической модификации, подвижностью электронов  $\mu_n \sim 210$  и  $\sim 78$  см<sup>2</sup>/В·с для тетрагональной и кубической модификаций соответственно, концентрацией электронов для обеих структурных модификаций  $n = (6 \dots 10) \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

На монокристаллах  $In_2S_3$  тетрагональной модификации, ориентированных параллельно ( $\alpha_{||}$ ) и перпендикулярно ( $\alpha_{\perp}$ ) главной оси кристалла, впервые дилатометрическим методом исследована анизотропия теплового расширения. Установлено, что при комнатной температуре коэффициент теплового расширения вдоль направления, параллельного тетрагональной оси кристалла ( $\alpha_{||} = (8,6 \dots 8,7) \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>) меньше коэффициента теплового расширения в перпендикулярном направлении оси кристалла ( $\alpha_{\perp} = (9,8 \dots 10) \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>). Рассчитаны температуры Дебая для тетрагональной ( $\Theta_d = 135 \dots 147$  К) и кубической ( $\Theta_d \sim 159$  К) модификаций, среднеквадратичные динамическое смещение атомов тетрагональной ( $u^2 = 0,31 \dots 0,35$  Å) и кубической ( $u^2 \sim 0,28$  Å) модификаций и другие термодинамические характеристики.

По спектрам пропускания в области края собственного поглощения в интервале температур 20...300 К определена ширина запрещенной зоны и построены ее температурные зависимости для двух структурных модификаций монокристаллов  $In_2S_3$ . Установлено, что с понижением температуры ширина запрещенной зоны возрастает от 2,13 до 2,29 эВ для монокристаллов тетрагональной модификации и от 2,09 до 2,27 эВ для кубической модификации.

На основе монокристаллов халькогенида  $In_2S_3$  сформированы экраны электромагнитного излучения и исследованы их свойства.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1–А] Оптические свойства монокристаллов  $In_2S_3$  и  $FeIn_2S_4$  со структурой шпинели / С.С. Леоновец, А.Н. Микита, В.И. Шейкин, А.И. Сенибабнов // Актуальные вопросы физики и техники: материалы III Республ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 15 апреля 2015 г. / ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – С. 66-69.

[2–А] Многокомпонентные магнитные полупроводники типа  $A^{II}B^{III}_2C^{VI}_4$  / В.С. Пладунова, С.С. Леоновец, А.Н. Микита, А.И. Сенибабнов, В.И. Шейкин // Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы 51-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, Респ. Беларусь, 13 – 17 апреля 2015 г. / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 210-212.

[3–А] Выращивание монокристаллов  $FeIn_2S_4$  методом Бриджмена-Стокбаргера / С.С. Леоновец, А.И. Сенибабнов, А.Н. Микита, В.И. Шейкин // Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы 51-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, Респ. Беларусь, 13 – 17 апреля 2015 г. / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 233-234.

[4–А] Сенибабнов, А.И. Выращивание и физико-химические свойства слоистых монокристаллов  $FeIn_2Se_4$  / А.Я. Микита, В.И. Шейкин, А.И. Сенибабнов // Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы 51-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, Респ. Беларусь, 13 – 17 апреля 2015 г. / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 235-236.

[5–А] Методы синтеза и выращивания кристаллов  $In_2S_3$  / А.И. Сенибабнов, С.С. Леоновец, А.И. Микита, В.И. Шейкин // Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы 51-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, Респ. Беларусь, 13 – 17 апреля 2015 г. / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 237-238.

[6–А] Сенибабнов, А.И. Физико-химические свойства монокристаллов  $In_2S_3$ ,  $FeIn_2Se_4$  и  $FeGa_2Se_4$  / А.Н. Микита, В.И. Шейкин, А.И. Сенибабнов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ - 2015»: материалы 11-й междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, 16 – 20 ноября 2015 г. / Севастоп. гос. ун-т; под ред. А. А. Савочкина. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2015. – С. 198.

[7–А] Сенибабнов, А.И. Теплофизические свойства монокристаллов  $FeGa_2Se_4$  / В.И. Шейкин, А.И. Сенибабнов, А.Н. Микита // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ - 2015»: материалы 11-й междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, 16 – 20 ноября 2015 г. / Севастоп. гос. ун-т; под ред. А. А. Савочкина. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2015. – С. 203.

## РЭЗІЮМЭ

Сенібабнаў Арцём Ігаравіч

Вырошчванне монакрышталяў  $In_2S_3$ ,

ўласцівасці і экраны электрамагнітнага выпраменьвання на іх аснове

**Ключавыя словы:** метады Брыджмена-Стокбаргера, монакрышталі, фізіка-хімічныя ўласцівасці, аптычныя, цеплафізічныя і электрычныя ўласцівасці.

**Мэта працы:** Мэтай дысертацыі з'яўляецца сінтэз і вырошчванне аднародных монакрышталяў  $In_2S_3$ , ўсталяванне заканамернасцяў змены фізічных і фізіка-хімічных уласцівасцяў ад спосабу атрымання, а таксама стварэнне экрану электрамагнітнага выпраменьвання на аснове названых монакрышталяў і даследаванне іх уласцівасцяў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Распрацаваныя аптымальныя тэмпературныя рэжымы вырошчвання аптычна аднародных монакрышталяў халькагеніда  $In_2S_3$  дыяметрам  $\sim 20$  мм і даўжынёй  $\sim 50$  мм. Вызначаны іх склад, структура, параметры элементарнай ячэйкі, шчыльнасць, мікрацвёрдасць, тэмпература і характар плаўлення. Дылатаметрычным метадам праведзены даследаванні цеплавога пашырэння ў інтэрвале тэмператур 80...600 К. Разлічаны тэрмадынамічныя параметры. Па спектрах прапускання ў інтэрвале тэмператур 20...300 К вызначана шырыня забароненай зоны. На монакрышталях створаны экраны электрамагнітнага выпраменьвання і даследаваны іх ўласцівасці.

**Ступень выкарыстання:** атрыманыя ў рабоце вынікі ўкаранены ў навучальны працэс УА «БДУІР».

**Вобласць ужывання:** стварэнне новага пакалення прыладаў опта-, мікра- і нанаэлектронікі.

## РЕЗЮМЕ

Сенибабнов Артём Игоревич

Выращивание монокристаллов  $In_2S_3$ ,

свойства и экраны электромагнитного излучения на их основе

**Ключевые слова:** метод Бриджмена-Стокбаргера, монокристаллы, физико-химические свойства, оптические, теплофизические и электрические свойства.

**Цель работы:** Целью диссертации является синтез и выращивание однородных монокристаллов  $In_2S_3$ , установление закономерностей изменения физических и физико-химических свойств от способа получения, а также создание экранов электромагнитного излучения на основе указанных монокристаллов и исследование их свойств.

**Полученные результаты и их новизна:** Разработаны оптимальные температурные режимы выращивания оптически однородных монокристаллов  $In_2S_3$  диаметром  $\sim 20$  мм и длиной  $\sim 50$  мм. Определен их состав, структура, параметры элементарной ячейки, плотность, микротвердость, температура и характер плавления. Дилатометрическим методом проведены исследования теплового расширения в интервале температур 80...600 К. Рассчитаны термодинамические параметры. По спектрам пропускания в интервале температур 20...300 К определена ширина запрещенной зоны. На монокристаллах созданы экраны электромагнитного излучения и исследованы их свойства.

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

**Область применения:** создание нового поколения устройств опто-, микро- и нанoeлектроники.

## SUMMARY

**Senibabnov Artem Igorevich**

**Growth of  $In_2S_3$  single crystals, properties  
and screens electromagnetic radiation on their basis**

**Keywords:** Bridgman-Stockbarger method, single crystals, physico-chemical properties, optical, thermal and electric properties.

**Objective:** The aim of the thesis is the synthesis and growth of single crystals of uniform  $In_2S_3$ , establishing patterns of changes in the physical and physico-chemical properties of the preparation process as well as the creation of screens electromagnetic radiation on the basis of these single crystals and study of their properties.

**Results and their novelty:** The optimal temperature conditions of growing optically homogeneous single crystals chalcogenides  $In_2S_3$  diameter of about 20 mm and a length of about 50 mm. Determine their composition, structure, unit cell parameters, density, microhardness, temperature and melting behavior. Dilatometric methods the thermal expansion in the temperature range 80...600 K. The thermodynamic parameters. In single crystals create a screen of electromagnetic radiation and their properties are investigated.

**Efficiency:** The results of the work were introduced into education process in BSUIR.

**Field of application:** The creation of the new generation of devices opto-, micro- and nanoelectronics.



Библиотека БГУИР