

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

УДК 539.216.2+681.782.473

На правах рукописи

СЕРЕДА
Александр Сергеевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
(CuInSe₂)_x-(2ZnSe)_{1-x} И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
НА ИХ ОСНОВЕ НА ГИБКИХ ПОДЛОЖКАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 – Технология приборостроения

Минск 2016

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

Научный руководитель:

Гременок Валерия Феликсович,
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лаборатории «Физики твердого тела» Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Рецензент:

Казека Александр Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент, начальник отдела студенческой науки и магистратуры учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «24» июня 2016 г. года в 09⁰⁰ 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.: 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

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

СОГЛАСОВАНО:

_____ В.Ф. Гременок
« _____ » _____ 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Важной частью любого фотопреобразователя является активный поглощающий слой. На сегодняшний день большой интерес вызывают алмазоподобные полупроводники благодаря сочетанию важных полупроводниковых свойств – высокой подвижности носителей тока, фото и термоэлектрических свойств, малой теплопроводности.

Из указанного класса соединений перспективными для применения в качестве активного слоя полупроводниковых оптоэлектронных приборов являются CuInSe_2 и его твердые растворы $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$. Соединение CuInSe_2 образуется в разрезе $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$ и кристаллизуется в структуре халькопирита, элементарную ячейку которого можно представить, как удвоенную по высоте элементарную ячейку сфалерита (цинковая обманка). Интерес к системе $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ вызван следующими факторами: слои $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ 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 ; коэффициент оптического поглощения $\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$, что обеспечивает высокую поглощающую способность падающего излучения и возможность создания тонкопленочных фотопреобразователей на основе слоев $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$; $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ высокодефектные структуры, поэтому обладают высокой радиационной стойкостью. Указанные свойства обуславливают перспективность исследований тонких пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ при реализации различных технических устройств: фотодетекторов естественного излучения, высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов.

Учёными из разных стран получены результаты в таких областях, как получение монокристаллов твёрдых растворов, микроструктурные и оптические свойства $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ (И.В. Боднар, Чибусова Л.В.); получение тонких пленок, микроструктурные, оптические, электрические свойства, а также получение фотопреобразователей на основе $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ (В.Ф. Гременок, В.Б. Залесский, В.А. Иванов, Е.П. Зарецкая); фотоэлектрические свойства тонких пленок (В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь); перспективность применения $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ в качестве активного слоя фотопреобразователей солнечного излучения (*W. Shmitz, K. Bente, S. Wagner*).

Силикатное стекло (*Soda lime glass*) является наиболее интересным, и соответственно, предпочтительным материалом для промышленного производства жестких модулей фотопреобразователей, поскольку полностью удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к подложке. Главным и наиболее серьезным недостатком стеклянных подложек является их низкая механическая прочность и негибкость, что значительно ограничивает область применения. Замещение хорошо известного силикатного стекла альтернативными, гибкими материалами без потери качества и создания дополнительных технологических проблем является не простой задачей, в особенности без существенного влияния на эффективность преобразования.

Вместе с тем широкому практическому применению этих материалов на сегодняшний день препятствует ряд факторов, одним из которых является технологические трудности получения однородных пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$, а также неполная информация об их физических свойствах.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Производство оптоэлектронных приборов и солнечных элементов является отдельным направлением науки и промышленности уже более 20 лет. Постоянно увеличивается номенклатура выпускаемых устройств, улучшаются их характеристики. Это происходит за счёт использования новых материалов и усовершенствования технологии производства уже известных.

Применение тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ в качестве материала, используемого как активный слой фотопреобразователя, является перспективным направлением.

Высокоэффективные тонкие, легкие модули на гибких подложках позволят избежать все недостатки тонкопленочных солнечных элементов на подложке из силикатного связаных с механической прочностью.

Таким образом, актуальным является создание оптоэлектронных приборов на основе тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$, реализованных на гибких подложках.

Степень разработанности проблемы

В современных исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, подтверждающие возможность применения $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ как активного слоя полупроводниковых оптоэлектронных приборов. Боднарь И.В., Чибусова Л.В., Гременок В.Ф., Залеский В.Б., Иванов В.А., Зарецкая Е.П., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. в своих работах исследовали монокристаллов твёрдых растворов $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$, микроструктурные и оптические свойства. Несмотря на большое количество исследований в данном направлении, отсутствует полная информация об физических свойствах пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в анализе микроструктуры и свойств $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$, изучении процесса формирования пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$; разработке методики изготовления тонкопленочных солнечных элементов на основе $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие основные задачи:**

1. Изучить формирование тонких пленок твердых растворов $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ методом селенизации базовых слоев $\text{ZnSe}/\text{Cu-In}$ в парах селена, переносимых потоком азота.

2. Проанализировать электрические и фотолюминесцентные свойства пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ полученных на металлических фольгах.

3. Разработать методику формирования гетероструктур (подложка/ $\text{Mo}/(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$).

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

В основу работы легли исследования ученых в таких областях, как получение монокристаллов твёрдых растворов, формирование тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$, микроструктурные, оптические, электрические, фотоэлектрические свойства тонких пленок, создание фотопреобразователей на основе пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, предоставляемой производителями микроконтроллеров, технических нормативно-правовых актов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке последовательности действия при получении подложек для создания тонкопленочных солнечных элементов и приборов на основе $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$.

Теоретическая значимость: рассмотрены вопросы, связанные с формированием тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$ и фоточувствительных структур, где $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$ используется в качестве активного поглощающего слоя. Обоснованы условия получения пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$, позволяющие сформировать однородные по толщине и площади тонкие пленки с необходимыми физическими характеристиками.

Практическая значимость работы заключается в том, что установленные зависимости изменения морфологии тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$ от температурных режимов и материалов подложки могут использоваться для разработки методик получения тонких пленок и приборов на их основе.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальное обоснование режима формирования пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$, получаемых при термической обработке базовых слоев ZnSe/Cu-In в парах селена, переносимых потоком азота, при температурах 240 – 270 °С в течение 25–30 минут на первой стадии, на второй стадии – при температурах 500 – 510 °С в течение 35 – 40 минут, позволяющего получать однородные тонкие пленки.

2. Установление закономерностей изменения кристаллов тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$ от температурных режимов, что важно для практического применения при конструировании оптоэлектронных приборов, в частности, в качестве поглощающих слоев для тонкопленочных солнечных элементов.

3. Методика формирования гетероструктур (подложка (Ti, АОА, нерж. сталь)/Mo/ $(\text{CuInSe}_2)_x-(\text{ZnSe})_{1-x}$) позволяющая реализовать вариант производства *in-line* методом.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты работы по теме диссертации были представлены на 11-й Международной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, РТ-2015» (г. Севастополь, Российская Федерация, 2015 г.), 52-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2016 г.).

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах. В их числе 1 статья в сборнике материалов научной конференции, 3 тезиса докладов на научных конференциях, 2 статьи в научных журналах.

Основные положения диссертации и результаты исследования изложены в шести опубликованных работах общим объемом 13 страниц.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения и библиографического списка.

В первой главе представлен обзор литературных источников. Рассмотрены результаты исследований кристаллической структуры тонких пленок и кристаллов $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$. Рассмотрена конструкция фоточувствительного элемента *Мо/поглощающая пленка/CdS/ZnO/Ni-Al* и последовательность операций при изготовлении фотопреобразователя. **Во второй главе** представлены методы, оборудование, применяющиеся при исследовании пленок $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ и фоточувствительных структур *Мо/Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se₂/CdS/ZnO/Ni-Al*. Рассмотрены методы изучения микроструктуры, электрических свойств тонких пленок, контроля параметров солнечных элементов. **В третьей главе** описан процесс формирования пленок $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$. Рассмотрены требования и методы подготовки гибких подложек, приведены температурные режимы получения пленок $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$. **В четвертой главе** описан процесс действия при изготовлении приборов на тонких пленках $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$.

Общий объем диссертационной работы составляет 109 страниц. Из них 75 страницы основного текста, 35 иллюстраций, 8 таблиц, библиографический список из 85 наименований, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований на 1 странице, 3 приложения на 16 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описаны соединения алмазоподобных полупроводников, которые на сегодняшний день вызывают максимальный интерес, а также обоснована актуальность темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** представлена актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи

диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимости исследований, а также апробация работы.

В первой главе представлен обзор литературных источников. Рассмотрены результаты исследований кристаллической структуры тонких пленок и кристаллов $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$. Проведён анализ методов получения тонких пленок халькопиритных медь-содержащих материалов. Рассмотрена конструкция тонкопленочного солнечного элемента и последовательность операций при изготовлении фотопреобразователя.

Во второй главе представлены методы, оборудование и программное обеспечение, использованные при исследовании свойств пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$. При изучении микроструктуры полученных пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ использовались такие методы как рентгеновская дифракция и рентгеноспектральный микроанализ с применением современного оборудования и программного обеспечения для обработки полученных данных. Измерение удельного сопротивления образцов проводилось по методу Ван-дер-Пау, позволяющему исключить погрешность, связанную с контактным сопротивлением, а также не требующий введения дополнительных поправок на геометрические параметры образцов.

В третьей главе рассматривается формирование тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ на гибких подложках.

Шероховатость поверхности металлических фольг может приводить к нарушению структурного совершенства и уменьшению шунтирующего сопротивления СЭ и, соответственно, снижению КПД. Поэтому важным является качество подготовки поверхности металлических фольг.

Для получения высококачественных тонких пленок $\text{Cu}(\text{In}, \text{Zn})\text{Se}_2$ методом селенизации необходимо поддержание точного соотношения элементарных компонент в базовых слоях Cu-In . В частности, соиспарение и последующая селенизация прекурсоров Cu-In-Zn представляется наиболее предпочтительным промышленным процессом для нанесения тонких плёнок.

Селенизация Cu-In , Cu-In-Ga и Cu-In-ZnSe базовых слоев осуществляется путем диффузии элементарного селена из твердотельного источника Se в проточной атмосфере инертного газа N_2 с использованием трехступенчатого температурного профиля. Первая стадия селенизации осуществляется при температуре 250 – 270 °С в течение 10 – 30 минут, вторая стадия – при температурах 470 – 500 °С в течение 10 – 50 минут.

После создания инертной газовой атмосферы при совместном нагревании металлических плёнок и селена в квазизамкнутой системе, создаваемой в зазоре между лодочкой с помещенными в нее гранулами селена и селенизируемой подложкой, протекают следующие физико-химические процессы:

1. При достижении системой температуры 160 °С в селенизируемой пленке происходит плавление In ($T_{nl} = 156.6$ °С), в результате чего образуется новая фаза, содержащая жидкий индий и кристаллическую медь при избытке жидкого индия на поверхности (плотность индия 7.31 г/см³, плотность меди 8.94 г/см³);

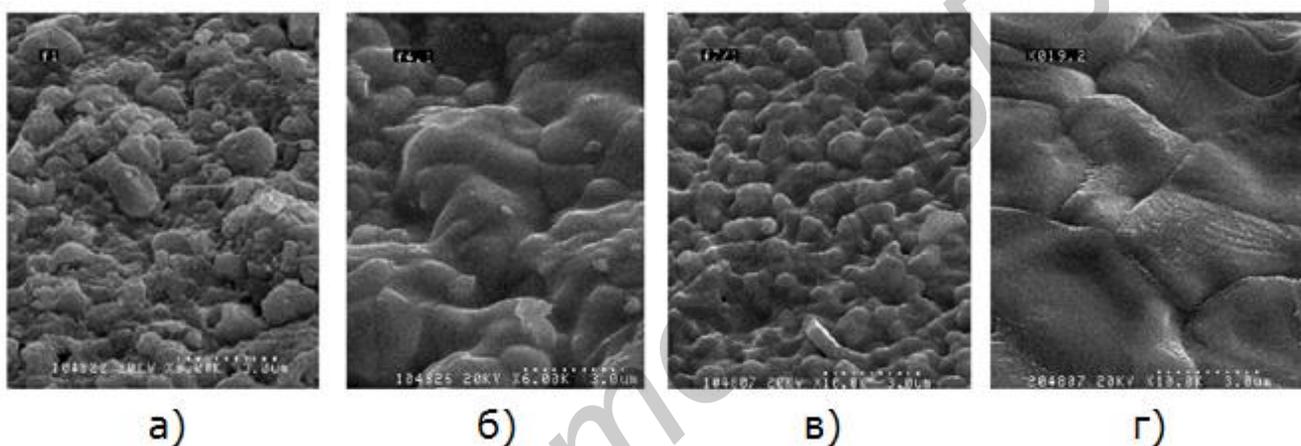
2. При достижении системой температуры 220 °С происходит плавление гранул селена ($T_{nl} = 219$ °С) с образованием локального слоя расплавленного селена, являющегося источником паров Se ;

3. После достижения квазизамкнутой системой заданной температуры селенизации происходит постепенное испарение селена, и устанавливается состояние термодинамического равновесия между жидким селеном и его парами. В состоянии термодинамического равновесия расход селена на селенизацию, диффузию через открытые края системы и дрейф с потоком инертного газа компенсируется испарением из жидкого селена, масса которого позволяет поддерживать термодинамическое равновесие в квазизамкнутой системе в течение всего времени селенизации;

4. В квазизамкнутой системе протекают реакции селенизации через газовую фазу селена за счёт его термической диффузии в металлическую плёнку.

5. Образующийся CuInSe_2 кристаллизуется ($T_{пл}(\text{CuInSe}_2) = 986 \text{ }^\circ\text{C}$) по мере синтеза в поликристаллическую структуру.

Микрофотографии пленок, синтезированных при различных температурах приведены на рисунке 1.



а) 300 °C; б) 380 °C; в) 400 °C; г) 510 °C

Рисунок 1 – Микрофотографии пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$, показывающие изменение микроструктурных свойств в зависимости от температуры синтеза

Согласно исследованиям, селенизация базовых слоев с доминирующей фазой $\text{Cu}_{11}\text{In}_9$ обеспечивает получение высококачественного материала $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ со структурой халькопирита при температуре 500 – 510 °C. Слои имеют однородную структуру, сформированную кристаллитами с размерами 2 – 5 мкм. Распределение элементов по толщине в синтезированных слоях зависит как от условий формирования и стехиометрии исходного (базового) слоя, так и от режимов селенизации. Таким образом можно сделать вывод о том, что оптимальными температурами для синтеза $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ пленок является промежуток 500 – 510 °C.

В четвертой главе рассматривается формирование приборов на гибких подложках на основе $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$. Приводится краткая характеристика каждого этапа формирования.

Для оценки качества синтезированных плёнок в зависимости от вида под-

ложки и диэлектрических слоёв между металлической фольгой и тыльным контактом к $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ слоям используется метод термоэдс. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Электрические свойства пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ на металлических фольгах

Подложка	Адгезия	$T_{\text{селениз}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{мкВ/К}$	Тип проводимости
Нерж. сталь+ Мо	отличная	500	103	<i>p</i>
Нерж. сталь+ Мо	отличная	400	84	<i>p</i>
Al- фольга+ Al_2O_3	хорошая	500	69	<i>p</i>
Al- фольга+ Al_2O_3	хорошая	400	55	<i>p</i>
Ti-фольга	хорошая	500	130	<i>p</i>
Ti-фольга	хорошая	400	275	<i>p</i>
Нерж. сталь	плохая	500	13	<i>p</i>
Нерж. сталь	плохая	400	128	<i>p</i>
Мо-фольга	отличная	500	140	<i>p</i>
Мо-фольга	отличная	400	75	<i>p</i>

По результатам исследований можно сказать, что качественные пленки были получены на подложках из нержавеющей стали с подслоем молибдена и на Мо-фольге.

На рисунке 2 показаны полосы фотолюминесценции при полученных образцов при температурах 4,2 К, 78 К, 300 К.

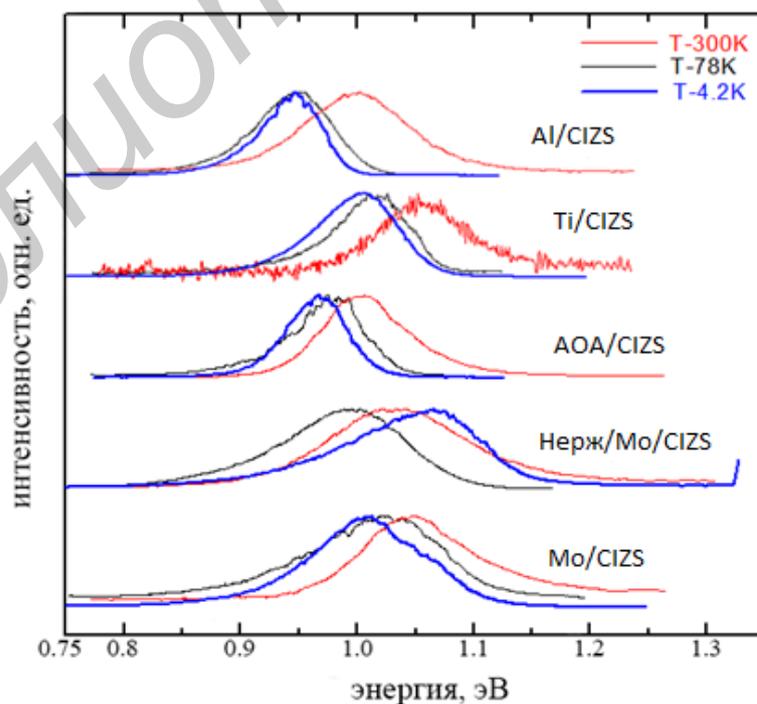


Рисунок 2 – Спектры фотолюминесценции пленок

Как показывают эксперименты, все пленки обладают люминесценцией при указанных температурах, что свидетельствует о сравнительно высоком структурном качестве указанных пленок. Проведенный анализ микрофотографий, указанных образцов также подтверждает это предположение. Кроме того, некоторые полосы имеют наиболее высокоэнергетическое положение по сравнению с положением полос в других пленках. Эти полосы предположительно могут быть отнесены к рекомбинации неравновесных носителей заряда на донорно-акцепторных парах, состоящих из собственных структурных дефектов нестехиометрического отклонения.

Доказательством справедливости отнесения полос люминесценции в образцах к донорно-акцепторным парам рекомбинации является обнаружение их сдвига (~ 60 мэВ) в высокоэнергетическую область спектра при увеличении температуры опыта от 4.2 К до 300 К.

Если анализировать общую картину люминесценции пленок в зависимости от типа металлических подложек, то можно утверждать, что предпочтительнее использование в качестве подложек нержавеющей стали с подслоем молибдена и фольги из молибдена, а также АОА.

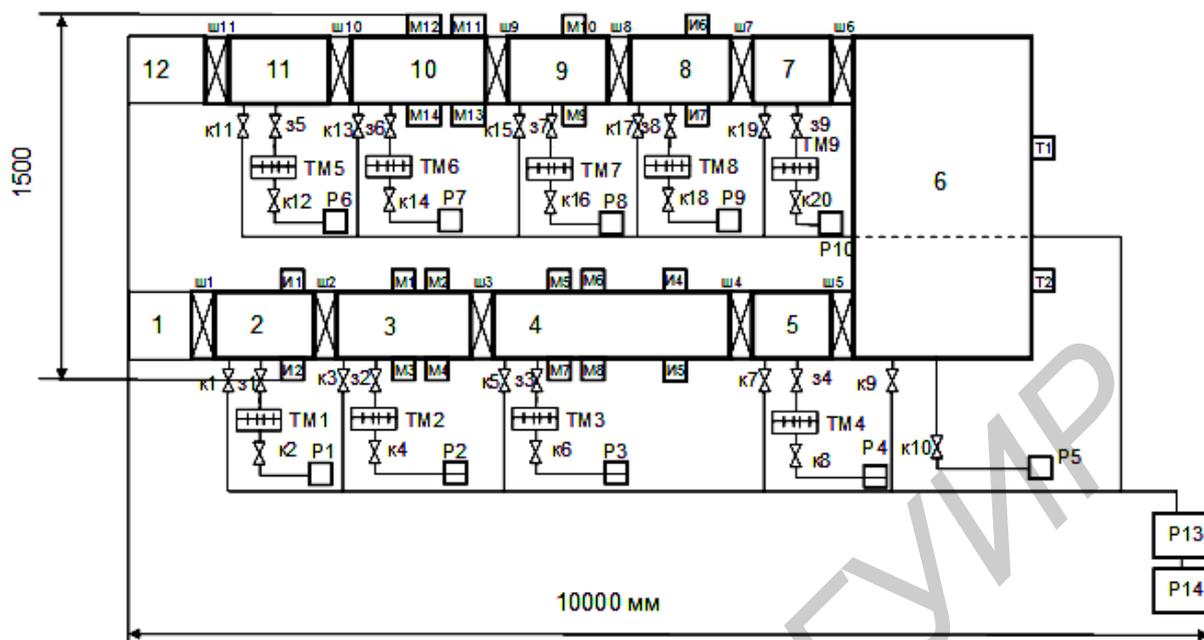
Производство тонкопленочных солнечных элементов (СЭ) может быть организовано *in-line* или *roll-to-roll* методами.

Полный цикл изготовления тонкопленочных СЭ на базе $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ включает в себя следующие элементы (таблица 2):

Таблица 2 – Цикл изготовления тонкопленочных солнечных элементов

Наименование операции	Метод	Технические требования
Заготовка подложек - для металла	Вырубка на гильотине	Класс чистоты 12 - 14
- для стекла	Нарезка, обработка фасок	
Химобработка	УЗ ванна в трихлорэтилене	
Ионная очистка и полировка	Ионный источник	
Напыление тыльного контакта (Mo)	DC-магнетрон	Высокая адгезия, низкое ($<0,1$ Σ :см) сопротивление, химическая стойкость к Se, влаге, низкие механические напряжения. $d = 1 - 2$ мкм
Напыление Cu-In-Zn-Se	DC-магнетрон	$d = 1$ мкм
Напыление NaF	Термическое испарение	$d \leq 20$ нм
Селенизация	Отжиг в атмосфере Se + S	$T = 400 - 520$ °C Пары Se, S $t = 60-15'$
Напыление CdS	Термическое испарение	$T = 220$ °C $d = 40 - 60$ нм
Напыление i-ZnO	DC-магнетрон	$d = 200 - 300$ нм
Напыление n-ZnO – 4% Al	DC-магнетрон	$d = 0,5 - 0,8$ мкм

На основании данной последовательности составлена схема вакуумной линии производства солнечных элементов (рисунок 3).



- 1 – транспортный накопитель; 2 – модуль загрузки и ионной обработки; 3 – модуль нанесения молибдена; 4 – модуль нанесения $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$; 5 – модуль нанесения NaF ;
 6 – буферный модуль; 7 – модуль селенизации; 8 – буферный модуль;
 9 – модуль нанесения CdS ; 10 – модуль нанесения ZnO ; 11 – модуль нанесения ZnO/Al ;
 12 – модуль охлаждения; 13 – модуль выгрузки; 14 – транспортный накопитель

Рисунок 3 – Схема линии по производству СЭ на базе $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$

Для уменьшения линейных габаритов линии рабочие модули располагаются S-образно, что способствует снижению требований к производственным площадям, а также упрощает задачу обеспечения соответствующей вакуумной гигиены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При работе над магистерской диссертацией были тщательно рассмотрены, изучены и проанализированы современные тенденции в исследовании тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$.

На первом этапе выполнения данной работы было изучено формирование тонких пленок твердых растворов $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ методом селенизации базовых слоев ZnSe/Cu-In в парах селена, переносимых потоком азота. Согласно исследованиям, селенизация базовых слоев с доминирующей фазой $\text{Cu}_{11}\text{In}_9$ обеспечивает получение высококачественного материала $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ со структурой халькопирита при температурах 240 – 270 °С в течение 25–30 минут на первой стадии, на второй стадии – при температурах 500 – 510 °С. Температурные режимы оказывают влияние на кристаллы тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$. Слои, полученные при $T_n = 300$ °С имеют неоднородную поверхность с высокой шероховатостью, что указывает на незавершенность реакции. При более высоких температурах рекристаллизации (480 – 500 °С), происходит существенное улучшение микроструктуры с формированием плотноупакованных зерен с размерами 2 – 5 мкм.

На втором этапе выполнения диссертационной работы были проанализированы электрические, фотолюминесцентные свойства пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ полученные на металлических фольгах. При оптимальных условиях получения тонких плёнок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ возможно формирование качественных пленок на подложках из нержавеющей стали с подслоем молибдена, титана, фольги из алюминия с слоем АОА.

На третьем этапе выполнения работы разработана методика формирования гетероструктур (подложка/ $\text{Mo}/(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$) на гибких подложках. Предложенный вариант *in-line* метода производства тонкопленочных солнечных элементов имеет ряд преимуществ, среди которых: отсутствие переноса заготовок с установки на установку предотвращает контакт с атмосферой и позволяет добиться высокого процента выхода и КПД СЭ; необходимый комплект оборудования может быть сформирован дешево и компактно по сравнению с *roll-to-roll* технологией; возможность применять различные материалы подложек: стекло, металлические фольги, полиимид.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Датчики электронных систем безопасности».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Фотолюминесценция пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ на металлических подложках / В.В. Хорошко, А.С. Серeda, А.И. Веремейчик, О.О. Боровская // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, РТ-2015: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь 16–20 нояб. 2015 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2015. – С. 193.

2. Анализ маршрутов производства тонкопленочных солнечных элементов / А.С. Серeda, А.В. Лобанок // Высшая школа. – 2016. – № 11 (том 1). – С. 101–103.

3. Методы получения тонких пленок In_2Se_3 для оптоэлектронных приборов / А.В. Лобанок, А.С. Серeda // Высшая школа. – 2016. – № 11 (том 1). – С. 101–103.

4. Серeda, А.С. Получение пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ на гибких подложках / А.С. Серeda // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С. 124–125.

5. Серeda, А.С. Анализ буферных слоев для солнечных элементов / А.С. Серeda, А.В. Лобанок // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – в печати.

6. Лобанок, А.В. Оптические характеристики кристаллов и пленок In_2Se_3 / А.В. Лобанок, А.С. Серeda // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем»,

Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – в печати.

Библиотека БГУИР

РЭЗІЮМЭ

Серада Аляксандр Сяргеевіч

Фарміраванне тонкіх плёнак цвёрдых раствораў (CuInSe₂)_x–(2ZnSe)_{1-x} і оптаэлектронных прыбораў на іх аснове на гнуткіх падкладках

Ключавыя словы: тонкія плёнкі, цвёрдыя растворы Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se₂, сонечныя элементы.

Мэта работы: распрацоўка паслядоўнасці дзеянняў для фарміравання тонкіх плёнак (CuInSe₂)_x–(2ZnSe)_{1-x}, а так жа прыбораў на іх аснове.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: паказана, што фарміраванне тонкіх плёнак (CuInSe₂)_x–(2ZnSe)_{1-x} залежыць ад тэмпературных рэжымаў. Аптымальным з'яўляецца рэжым тэрмічнай апрацоўкі базавых слаёў ZnSe / Cu-In у парах селену, якія пераносяцца патокам азоту, пры тэмпературах 240 - 270 °С на працягу 25 - 30 хвілін на першай стадыі, на другой стадыі - пры тэмпературах 500 - 510 °С на працягу 35 - 40 хвілін.

Паказана магчымасць атрымання тонкаплёнкавых сонечных элементаў на гнуткіх падкладках з фальгі нержавеючай сталі з падслоя малібдэна, алюмінія і тытана.

Распрацавана паслядоўнасць дзеянняў вытворчасці тонкаплёнкавых сонечных элементаў. На падставе дадзенай паслядоўнасці прадстаўлена схема вакуумнай лініі вытворчасці сонечных элементаў.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранены ў навучальны працэс кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў навучальны курс «Датчыкі эляктронных сістэм бяспекі».

Вобласць ужывання: фізіка і тэхналогія тонкіх плёнак, тонкаплёнкавыя прыборы паўправадніковай оптаэлектронікі, якія працуюць у бачнай і бліжняй інфрачырвонай вобласці спектру.

РЕЗЮМЕ

Серета Александр Сергеевич

Формирование тонких пленок твердых растворов $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ и оптоэлектронных приборов на их основе на гибких подложках

Ключевые слова: тонкие пленки, твердые растворы $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$, фоточувствительные структуры.

Цель работы: разработка последовательности действий для формирования тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$, а так же приборов на их основе.

Полученные результаты и их новизна: показано, что формирование тонких пленок $(\text{CuInSe}_2)_x-(2\text{ZnSe})_{1-x}$ зависит от температурных режимов. Оптимальным является режим термической обработке базовых слоев $\text{ZnSe}/\text{Cu-In}$ в парах селена, переносимых потоком азота, при температурах 240 – 270 °С в течение 25 – 30 минут на первой стадии, на второй стадии – при температурах 500 – 510 °С в течение 35 – 40 минут.

Показана возможность получения тонкопленочных солнечных элементов на гибких подложках из фольг нержавеющей стали с подслоем молибдена, алюминия и титана.

Разработана последовательность действий производства тонкопленочных солнечных элементов. На основании данной последовательности представлена схема вакуумной линии производства солнечных элементов.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Датчики электронных систем безопасности».

Область применения: физика и технология тонких пленок, тонкопленочные приборы полупроводниковой оптоэлектроники, работающие в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

SUMMARY

Sereda Alexander Sergeevich

Formation of thin films of solid solutions (CuInSe₂)_x–(2ZnSe)_{1-x} and optoelectronic devices based on them on flexible substrates

Keywords: thin films, solid solutions Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se₂, photosensitive structures.

The object of study: Development of an action sequence for the formation of thin films (CuInSe₂)_x–(2ZnSe)_{1-x}, as well as devices based on them.

The results and novelty: It shows that the thin film formation (CuInSe₂)_x–(2ZnSe)_{1-x} depends on the temperature conditions. Optimal mode is heat treated base layer ZnSe/Cu-In in selenium vapor carried by a stream of nitrogen at temperatures of 240 – 270 °C for 25 – 30 minutes in the first stage, in a second step - at temperatures of 500 - 510 °C for 35 – 40 minutes. The possibility of obtaining thin-film solar cells on flexible substrates of stainless steel foils with a sublayer of molybdenum, aluminum, and titanium.

Sequence of production of thin-film solar cells was developed. Based on this sequence developed a scheme vacuum line of production of solar cells.

Degree of use: results are implemented in the educational process at the Department of design information and computer systems of the education institution "Belarusian state university of informatics and radioelectronics" in the training course "Sensors of electronic security systems".

Sphere of application: physics and technology of thin films, thin film devices for semiconductor optoelectronic operating in the visible and near infrared region of the spectrum.