

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

УДК 539.216.2

На правах рукописи

КАРАЧУН
Родион Станиславович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ZnSe/(Cu-In) СЛОЕВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКИМ ИСПАРЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии
проектирования электронных систем»

Научный руководитель
д-р физ.-мат. наук, профессор
ГРЕМЕНОК Валерий
Феликсович

Минск 2015

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

Научный руководитель:

ГРЕМЕНОК Валерий Феликсович,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Физики твердого тела, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Рецензент:

ЗАХАРОВ Александр Георгиевич,

кандидат физико-математических наук, начальник управления подготовки кадров высшей квалификации «Белорусского государственного университета»

Защита диссертации состоится «23» января 2015 г. года в 9⁰⁰ 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, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-88, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

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

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс современной полупроводниковой электроники во многом определяется как соответствующим выбором исходных материалов для изготовления приборов, так и технологическими методами их получения. И если в начальный период становления полупроводникового приборостроения в качестве исходных материалов использовались, в основном, элементарные полупроводники (*Ge*, *Si*) и бинарные соединения (*GaAs* и др.), то в настоящее время внимание исследователей привлекают новые химические соединения и твердые растворы со свойствами полупроводников. Это обусловлено возможностью изменять их физические свойства (а значит функциональный диапазон и характеристики получаемых приборов) в широких пределах за счет управления атомным составом веществ.

Рост энергопотребления является характерной чертой экономики любого современного государства. Если ранее развитие энергетики не встречало принципиальных трудностей, поскольку увеличение производства энергии происходило в основном за счет увеличения добычи полезных ископаемых (природный газ, нефть, уголь), достаточно удобных в потреблении, то уже сегодня энергетика столкнулась с проблемой ограниченности ископаемых энергетических ресурсов.

Загрязнение окружающей среды продуктами сгорания и переработки ископаемых энергетических ресурсов, главным образом угля и ядерного топлива, является причиной ухудшения экологической обстановки на Земле. Уже при современных масштабах производства энергии возможны необратимые опасные изменения климата.

Подобными обстоятельствами определяется возрастающий интерес к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии (НВИЭ), широкое использование которых не приведет к нарушению экологического баланса Земли. К таким источникам энергии относится Солнце.

Повышенный интерес к фотоэлектрическому способу преобразования энергии обусловлен возможностью создания стабильных в эксплуатации, дешевых и высокоэффективных солнечных элементов (СЭ).

Наиболее перспективными материалами для новейшего поколения высокоэффективных, радиационно стойких и дешевых СЭ являются полупроводниковые твердые растворы $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ (CIGSS). Это обусловлено совокупностью их свойств: высокие значения показателя оптического поглощения, стабильность характеристик, чрезвычайно высокая радиационная стойкость, большой интервал возможных значений ширины запрещенной зоны (от 1,0 эВ до 2,4 эВ).

Тонкие пленки и структуры на их основе, обладают рядом уникальных физических и химических свойств не встречающихся у объемных материалов, что делает их актуальным объектом экспериментального и теоретического исследования уже не одно десятилетие.

Свойства пленок существенным образом определяются их микроструктурным строением, кристаллической структурой и кристаллографической ориентацией (текстурой), которые, в свою очередь, зависят от метода получения пленки, выбора технологических режимов напыления, материала подложки и состояния ее поверхности. Существенное влияние на свойства пленок также оказывает размерный эффект.

Так, например, использование тройных $A^I B^{III} C^{VI}_2$ и более сложных фаз с халькопиритной структурой уже позволило получить тонкопленочные солнечные элементы на основе $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS) с рекордной эффективностью до 21%.

Дальнейшее улучшение характеристик таких фотопреобразователей лежит на пути исследований взаимосвязи технологических процессов со свойствами конкретных типов структур, а также освоения новых систем на основе $A^I B^{III} C^{VI}_2$ полупроводников. В рамках этих исследований твердые растворы на основе тройных и $A^{II} B^{VI}$ ($ZnSe$, ZnS , $ZnTe$) соединений в последнее время привлекают внимание разработчиков приборов на их основе.

Вместе с тем широкому практическому применению этих материалов на сегодняшний день препятствует ряд факторов, одним из которых является технологические трудности получения структурно-совершенных пленок этих соединений, а также неполная, а иногда и противоречивая информация об их физических свойствах.

Нужно также отметить, что необходимым условием для практического применения тонких пленок и структур на их основе в твердотельных электронных устройствах является высокая повторяемость свойств получаемых пленок. На сегодняшний день наиболее распространенными методами получения тонких пленок с высокой повторяемостью свойств являются методы вакуумного осаждения. В значительной степени это обусловлено тем, что, в отличие от методов электрохимического или плазмохимического осаждения, методами вакуумного осаждения удастся получать пленки толщиной от долей нанометра до сотен нанометров с низким содержанием примесей, а подбором параметров напыления, можно легко и с высокой точностью управлять скоростью осаждения, толщиной пленки и ее физическими свойствами, в частности ее микроструктурой, кристаллической структурой и кристаллографической ориентацией.

Важным физическим параметром пленок, который определяет их свойства, независимо от метода получения, микроструктуры и кристаллического строения пленки, является толщина пленки. При этом, одним из наиболее значимых параметров микроструктуры пленки, который существенно зависит от ее толщины и определяет возможность применения пленок в различных планарных твердотельных микро — и наноструктурах и их оптимизации, является шероховатость поверхности пленки.

В последнее время приоритетным направлением в области получения пленок $A^I B^{III} C^{VI}_2$ соединений является использование двухступенчатого тех-

нологического цикла — напыление металлов или их бинарных халькогенидов (прекурсоры) с последующей их селенизацией.

Перспективность такого подхода обусловлена возможностью получения плёнок большой площади с контролируемым составом посредством хорошо развитых методов, как на первой стадии напыления, так и на второй - реакции с галогеном.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования диктуется постоянным ростом потребления энергии. И, как следствие, востребованной является экологически чистая, возобновляемая энергия.

В настоящее время ведется много разговоров о возобновляемых источниках энергии, самыми перспективными и экологически чистыми из которых считаются солнечные преобразователи.

Повышенный интерес к фотоэлектрическому способу преобразования энергии обусловлен возможностью создания стабильных в эксплуатации, дешевых и высокоэффективных солнечных элементов (СЭ).

Наиболее перспективными материалами для новейшего поколения высокоэффективных, радиационно стойких и дешевых СЭ являются полупроводниковые твердые растворы $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$. Тонкие пленки и структуры на их основе, обладают рядом уникальных физических и химических свойств не встречающихся у объемных материалов, что делает их актуальным объектом экспериментального и теоретического исследования уже не одно десятилетие.

Степень разработанности проблемы

Исследование влияния методов синтеза, полупроводниковых пленок твердых растворов, на факторы, определяющие качественные параметры проводилось на основе работ А. Фаренбруха, Е.П. Зарецкой, В.А. Иванова, И.В. Боднаря и других авторов.

Среди большого числа исследований по этой теме необходимо отметить работы И.А.Аверина, В.Ф.Гременок и М.С.Тиванова, В.Б. Залесского и Ю.В.Рудь, и прочие.

Цель и задачи исследования

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей формирования текстуры, морфологии поверхности, кристаллической структуры и фазового состава слоев $ZnSe/(Cu-In)$, наносимых методом термического испарения в зависимости от технологических режимов их получения и исследование взаимосвязи указанных свойств для определения оптимальных условий формирования пленок, предназначенных для использования в тонкопленочных солнечных элементах.

Для достижения поставленных целей в работе решаются следующие основные задачи исследования:

1. Анализ литературно-патентные источники информации по получению и исследования пленок сложных полупроводников и солнечным преобразователям на их основе.

2. Изучение методов исследования микроструктуры (морфология поверхности, кристаллическая структура и фазовый состав) тонкопленочных материалов.

3. Предложение математической модели получения базовых слоев пленок методом термического напыления.

Объектом исследования является слои $ZnSe/(Cu-In)$, полученные термическим испарением.

Предметом работы выступают микроструктурные (морфология поверхности, кристаллическая структура и фазовый состав) свойства указанных материалов. Выбор объекта и предмета исследования обусловлен перспективой использования пленок $ZnSe/(Cu-In)$ в качестве экологически чистого и недорогого поглощающего материала в тонкопленочных фотоэлектрических преобразователях.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты исследований отечественных, российских и зарубежных ученых в области материаловедения.

Решение поставленных задач основывается на использовании результатов исследований, а также физики твёрдого тела, кристаллографии, материаловедения, аппаратных средств *Microsoft Office Excel*, пакета прикладных программ *MathCAD Professional*.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обзор и классификация полупроводниковых тонких пленок, а также особенностей их получения и методов исследования, твердых растворов в качестве фотоактивного материала для создания недорогих, высоко эффективных радиационно стойких СЭ.

2. Исследование метода синтеза тонких пленок твердых растворов и методов микроструктурного анализа тонких пленок.

3. Анализ экспериментально полученных закономерностей в свойствах полупроводниковых пленок твердых растворов, полученные при синтезе методом термической обработки металлических слоев $Cu-In-Ga$ в S/Se -содержащей атмосфере инертного газа.

4. Основные выводы по магистерской диссертационной работе.

Научная новизна заключается в исследовании влияние режимов получения, при термическом напылении, тонких пленок на их микроструктуру, включая элементный и фазовый состав, распределение элементов по толщине, морфологию и топологию.

Приведенная математическая модель позволяет определить основные параметры зарождения и роста пленок многокомпонентных материалов и описать как процесс формирования пленки, полученной при различных условиях, так и ее свойства.

Практическая и теоретическая значимость изложенных в диссертационной работе научных результатов состоит в возможности создания на их основе технологических процессов получения тонких пленок на подложках. Результаты исследований представляют определенный интерес для специалистов, занимающихся технологическими разработками в опто- и микроэлектронной промышленности и т.д.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 печатных работах: из них — 2 статьи в IV Международной молодежной научно-практической конференции «Научные стремления-2013»; 2 статьи в Международной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014» и др.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 93 страницы. Работа содержит 4 таблицы, 15 рисунков. Библиографический список включает 217 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель работы и ее актуальность, определены основные задачи, указаны новизна и практическая ценность работы, изложены основные защищаемые положения и описана структура диссертации.

В первой главе приводится обзор полупроводниковых пленок сложных соединений, применяемых в фотовольтаике, а также методов формирования и исследования тонких пленок полупроводниковых сложных структур Cu-III-VI_2 и солнечных преобразователей на их основе.

Разработка способов получения тонких пленок для эффективных СЭ связана как с теоретическими, так и практическими трудностями:

- границы зерен оказывают влияние на рекомбинацию, токоперенос, диффузию и сегрегацию;

- существует проблема контактных явлений для структур из нескольких материалов ввиду необходимости электрического сопряжения различных слоев СЭ;

- недостаточно изучены точечные дефекты, образующиеся в процессе синтеза фотоактивного слоя.

При изготовлении СЭ важно оценить качество каждого из его слоев на этапе нанесения с тем, чтобы реально представлять их кристаллическую структуру, химический состав, оптические и электрические свойства. Для

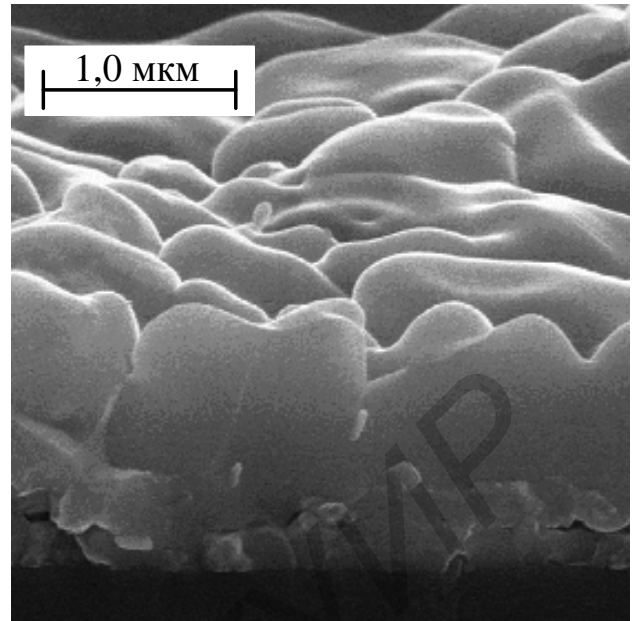
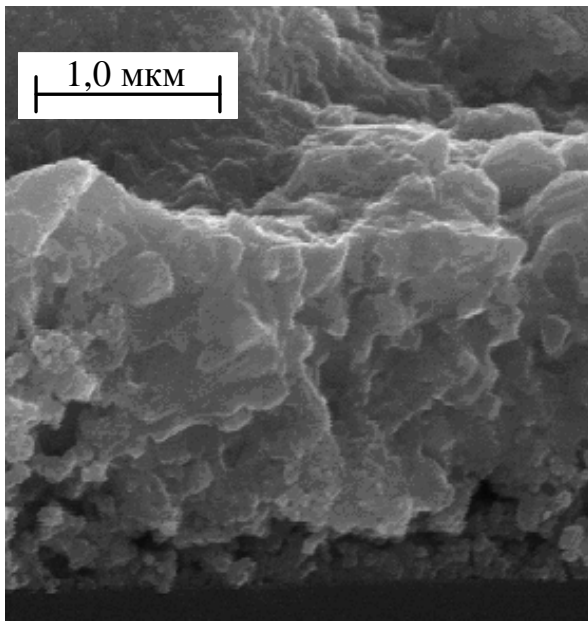
оценки качества пленок, составляющих структуру СЭ, возможно применение целого ряда оптических, электрических, рентгеновских и др. исследований, которые описываются в первой главе.

Во второй главе представлено краткое описание методов, использованных в данной работе, а именно — электронная Ожэ-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ), оптическая спектроскопия твердых тел и дифференциальная отражательная спектроскопия (ДОС), фотолюминесцентная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), метод атомной силовой микроскопии (АСМ), метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Приведены схемы экспериментальных установок, методы очистки образцов, схемы ростовых экспериментов и методики расчета оптических функций тонких пленок.

В третьей главе представлена общая схема ростовых экспериментов по формированию пленочных структур.

Выше было показано, что частичное замещение серой селена приводит к выравниванию профиля $Ga/(In+Ga)$ — распределения по глубине слоя. Однако такое замещение приводит к уменьшению размеров зерен пленок $CIGSS$. Это, вероятно, связано с большей реакционной способностью серы и сульфидов металлов, чем селена и селенидов, приводящей к большей скорости образования зародышей кристаллов и, как следствие, к уменьшению их размеров. Увеличения размеров зерен можно добиться повышением температуры стадии рекристаллизации, т.к. повышение температуры приводит к активации диффузии компонентов твердого раствора, т.е. к большей скорости роста кристаллов и, как следствие, к увеличению размеров зерен синтезированных пленок (рисунок 1).

Таким образом, несмотря на то, что частичное замещение серой селена приводит к измельчению зеренной структуры, зеренная структура пленок $CIGSS$, синтезированных при температуре рекристаллизации 500- 550 °С, соответствует известным критериям создания высокоэффективных тонкопленочных СЭ. При температуре синтеза 500-550 °С формируются тонкие пленки твердых растворов $CIGSS$, состоящие из плотноупакованных зерен с размерами, сравнимыми с толщиной пленки (рисунок 1 (б)).



а

б

Рисунок 1 — Типичные изображения скола пленок CIGSS, синтезированных при температуре 400 °С (а) и 500 °С (б)

На основании проведенных исследований фазового состава, распределения элементного состава по глубине слоя и микроструктуры пленок $Cu(In,Ga)Se_2$ и $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, полученных методом термической обработки слоев $Cu-In-Ga$ в парах S/Se в температурном интервале 340-580 °С, можно сделать следующие выводы:

- на рентгенограммах пленок, синтезированных при температурах 340 – 400 °С наблюдаются линии, соответствующие рефлексам соединений $CuInSe_2$ и $CuInS_2$ со структурой халькопирита и рефлексам бинарных фаз халькогенидов металлов, что свидетельствует об образовании неоднородных пленок; при температурах 400 – 500 °С – линии, соответствующие рефлексам твердого раствора $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ со структурой халькопирита, что свидетельствует о растворении компонентов и образовании однофазных пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ с неупорядоченной, т.к. отсутствуют сверхструктурные рефлексы, структурой халькопирита; при температурах 500 – 550 °С – линии, соответствующие рефлексам твердого раствора $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ со структурой халькопирита и сверхструктурным рефлексам халькопирита, что свидетельствует об образовании однофазных пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ с упорядоченной структурой халькопирита;

- для пленок, синтезированных при 400 °С, соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у подложки превышает соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у поверхности для пленок $Cu(In,Ga)Se_2$ в 50-60 раз, для пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ — в 5-7 раз, при этом для пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, синтезированных при температурах 500-550 °С, соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у подложки превышает соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у поверхности в 1,5-2 раза;

– пленки, синтезированные при температурах 500-550 °С, характеризуются плотной упаковкой зерен, размеры которых сравнимыми с толщиной пленок; а при температурах свыше 550 °С — наличием микропор и микро-трещин;

– профиль ширины запрещенной зоны по глубине слоя зависит как от температуры синтеза, так и от соотношения $S/(S+Se)$ в полученных пленках. Повышение содержания серы, также как и повышение температуры синтеза, приводит к выравниванию профиля ширины запрещенной зоны по глубине слоя. В то же время, повышение содержания серы приводит также и к общему увеличению ширины запрещенной зоны;

– используемый метод синтеза позволяет получать тонкие пленки $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ с различным профилем ширины запрещенной зоны по глубине слоя, определяемым температурой синтеза (рекристаллизации) и элементным составом пленок (составом базового слоя, соотношением парциальных давлений серы и селена в процессе термической обработки слоев $Cu-In-Ga$ в парах S/Se);

– частичное замещение селена серой приводит к уменьшению размеров зерен пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, однако повышение температуры синтеза (стадии рекристаллизации) приводит к увеличению размеров зерен. Таким образом, несмотря на то, что частичное замещение серой селена приводит к измельчению зёрненной структуры, зёрненная структура пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, синтезированных при температурах 500-550 °С, соответствует известным критериям создания высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов.

Также представлена математическая модель процесса роста базовых слоев полупроводниковых пленок методом термического испарения. Представленная модель позволяет определить основные параметры зарождения и роста пленок многокомпонентных материалов и описать как процесс формирования пленки, полученной при различных условиях синтеза в варианте метода термического испарения в вакууме, так и ее свойства.

С практической точки зрения описанный метод получения пленок может быть использован, например, в производстве солнечных элементов для синтеза халькопиритных пленок $CuInSe_2$, $Cu(In,Ga)Se_2$, $CuGaSe_2$, применяемых в качестве светопоглощающего слоя СЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пленках $Cu(In,Ga)Se_2$ и $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, полученных методом термической обработки слоев $Cu-In-Ga$ в парах S/Se в температурном интервале 400 – 550 °С, методами рентгеновской дисперсионной спектроскопии и оже-спектроскопии при послойном стравливании обнаружено, что:

– для пленок, синтезированных при 400 °С, соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у подложки превышает соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у поверхности для $Cu(In,Ga)Se_2$ в 50-60 раз, для $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ — в 5-7 раз;

– для пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, синтезированных при температурах 500-550 °С, соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у подложки превышает соотношение компонентов $Ga/(In+Ga)$ у поверхности в 1,5-2 раза.

На основании этого установлено, что сегрегация галлия у подложки подавляется как вследствие частичного замещения селена серой, так и вследствие повышения температуры синтеза. Следовательно, для создания солнечных элементов использование пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ технологически более предпочтительно, чем пленок $Cu(In,Ga)Se_2$.

В пленках $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ методами рентгеновского фазового анализа и сканирующей электронной микроскопии обнаружено, что:

На рентгенограммах пленок, синтезированных при температурах 340-400 °С наблюдаются линии, соответствующие рефлексам соединений $CuInSe_2$ и $CuInS_2$ и рефлексам бинарных фаз халькогенидов металлов; при температурах 400-500 °С — линии, соответствующие рефлексам твердого раствора $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ со структурой халькопирита; при температурах 500-550 °С — линии, соответствующие рефлексам твердого раствора $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ со структурой халькопирита и сверхструктурным рефлексам халькопирита;

Пленки, синтезированные при температурах 500-550 °С, характеризуются плотной упаковкой зерен, размеры которых сравнимы с толщиной пленок; а при температурах 550-580 °С — наличием микропор и микротрещин.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что при увеличении температуры синтеза от 340 °С до 500 °С происходит взаимное растворение компонентов твердого раствора, завершающееся при температуре 500 °С. При температурах 500-550 °С формируются пленки с упорядоченной структурой халькопирита, состоящие из плотноупакованных зерен с размерами, сравнимыми с толщиной пленки, что соответствует известным критериям создания эффективных солнечных элементов. При температурах свыше 550 °С начинаются процессы структурной деградации пленок. Таким образом, оптимальная температура синтеза, позволяющая формировать однофазные пленки $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ с наиболее однородным распределением компонентов по глубине слоя, согласно выводу 1, и плотноупакованными зернами с размерами, сравнимыми с толщиной пленки, составляет 500-550 °С.

На основе результатов измерений спектров оптического пропускания пленок $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ и спектральных зависимостей фототока барьерных структур $In/Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ обнаружено, что в пленках $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, полученных при оптимизированных технологических режимах с соотношением компонентов $Ga/(In+Ga)$ от 0,02 до 0,07 и $S/(S+Se)$ от 0,44 до 0,88 молярных долей, длинноволновый край спектральных зависимостей показателя поглощения $\alpha(h\nu)$ материала пленок и относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(h\nu)$ структур линеаризуется в координатах $(\alpha \cdot h\nu)^2 - (h\nu)$ и $(\eta \cdot h\nu)^2 - (h\nu)$, соответственно, что указывает на преобладание прямых межзонных переходов носителей заряда. Обнаружено также, что значение крутизны $S = \delta(\ln\eta)/\delta(h\nu)$ длинноволнового края фоточувствительности

структур достигает $23-25 \text{ \AA}^{-1}$, что также характерно для прямых межзонных переходов. Это указывает на перспективность синтезированных пленок для создания на их основе эффективных солнечных элементов.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

[1-А]. Карачун, Р.С. Получение и исследование кристаллической структуры слоев $ZnSe/(Cu-In)$, полученных термическим испарением / Р.С. Карачун // Научные стремления - 2013 : материалы Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых, Минск, Респ. Беларусь, 3-6 декабря 2013 г. / Совет молодых ученых Национальной академии наук Беларуси. - Минск: «ЭНЦИКЛОПЕДИКС», 2013.

[2-А]. Инякин, А.В., Карачун, Р.С. Получение и исследование оптических свойств тонких пленок твердых растворов $Cu(In, Ga)(S, Se)_2$ / А.В. Инякин, Р.С. Карачун.

[3-А]. Инякин, А.В. Оптические свойства тонких пленок твердых растворов $Cu(In, Ga)(S, Se)_2$ / А.В. Инякин, Р.С. Карачун // Научные стремления - 2013 : материалы Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых, Минск, Респ. Беларусь, 3-6 декабря 2013 г. / Совет молодых ученых Национальной академии наук Беларуси. - Минск: «ЭНЦИКЛОПЕДИКС», 2013. - С.302-305.

[4-А]. Инякин, А. В. Методика исследования кристаллической структуры и фазового состава пленок // А.В. Инякин, Р.С. Карачун // РТ-2014

[5-А]. Инякин, А В Исследование структурно-морфологических свойств слоев $ZnSe/(Cu-In)$, полученных термическим испарением/А.В. Инякин, Р.С. Карачун // РТ-2014