

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

УДК 621.315.592

На правах рукописи

**ВЕРЕМЕЙЧИК**  
Алексей Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения

Научный руководитель  
Цырельчук Игорь Николаевич,  
канд. техн. наук, доцент

Минск 2015

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

Научный руководитель:

**Цырельчук Игорь Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем

Рецензент:

**Полубок Владислав Анатольевич,**  
Заведующий кафедры учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кандидат технических наук

Защита диссертации состоится «23»июня 2015г. года в 9<sup>30</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, 1уч.корп., ауд. 415, тел.: 293-20-88, e-mail: [kafpiks@bsiur.by](mailto:kafpiks@bsiur.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. Широкое использование тонких пленок (ТП) в микроэлектронике, оптоэлектронике, функциональной электронике, а также других отраслях науки и техники основано на специфике их свойств, существенно отличающихся от характеристик тех же материалов в массивном состоянии. Ведутся разработки приборов на основе использования поликристаллических пленок полупроводниковых материалов в качестве пассивных и активных элементов.

В последнее время исследуются тройные полупроводниковые соединения  $A^I B^{III} C^{VI}_2$  (где  $A^I$  - *Cu, Ag*;  $B^{III}$  - *Al, Ga, In*;  $C^{VI}$  – *S, Se, Te*), и их твердые растворы (ТР). Интерес к группе тройных полупроводниковых соединений и ТР на их основе с кристаллической решеткой халькопирита обусловлен наличием в них сильной анизотропии физических свойств, естественного двулучепреломления и высоких значений коэффициента оптического поглощения в значительной части видимого и инфракрасного спектрального диапазонов. Указанные соединения и их ТР используются в качестве поглощающего слоя при создании высокоэффективных радиационно-стойких солнечных элементов (СЭ). Из указанного класса соединений значительный интерес представляет соединение  $CuInSe_2$  и его ТР  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  (*CIZS*). Данное соединение образуется в разрезе  $Cu_2Se-In_2Se_3$  и кристаллизуется в структуре халькопирита, элементарную ячейку которого можно представить как удвоенную по высоте элементарную ячейку сфалерита (цинковая обманка). Интерес к системе  $(CuInSe_2)_x-(2ZnSe)_{1-x}$  вызван следующими факторами: а) слои ТР *CIZS* являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны, изменяющейся в зависимости от состава от 1,04 эВ для  $CuInSe_2$  до 2,67 эВ для  $ZnSe$ ; б) коэффициент оптического поглощения  $\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$ , что обеспечивает высокую поглощающую способность падающего излучения и возможность создания тонкопленочных солнечных элементов (ТСЭ) на основе слоев *CIZS*; в)  $CuInSe_2$  и ТР *CIZS* высокодефектные структуры, поэтому обладают высокой радиационной; г) использование дешевого цинка позволяет значительно снизить стоимость тонких пленок. Указанные свойства обуславливают перспективность исследований тонких пленок ТР *CIZS* при реализации различных технических устройств.

Вышесказанное определило направление данной работы, задачей которой являлось: а) определение оптимальных режимов и методов получения тонких пленок *CIZS*; б) исследование физических свойств *CIZS*; в) создание поверхностно-барьерных структур на основе пленок *CIZS* и исследование их фотоэлектрических свойств; г) создание математической модели ТСЭ структуры *Mo/CIZS/CdS/ZnO* д) создание макетных ТСЭ, где *CIZS* используется в качестве поглощающего слоя и исследование их физических характеристик.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

Актуальным вопросом современной микро- и нанoeлектроники в настоящее время является создание новых устройств с улучшенными параметрами при использовании низкоразмерных материалов и структур. В этой связи особый интерес представляет создание периодических наноструктур и микроструктур с заданной топологией на основе новых функциональных материалов методами двухстадийной селенизации.

## Степень разработанности проблемы

Материалы  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , а также оптоэлектронные преобразователи ранее были получены различными технологическими методами, но основная проблема заключается в технологических трудностях получения структурно-совершенных пленок *CIZS*. Вклад внесли доктор физ мат наук Грименок В.Ф., доктор химических наук Боднарь И.В., доктор наук Клаус Бенте, доктор наук Гудрич Г.

## Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы являются – установление оптимальных условий синтеза тонких пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , установление закономерностей изменения физико-химических свойств, оптических, электрических и теплофизических свойств тонких пленок в зависимости от их состава, а также создание поверхностно-барьерных структур и солнечных элементов на основе тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  и исследование их фотоэлектрических свойств.

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

1. Определить оптимальные условия синтеза тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  из прекурсоров *ZnSe/Cu-In* методом двухстадийной селенизации.

2. Определить состав, структуру тонких пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  и их основные физико-химические параметры.

3. Установить закономерности изменения оптических, электрических в зависимости от состава тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ .

4. Изготовить поверхностно-барьерные структуры на основе тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  и исследовать влияние элементного состава пленок на фотоэлектрические свойства.

5. Создать математическую модель солнечных элементов на основе тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  и определить оптимальный элементный состав тонких пленок для создания наилучших солнечных элементов

6. Изготовить солнечные элементы на основе тонких пленок твер-

дых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  и исследовать их фотоэлектрические свойства.

**Объектом исследования** являются тонкие пленки твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  выращенные методом двухстадийной селенизации.

**Предметом исследования** являются физико-химические свойства тонких пленок, поверхностно барьерных структур, солнечных элементов на основе тонких пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ .

**Область исследования** полупроводниковые твердые растворы системы  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ .

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

Теоретической основой исследования является системный междисциплинарный подход, позволяющий использовать теоретические положения физики твердого тела.

В качестве **научной гипотезы исследования** выдвигается тезис о получении однородных тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  с размерами зерна не менее 2 мкм.

**Методологическую основу исследования** составили работы отечественных и зарубежных ученых, разрабатывающих проблемы получения тонких пленок твердых растворов различных полупроводниковых материалов.

#### **Информационная база исследования**

Диаграмма состояния системы  $CuInSe_2-2ZnSe$ . Сведения о физических свойствах пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , полученных вакуумным распылением монокристаллов.

**Инструментальной базой** исследований являются микроскоп Н-800 (*Hitachi*, Япония), “*Stereoscan-360*” (Великобритания) с EDX спектрометром *AH 10000* (*Link Analytic*, Великобритания) с разрешением  $1\text{мкм}^3$  и чувствительностью 0,1 атом.%, сканирующий Оже-микронзонд РНІ-660 (*Perkin Elmer*) с локальностью 0,1мкм и чувствительностью 0,1 ат. % на ионном микронзонде *IMS-4F* (*Cameca*), спектрофотометр *Cary-500 Scan* (*UV-Vis-NiRSpectrometer, Varian*, США).

#### **Научная новизна и значимость полученных результатов:**

1. Разработаны методики получения тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , основанные на использовании метода двухстадийной селенизации слоев  $ZnSe/(Cu-In)$ . Определены оптимальные условия синтеза тонких пленок методом двухстадийной селенизации (первая стадия 240 – 270 °С в течение 10-30 минут, вторая стадия – при температурах 460 – 540 °С в течение 10-50 минут). Установлен характер влияния натрия на микроструктурные свойства пленок.

2. На полученных пленках исследованы коэффициент оптического поглощения в области края фундаментального поглощения ( $\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$ ). По спектрам пропускания установлена зависимость ширины запрещенной зоны в зависимости от содержания цинка в пленках (1,02 – 1,23 эВ), зависимости удельного сопротивления и термоэдс от содержания цинка.

3. На основе полученных пленок *CIZS* разработаны конструкции поверхностно-барьерных структур типа: пленка *CIZS*-металлический индий. Для лучших структур *In/p-CIZS* максимальная вольтовая фоточувствительность достигала значений  $SU_m \approx 1200 \text{ В/Вт}$ , максимальная абсолютная токовая фоточувствительность 2.7 мА/Вт.

4. Создана математическая модель солнечных элементов структуры стекло/*Mo/CIZS/CdS/ZnO/Ni-Al*. Исследован характер влияния основных параметров (ширины запрещенной зоны, толщины слоя, сопротивления) поглощающего слоя на параметры солнечного элемента. На основании полученных данных сделан вывод об оптимальном элементном составе пленок (содержание цинка более 19 ат% и селена более 50 ат%).

5. Созданы образцы солнечных элементов структуры стекло/*Mo/CIZS/CdS/ZnO/Ni-Al*. Проведены исследования фотоэлектрических характеристик солнечных элементов с использованием автоматизированного комплекса при освещении AM1.5 (1000 Вт/м<sup>2</sup>) согласно Европейскому стандарту тестирования фотопреобразователей. Анализ результатов показал, что добавка цинка 19 – 21 ат% позволяет получать тонкопленочные солнечные элементы на основе слоев *CIZS* с выходными электрическими параметрами ( $U_{oc} = 0,548 \text{ В}$ ,  $I_{кз} = 31,12 \text{ мА/см}^2$ ,  $FF = 53,6 \%$ , КПД = 9,106 %).

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

1. Методика получения тонких пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , связанная с термическим испарением *ZnSe/Cu-In* и последующей термической обработкой их в парах селена, переносимых потоком инертного газа. Способ позволяет формировать слои данных материалов, которые по своим микроструктурным, оптическим и электрическим свойствам пригодны для изготовления высокоэффективных тонкопленочных фотопреобразователей.

2. Экспериментально установленные физико-химические параметры выращенных тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , что позволило получить зависимости коэффициента пропускания, удельного сопротивления, коэффициента термоэдс материалов в зависимости от элементного состава тонких пленок.

3. Экспериментально установленные фотоэлектрические свойства тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , что позволило установить характер фоточувствительности тонких пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  получить фотоэлектрические преобразователи энергии чувствительностью 1200 В/Вт.

4. Математическая модель тонкопленочных преобразователей структуры стекло/*Mo/Cu<sub>x</sub>In<sub>x</sub>Zn<sub>2-2x</sub>Se<sub>2</sub>/CdS/ZnO/Ni-Al*, позволяющая определить оптимальный элементный состав тонких пленок *Cu<sub>x</sub>In<sub>x</sub>Zn<sub>2-2x</sub>Se<sub>2</sub>* для формирования наилучших образцов преобразователей.

**Теоретическая значимость работы обусловлена ее новизной и заключается:**

– разработана методика двухстадийной селенизации прекурсоров *ZnSe/Cu-In* для получения тонких пленок твердых растворов *Cu<sub>x</sub>In<sub>x</sub>Zn<sub>2-2x</sub>Se<sub>2</sub>*.

– получило дальнейшее развитие теоретического уровня современных исследований в области получения тонких пленок полупроводниковых твердых растворов.

– результаты исследований позволили расширить основы для теоретического анализа в области материаловедения.

**Практическая значимость:**

– полученные результаты позволили выработать новые требования к методам получения тонких пленок твердых растворов *Cu<sub>x</sub>In<sub>x</sub>Zn<sub>2-2x</sub>Se<sub>2</sub>*, определить оптимальные режимы осаждения для получения слоев с высоким структурным совершенством, малым содержанием дефектов и высоким коэффициентом оптического поглощения ( $\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$ ) в спектральной области 1,0 – 3,0 эВ.

– разработана математическая модель солнечных элементов структуры стекло/*Mo/CIZS/CdS/ZnO/Ni-Al*. Показана принципиальная возможность создания ТСЭ на основе *CIZS* с КПД более 15%, при ширине запрещенной зоны 1,2 – 1,3 эВ и толщине поглощающего слоя 1 – 2 мкм.

– проведенные исследования позволили создать солнечные элементы структуры стекло/*Mo/CIZS/CdS/ZnO/Ni-Al* с эффективностью 9,1 %.

**Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, Беларусь 18-19 марта 2014); Международная конференция «Лашкаревские чтения 2015» (Киев, Украина 6-10 апреля 2015).

**Опубликованность работы**

Опубликована 1 статья в рецензируемых журналах, 2 статьи в сборниках материалов научных конференций, 1 тезисы докладов.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обу-

словлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации – 96 страниц. Работа содержит 8 таблиц, 38 рисунков. Библиографический список включает 155 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние применения тройных полупроводниковых соединений, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, наличие публикаций, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** выполнен анализ микроструктуры, свойств, методов получения тонких пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  и солнечных элементов на основе  $CuInZnSe_2$ .

Приведена структура тройных полупроводниковых соединений  $A^I B^III C^{VI}_2$ , которые кристаллизуются в структуре халькопирита (рисунок 1).

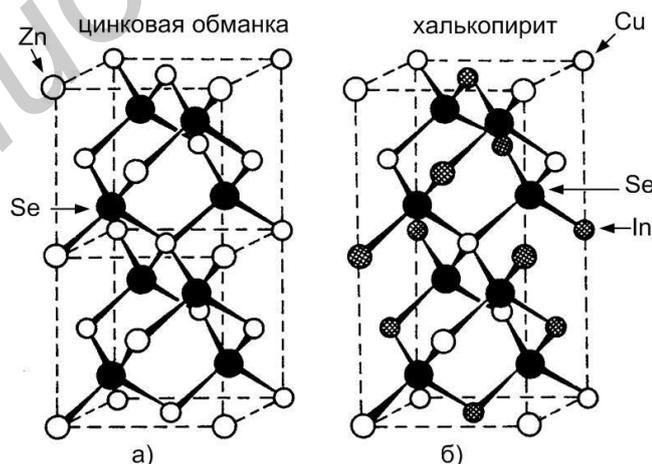


Рисунок 1 – Кристаллическая структура сфалерита (а) и халькопирита (б)

Рассмотрены основные свойства кристаллической структуры.

Изучены основные методы получения тонких пленок сложных халькопиритных медь-содержащих материалов. Дана краткая характеристика каждого метода, выделены достоинства и недостатки.

Подробно рассмотрена структура солнечного элемента на основе тонких пленок халькогенидов (рисунок 2). Приведен типовой процесс производства солнечного элемента (рисунок 3).

**Во второй главе** рассмотрен синтез тонких пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ .

Метод получения многокомпонентного слоя *CIZS*, который может быть использован в промышленном производстве, должен удовлетворять экономическим, экологическим критериям и обеспечивать высокое качество материала (оптимальный стехиометрический состав, структуру халькопирита, высокий размер зерна, необходимые тип проводимости и удельное сопротивление и т.д). Пригодным для получения пленок сложных полупроводников, содержащих легколетучие компоненты, является метод двухэтапной селенизации, который включает два отдельных технологических цикла: послойное напыление элементов  $ZnSe/(Cu-In)$  (либо  $Cu-In-Zn$ ); реакцию слоев  $ZnSe/(Cu-In)$  галогеном (селенизацию).

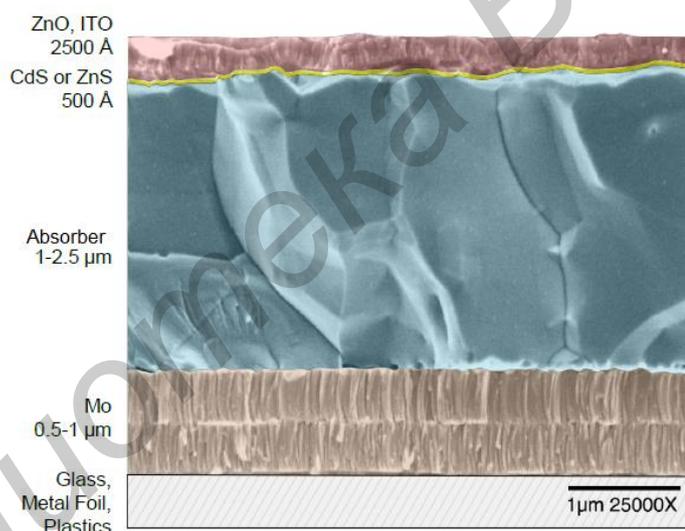


Рисунок 2 – Типовая структура ТСЭ

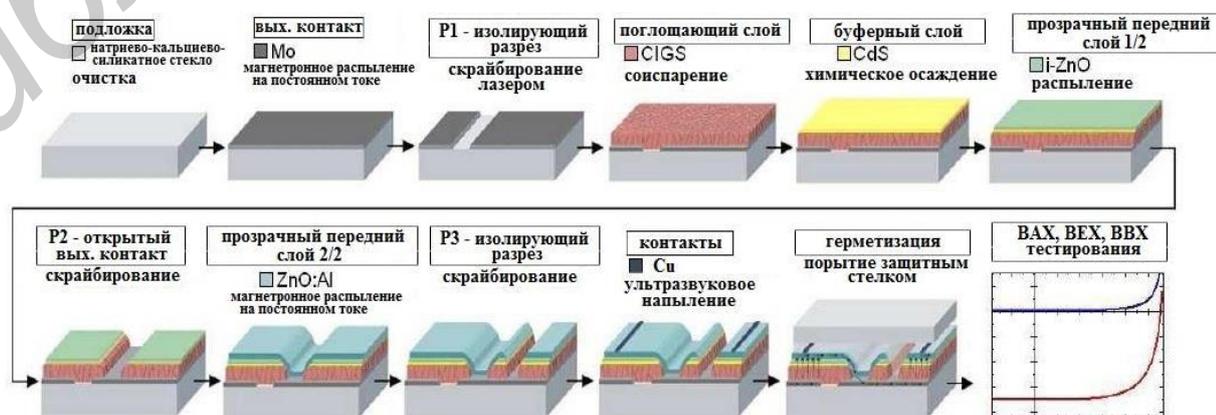


Рисунок 3 – Типовой процесс производства ТСЭ

Кристаллическая структура и фазовый состав тонких пленок  $ZnSe/(Cu-In)$  в зависимости от состава исследовались методом рентгеновского фазового анализа (РФА) в области  $2\theta = 15 \div 1000$  на  $CuK\alpha$  излучении с никелевым фильтром. Идентификация фаз в пленках проводилась сравнением межплоскостных расстояний  $d$  с данными таблиц *JCPDS*.

Приведено описание получения пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  методом селенизации слоев  $ZnSe/Cu-In$ .

Исследовано формирование фаз в пленках *CIZS*, полученных селенизацией базовых слоев  $ZnSe/(Cu+In)$  с исходным содержанием  $ZnSe$ , изменяемым в пределах от 0.1 до 0.4 мол.%. Значительное влияние на фазовый состав пленок *CIZS* оказывают время и температура рекристаллизации.

Введение в исходную пленку  $Na$  приводит к улучшению микро-структурных характеристик пленок.

**В третьей главе** исследованы оптические, электрические и фотоэлектрические свойства пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ .

Исследования оптических характеристик слоев *CIZS* показали, что материалы характеризуются прямыми межзонными переходами и имеют коэффициент оптического поглощения  $\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$  в области края фундаментального поглощения.

Исследования электрических характеристик слоев *CIZS* показали, что при изменении концентраций металлов и селена в образцах можно получать пленки с величинами удельного сопротивления и термоэдс, удовлетворяющие требованиям для создания высокоэффективных солнечных элементов.

Показано, что оптическая ширина запрещенной зоны пленок *CIZS* с увеличением содержания цинка смещается в длинноволновую область и для ряда исследованных образцов изменяется в пределах 1.02–1.23 эВ.

Исследования спектров фотолюминесценции пленок *CIZS* показало, что введение атомов цинка в  $CuInSe_2$  приводит к образованию собственных дефектов замещения типа атом цинка на месте атома меди ( $Zn_{Cu}$ ) и атом цинка на месте атома индия ( $Zn_{In}$ ), которые проявляются в спектрах фотолюминесценции.

Показано, что для лучших структур *In/p-CIZS* при 19,6 ат.% цинка максимальная вольтовая фоточувствительность достигала значений  $S_U^m \approx 1200 \text{ В/Вт}$ , максимальная абсолютная токовая фоточувствительность 2.7 мА/Вт.

**Четвертая глава** описывает процесс создания солнечных элементов на основе  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ .

Показана принципиальная возможность создания ТСЭ на основе *CIZS* с КПД более 15%, при ширине запрещенной зоны 1,2 – 1,3 эВ и толщине поглощающего слоя 1 – 2 мкм.

Разработана технология создания тонкопленочных солнечных элементов стекло/*Mo/Cu\_xIn\_xZn\_{2-2x}Se\_2/CdS/ZnO/Ni-Al*, а также указаны методы формирования слоев и контролируемые параметры слоев солнечного элемента.

Исследование физических характеристик солнечных элементов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методики получения тонких пленок твердых растворов  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ , основанные на использовании метода двухстадийной селенизации слоев  $ZnSe/(Cu-In)$ . Определены оптимальные условия синтеза тонких пленок методом двухстадийной селенизации (первая стадия 240 – 270 °С в течение 10-30 минут, вторая стадия – при температурах 460 – 540 °С в течение 10-50 минут). Установлен характер влияния натрия на микроструктурные свойства пленок.

На полученных пленках исследованы коэффициент оптического поглощения в области края фундаментального поглощения ( $\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$ ). По спектрам пропускания установлена зависимость ширины запрещенной зоны в зависимости от содержания цинка в пленках (1,02 – 1,23 эВ), зависимости удельного сопротивления и термоэдс от содержания цинка.

На основе полученных пленок *CIZS* разработаны конструкции поверхностно-барьерных структур типа: пленка *CIZS*-металлический индий. Для лучших структур *In/p-CIZS* максимальная вольтовая фоточувствительность достигала значений  $S_U^m \approx 1200 \text{ В/Вт}$ , максимальная абсолютная токовая фоточувствительность 2.7 мА/Вт.

Создана математическая модель солнечных элементов структуры стекло/*Mo/CIZS/CdS/ZnO/Ni-Al*. Исследован характер влияния основных параметров (ширины запрещенной зоны, толщины слоя, сопротивления) поглощающего слоя на параметры солнечного элемента. На основании полученных данных сделан вывод об оптимальном элементном составе пленок (содержание цинка более 19 ат% и селена более 50 ат%).

Созданы образцы солнечных элементов структуры стекло/*Mo/CIZS/CdS/ZnO/Ni-Al*. Проведены исследования фотоэлектрических характеристик солнечных элементов с использованием автоматизированного комплекса при освещении AM1.5 (1000 Вт/м<sup>2</sup>) согласно Европейскому стандарту тестирования фотопреобразователей. Анализ результатов показал, что добавка цинка 19 – 21 ат% позволяет получать тонкопленочные солнечные элементы на основе слоев *CIZS* с выходными электрическими параметрами ( $U_{oc} = 0,548 \text{ В}$ ,  $I_{K3} = 31,12 \text{ мА/см}^2$ ,  $FF = 53,6 \%$ , КПД = 9,106 %).

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Веремейчик, А.И. Оптимизация параметров поглощающего слоя  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  для тонкопленочных солнечных элементов / В.В.Хорошко, И.Н.Цырельчук, В.Ф.Гременок, В.Б.Залесский, А.И. Веремейчик // Известия

национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2014. – №2 – С. 91-96.

2. Веремейчик, А.И. Влияние  $Na$  на микроструктурные свойства пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  / В.В. Хорошко, И.Н. Цырельчук, В.Ф. Гременок, А.М. Струц, А.И. Веремейчик // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 года) : материалы конф. в 2 ч. Ч. 2 / редкол. : А. Н. Осипов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – С. 24-25.

3. Веремейчик, А.И. Особенности синтеза пленок  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  методом селенизации слоев  $ZnSe/Cu-In$  / И.Н. Цырельчук, В.А. Мишутко, В.В. Хорошко, А.И. Веремейчик В.Ф. Гременок // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 года) : материалы конф. в 2 ч. Ч. 2 / редкол. : А. Н. Осипов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – С. 26-27

4. Веремейчик, А.И. Оптические свойства тонких пленок полупроводниковых соединений  $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$  для фотовольтаики / В.В. Хорошко, В.Ф. Гременок, И.Н. Цырельчук, В.А. Мишутко // Сборник материалов конференции молодых ученых по физике полупроводников «Лашкаревские чтения- 2015», Киев, 6-10 апреля 2015 года, Украина. – С. 81-83.