

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

УДК 621.315.592

На правах рукописи

ИНЯКИН
Александр Вячеславович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
 $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})(\text{S},\text{Se})_2$**

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

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. Кроме того, нефть, газ и уголь являются ценнейшим сырьем для интенсивно развивающейся химической промышленности. Поэтому сохранять высокие темпы развития энергетики путем использования лишь традиционных ископаемых источников энергии становится все труднее.

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 [1, 2]. Большинство НВИЭ – гидроэнергия, механическая и тепловая энергия Мирового океана, ветровая и геотермальная энергия – характеризуются либо ограниченным потенциалом, либо значительными трудностями широкого использования. Но существует еще один источник энергии – Солнце. Интегральный поток солнечного излучения, входящего в атмосферу Земли, составляет величину около $2 \cdot 10^{17}$ Вт. В то же время, суммарная установленная мощность всех электростанций мира не превышает $3 \cdot 10^{12}$ Вт, т.е. почти в 100 тысяч раз меньше. Использование этого вида энергии не связано с загрязнением окружающей среды и нарушением теплового баланса планеты. Повышенный интерес к фотоэлектрическому способу преобразования энергии обусловлен возможностью создания стабильных в эксплуатации, дешевых и высокоэффективных солнечных элементов (СЭ). СЭ имеют как преимущества, так и недостатки.

- Среди основных преимуществ выделим:
- прямое преобразование энергии солнечного излучения в электроэнергию;
- неограниченность запаса солнечной энергии по сравнению с текущими потребностями человечества;
- экологическая безопасность;
- возможность децентрализованного производства энергии, что позволяет сократить протяженность линий электропередач;
- возможность интеграции в строения (стены, крыши);
- высокая надежность;

- отсутствие движущихся частей, что упрощает обслуживание и увеличивает срок службы (вероятно, он будет достигать порядка сотни лет);
- не требуется высокая квалификация обслуживающего персонала;
- возможность создания установок любой мощности простым наращиванием количества СЭ.

– К основным недостаткам СЭ можно отнести:

- зависимость уровня вырабатываемой энергии от освещенности, что требует аккумулирования электроэнергии от СЭ для ее последующего использования в условиях недостаточной освещенности;

- высокая себестоимость получаемой электроэнергии.

Снижение стоимости и повышение КПД СЭ возможно как за счет разработки новых перспективных материалов, так и за счет оптимизации конструкции и производства СЭ.

Наиболее перспективными материалами для новейшего поколения высокоэффективных, радиационно стойких и дешевых СЭ являются полупроводниковые твердые растворы $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})(\text{S},\text{Se})_2$ (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). На основе $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) созданы лабораторные образцы тонкопленочных СЭ с КПД свыше 20 %, а также пилотные линии по производству таких СЭ и их модулей.

Применение тонких пленок твердых растворов CIGSS для создания поглощающего слоя СЭ предпочтительнее, чем Si, GaAs, CdTe и т.д., поскольку в определенной степени позволяет управление зонной структурой материала посредством варьирования соотношений компонент состава. В качестве основной технологии получения тонких однофазных пленок CIGSS до недавнего времени выступал метод вакуумного соиспарения Cu, In, Ga, S и Se. Однако для промышленного производства тонких пленок CIGSS данный метод не пригоден ввиду его высокой стоимости и сложности контроля технологических параметров (особенно при получении пленок большой площади). Наиболее привлекательным с этой точки зрения считается метод селенизации металлических пленок Cu-In-Ga в атмосфере $\text{H}_2\text{Se}/\text{Ar}$ с последующим этапом сульфидизации в атмосфере $\text{H}_2\text{S}/\text{Ar}$. Основная проблема этого метода заключается в высокой токсичности используемых газов H_2Se и H_2S . Еще одним недостатком метода является сегрегация Ga у подложки, обусловленная различными реакционными коэффициентами образования селенидов металлов (Cu, In и Ga) и затрудняющая получение как однофазных тонких пленок, так и структур с заданной по глубине шириной запрещенной зоны, что не позволяет управлять зонной структурой материала в фотоактивной области СЭ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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.

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.Гременка и М.С.Тиванова, В.Б. Залесского, Ю.В..Рудь и прочие.

Цель и задачи исследования

Цель работы заключалась в выявлении взаимосвязи фотовольтаических характеристик пленок $Cu(In_xGa_{1-x})(S,Se)_2$, в зависимости от элементного состава и режима синтеза.

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

1. Анализ литературно-патентные источников информации по получению и исследования полупроводниковых пленок твердых растворов и солнечным преобразователям на их основе.

2. Изучение методов исследования тонких пленок $Cu(In_xGa_{1-x})(S,Se)_2$ и солнечных элементов.

3. Изучение фазового состава и профиля ширины запрещенной зоны по глубине пленок твердых растворов. Влияние параметров синтеза на размеры зерен.

4. Анализ электрических и оптических свойств тонких пленок твердых растворов $Cu(In_xGa_{1-x})(S,Se)_2$.

Объектом исследования фотовольтаических характеристик пленок твердых растворов $Cu(In_xGa_{1-x})(S,Se)_2$, полученных методом термической об-

работки металлических слоев *Cu-In-Ga* в *S/Se*-содержащей атмосфере инертного газа.

Предметом работы выступают работы выступают факторы, определяющие технологическое развитие методов синтеза твердых растворов полупроводниковых пленок для высокоэффективных солнечных элементов.

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 известных исследований, отечественных, российских и зарубежных ученых в области материаловедения и влияния факторов исследования на научно-технический прогресс.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Классификация теоретических подходов в области использования тонких пленок твердых растворов в качестве фотоактивного материала для создания недорогих, высоко эффективных радиационно стойких СЭ.

2. Исследование метода синтеза тонких пленок твердых растворов, который в отличие от существующих позволяет решить задачи сформулированные в данной работе.

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

4. Исследование электрических и оптических свойств тонких пленок при определенных технологических параметрах.

Научная новизна заключается в выявлении взаимосвязи электрических и оптических характеристик пленок $Cu(In_xGa_{1-x})(S,Se)_2$, в зависимости от элементного состава и режима синтеза.

Практическая и теоретическая значимость изложенных в диссертационной работе научных результатов состоит в возможности создания на их основе технологических разработок процесса образования 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-практическую 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 введе-

ния, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации — 109 страницы. Работа содержит 4 таблицы, 43 рисунка. Библиографический список включает 187 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 $Cu-II-VI_2$ 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 $Gal/(In+Ga)$ — 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.

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 выше 550 °С — наличием микропор и микротрещин;

– 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 линейризуется 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 эВ⁻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]. Инякин, А.В. Оптические свойства тонких пленок твердых растворов $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ / 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.

[2–А]. Инякин, А.В. Получение фоточувствительности структур пленок $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ термообработкой в парах S и Se / А.В. Инякин // 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.299–301.

[3–А]. Инякин, А.В. Микроструктура пленок $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ для тонкопленочных фотопреобразователей / А.В. Инякин // Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники г. Минск, Республика Беларусь 6-10 мая 2013. – С. 299

[4–А]. Инякин, А В Методика исследования кристаллической структуры и фазового состава пленок /А.В. Инякин, Р.С. Карачун // Материалы 10-ой международной молодежной научно-технической конференции /РТ-2014 Севастополь, 12 — 17 мая 2014 г – С. 195

[5–А]. Инякин, А В Исследование структурно-морфологических свойств слоев $\text{ZnSe}/(\text{Cu-In})$, полученных термическим испарением/А.В. Инякин, Р.С. Карачун // Материалы 10-ой международной молодежной научно-технической конференции /РТ-2014 Севастополь, 12 — 17 мая 2014 г – С. 189