

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

На правах рукописи

УДК 621.383.7



ОСАКОВИЧ
Евгений Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЫ
ПОЛУПРОВОДНИК/БЕЛОК**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 «Технология приборостроения»

Минск 2017

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

Научный руководитель: **ШАТАЛОВА Виктория Викторовна**,
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ТОНКОВИЧ Ирина Николаевна**,
кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой информационных технологий учреждения образования «Минский инновационный университет»

Защита диссертации состоится «22» июня 2017 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, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, 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».

ВВЕДЕНИЕ

Современные достижения физики и техники полупроводников в значительной степени определяются поиском и детальным исследованием новых полупроводниковых материалов. К таким материалам относятся тройные соединения типа $A^I B^{III} C^{VI}_2$ (где A^I – Cu, Ag; B^{III} – Al, Ga, In; C^{VI} – S, Se, Te). Указанные соединения являются электронно-химическими аналогами двойных соединений типа $A^{II} B^{VI}$, которые, в свою очередь, являются электронно-химическими аналогами элементарных полупроводников IV группы, таких как кремний и германий. В отличие от Si и Ge, бинарных соединений $A^{II} B^{VI}$, тройные соединения $A^I B^{III} C^{VI}_2$ вызывают большой интерес у различных групп исследователей в силу следующих обстоятельств: а) они являются материалами с прямыми межзонными переходами и могут быть получены с различным типом проводимости; б) значения ширины запрещенной зоны этих соединений близки к оптимальным ($E_g = 1,0 - 1,7$ эВ) для разработок преобразователей солнечного излучения; в) коэффициент оптического поглощения в пределах спектра солнечного излучения достигает больших значений ($\alpha > 10^5$ см⁻¹), что обеспечивает полное поглощение падающего излучения в тонких пленках таких материалов. Так как соединения $A^I B^{III} C^{VI}_2$ кристаллизуются в структуре халькопирита, то кристаллы этих соединений являются оптически активными и на их основе могут быть изготовлены узкополосные оптические светофильтры. Из указанного класса соединений значительный интерес представляет тройное соединение $CuInS_2$. Кристаллы этого соединения обладают высокой радиационной стойкостью, стабильными электрическими характеристиками. Сочетание этих свойств обуславливает перспективность данного соединения для проектирования разнообразных технических устройств: светодиодов линейно-поляризованного излучения, электрооптических модуляторов, фотопреобразователей солнечного излучения с высоким КПД.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Определение оптимальных температурных режимов синтеза и выращивания качественных монокристаллов соединения $CuInS_2$, исследование их характеристик является важной научной задачей современного материаловедения и имеет большое практическое значение, так как открывает возможности использования полученных результатов при создании на их основе поверхностно-барьерных структур для использования в качестве преобразователей солнечного излучения.

Степень разработанности проблемы

Исследование фотоэлектрических свойств структуры полупроводник/белок осуществлялось на основе работ российских и белорусских ученых: Ж.И. Алферов, И.В. Боднар, В.Ф. Гременок, С.И. Рембеза, Ю.Я. Гуревич, Ю.В. Рудь, В.Ю. Рудь, В.Б. Залесский, а так же зарубежных авторов: J.L Shay, W.J.P. Van Enckevort, H.L. Hwang, J.E. Jaffe, J.J. M. Vinsma, Шеффер Г. и др.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является неполное рассмотрение особенностей взаимодействия фоточувствительных поверхностно-барьерных структур с веществами и соединениями биологического происхождения.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе создания и изучения свойств поверхностно-барьерной структуры CuInS_2 /белок.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является получение однородных монокристаллов CuInS_2 , а также создание поверхностно-барьерной структуры на основе монокристаллов указанного соединения.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Определение оптимальных режимов выращивания монокристаллов CuInS_2 ;
2. Определение физико-химических, оптических, электрических свойств монокристаллов CuInS_2 ;
3. Создание поверхностно-барьерной структуры CuInS_2 /белок и исследование ее фотоэлектрических свойств.

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

Диссертация строится на результатах исследований отечественных и зарубежных ученых, занимающихся вопросами исследований методов получения данного соединения, физико-химических, оптических, магнитных свойств и использование новых материалов для фотопреобразователей.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в установлении оптимальных температурных и временных режимов получения монокристаллов CuInS_2 ; определении различных свойств, создании и исследовании поверхностно-барьерных структур на их основе.

Теоретическая значимость диссертации заключается в изучении кристаллической структуры, диаграммы состояния указанного соединения, способах его получения, а также изучении методов исследований физико-химических, оптических и электрических свойств.

Практическая значимость диссертации состоит в получении монокристаллов CuInS_2 методом химических газотранспортных реакций (ХТР), обладающих рядом различных свойств, пригодных для возможного создания широкополосных преобразователей солнечного излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены оптимальные температурные и временные режимы получения монокристаллов соединения CuInS_2 методом химических газотранспортных реакций.

2. Определены состав, физико-химические, оптические, электрические свойства полученного монокристалла, с целью дальнейшего использования для создания поверхностно-барьерной структуры.

3. На основе монокристаллов CuInS_2 создана поверхностно-барьерная структура CuInS_2 /белок/Мо и исследованы ее фотоэлектрические свойства с целью дальнейшего использования в качестве преобразователей солнечного излучения.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 53-ая научно-техническая конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь, 2017 г.), 13-я Международная молодежная научно-техническая конференция "Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2017" (г. Севастополь, Севастопольский государственный университет)

Публикации

Основные положения работы и результаты исследований, проведенных в ходе написания магистерской диссертации, изложены в четырех опубликованных работах общим объемом 0,5 авторских листа.

Структура и объем работы

Структура магистерской работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, общей характеристики работы, трёх глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В **первой главе** приведен аналитический обзор современного состояния исследований отечественных и зарубежных ученых, занимающихся вопросами исследований методов получения соединения CuInS_2 , исследованием физико-химических, оптических и электрических свойств указанного соединения. Во **второй главе** рассмотрена методика получения монокристаллов соединения CuInS_2 , методы измерения физико-химических (микрорентгеноспектральный анализ, рентгеновский анализ, измерение плотности, дифференциально-термический анализ, тепловое расширение, теплопроводность), а также способы измерения оптических и электрических свойств. Представлена методика создания поверхностно-барьерной структуры на основе полученного монокристалла CuInS_2 . В **третьей главе** представлены результаты измерений физико-химических, оптических и электрических свойств монокристалла CuInS_2 и, созданной на его основе, поверхностно-барьерной структуры.

В **приложении** представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертации – 94 страницы. Работа содержит 7 таблиц, 20 рисунков. Библиографический список включает 61 наименование, список публикаций соискателя – 4 наименования, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

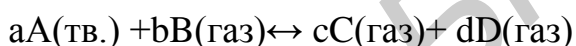
Во **введении** рассмотрены современные достижения физики и техники полупроводников по поиску и детальному исследованию новых полупроводниковых материалов. Отмечены основные особенности тройных соединений $\text{AB}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}_2$ и, в частности, соединения CuInS_2 , а также описана перспективность разработки данной темы.

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В **первой главе** произведен анализ диаграммы состояния системы $\text{Cu}_2\text{S}-\text{In}_2\text{S}_3$, который показал, что в системе обнаружены две промежуточные фазы: CuInS_2 и CuIn_5S_8 . Соединение CuInS_2 может существовать в трех структурных

модификациях: γ_1 -со структурой халькопирита, температура фазового превращения $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ составляет 1253 К, γ_2 – со структурой цинковой обманки, температура фазового перехода $\gamma_2 \rightarrow \gamma_3$ составляет 1318 К и γ_3 – с неизвестной структурой, но предполагаемой структуре вьюрцита, температура плавления которого 1358 К.

Изучены методы синтеза и выращивания соединения CuInS_2 , полученные различными авторами. Учитывая химические и физические свойства исходных веществ, самих продуктов реакции, а также изменения, происходящие в процессе синтеза с повышением температуры, был выбран оптимальный метод синтеза – динамический метод химических газотранспортных реакций с применением в качестве транспортирующего агента йода. В основе метода положено химическое взаимодействие исходной твердой фазы А с каким-либо летучим веществом В с образованием газообразных продуктов С и Д, которые после перемещения в другую часть системы при изменении условий равновесия взаимодействуют между собой с выделением твердой фазы А.



При динамическом варианте температура в зонах реакции изменяется во времени, а в зоне кристаллизации температура постоянна.

Сделан вывод о технологических трудностях получения оптически однородных монокристаллов соединений CuInS_2 пригодных для исследования из-за противоречивости и ограниченности результатов исследований физико-химических, оптических и электрических свойств, приведенных различными авторами.

Во второй главе подробно описан метод, использованный при получении монокристаллов соединения CuInS_2 – метод химических газотранспортных реакций (динамический вариант). При выращивании монокристалла использовалась двухзонная горизонтальная печь.

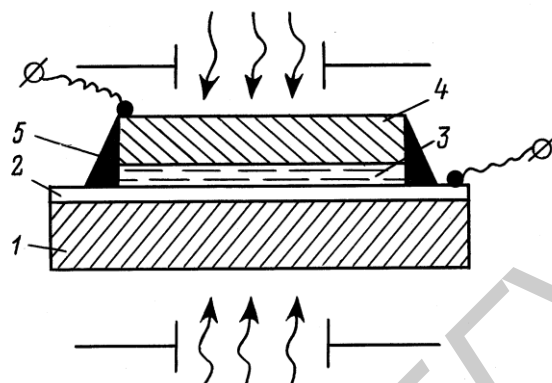
Процесс исследования физико-химических свойств полученного монокристалла CuInS_2 , включал в себя:

- микрорентгеноспектральный анализ на установке Stereoscan-360;
- рентгеновский анализ на дифрактометре ДРОН-3М;
- измерение плотности пикнометрическим и рентгеновским методами;
- определение микротвердости на микротвердомере «LEICA VMHT MOT»;
- дифференциально-термический анализ (ДТА);
- измерение теплового расширения на кварцевом dilatометре в интервале температур 80-600 К;
- измерение теплопроводности при 300-600 К.

Представлено подробное описание основных способов исследования оптических свойств полупроводника. Описан принцип работы, типичного для

измерения электронных спектров поглощения полупроводников, прибора – спектрофотометра. Для определения ширины запрещенной зоны (E_g) соединения CuInS_2 проводились измерения спектров пропускания в области края собственного поглощения.

Рассмотрена и изучена методика измерения электрических свойств соединения CuInS_2 : измерение удельного сопротивления (ρ) и эффекта Холла.



1– стеклянная подложка, 2– полупрозрачный слой металла, 3– слой белка,
4– пластина монокристалла CuInS_2 , 5– диэлектрический лак

Рисунок 1 – Конструкция и схема освещения структуры полупроводник/белок

В результате комплексного исследования была разработана следующая методика создания структур на основе монокристаллов соединения CuInS_2 . На стеклянную подложку с полупрозрачным слоем металла (молибден, толщина слоя $\sim 0,5$ мкм) помещалась капля естественного белка. Пластина из монокристалла CuInS_2 приводилась в контакт с поверхностью белка таким образом, что жидкий белок «зажимался» между металлизированной поверхностью стеклянной подложки и пластиной полупроводника, заполняя представленный ему зазор. После завершения процедуры посадки монокристалла CuInS_2 на контакт с подложкой через слой белка положение пластины фиксировалось относительно стеклянной подложки с помощью диэлектрического лака. Собранный таким образом структура полупроводник/белок/металл, представлена на рисунке 1.

В третьей главе представлены результаты исследований свойств полученных монокристаллов. Определен состав монокристаллов соединения CuInS_2 , полученных методом химических газотранспортных реакций, с помощью микрорентгеноспектрального анализа. Установлено, что содержание компонент удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте.

Рентгеновский метод показал, что полученное соединение кристаллизуется в структуре халькопирита с параметрами элементарной ячейки $a = 5,523 \pm 0,002 \text{ \AA}$, $c = 11,13 \pm 0,01 \text{ \AA}$.

Для исследования оптических свойств по спектрам пропускания рассчитаны коэффициент поглощения (α), по спектрам пропускания в области края собственного поглощения для соединения CuInS_2 определены значения E_g , которые равны $1,482 \pm 0,005$ эВ при температуре 80 К и $1,460 \pm 0,005$ эВ при температуре 295 К.

Методом дифференциально-термического анализа определены температуры фазовых превращений соединения CuInS_2 . Тепловой эффект при 1248 К соответствует катион – катионному разупорядочению (халькопирит \rightleftharpoons сфалерит), при 1313 К – соответствует катион-анионному разупорядочению (сфалерит \rightleftharpoons вюрцит), а при 1363 К – температуре плавления CuInS_2 .

Для исследования электрических свойств тройного соединения CuInS_2 был произведен расчет удельной электропроводности (σ), подвижности (μ) и концентрации носителей заряда (n) по следующим формулам:

$$\sigma = \frac{I \cdot \Delta l \cdot 10^4}{U_\sigma \cdot d \cdot h},$$

где I – ток через образец;

$\Delta l, d, h$ – геометрические размеры образца;

U_σ – падение напряжения на токовых контактах;

$$\mu = \sigma \cdot R_H,$$

где σ – удельная электропроводность;

R_H – коэффициент Холла;

H – напряженность магнитного поля;

$$R_H = \frac{U_H \cdot d \cdot 10^4}{I \cdot H},$$

где I – ток через образец;

U_H – падение напряжения на холловских контактах;

H – напряженность магнитного поля;

$$n = \frac{6,25 \cdot 10^{18}}{R_H}$$

Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Электрические свойства монокристаллов соединения CuInS_2 .

Тип проводимости	Концентрация носителей заряда, n , см^{-3}	Подвижность носителей заряда, μ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Удельное сопротивление, ρ , $\text{Ом}\cdot\text{см}$
n	$3 \cdot 10^{16}$	220	10^{-1}

Стационарная вольт-амперная характеристика (ВАХ) одной из созданных структур монокристалл CuInS_2 /белок/металл представлена на рисунке 3.4. Видно, что ВАХ проявляет четкий характер выпрямления, который составляет $\sim 2,0$ В при напряжениях до 5 В. Обратная характеристика подчиняется степенному закону с близким к единице показателем. Остаточное сопротивление таких структур составляет $\sim 10^4$ Ом при $T=300$ К. Следует отметить, что характеристики этих структур практически не изменялись, а параметры хорошо воспроизводились.

Следует отметить, что характеристики этих структур практически не изменялись, а параметры хорошо воспроизводились. При освещении структур воспроизводимо наблюдается фотовольтаический эффект, причем его знак сохраняется неизменным при обеих геометриях освещения, перемещениях светового зонда вдоль поверхности структур (диаметр $\sim 0,2$ мм) и изменении энергии падающего излучения во всей области фоточувствительности. Следует отметить, что фоточувствительность всегда преобладает при освещении структур со стороны слоев белка. Максимальные значения вольтовой фоточувствительности S_u составляют $\sim 10^4$ В/Вт, а токовой – $S_I=7$ мА/Вт.

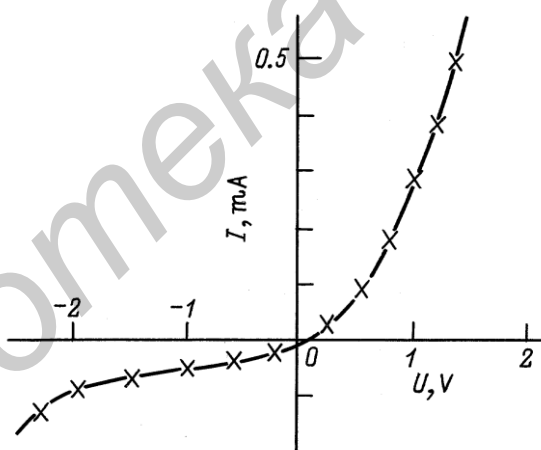


Рисунок 2 – Стационарная вольт-амперная характеристика (ВАХ) структуры монокристалл CuInS_2 /белок/металл

Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования (η) для указанной структуры приведена на рисунке 3. Видно, что фоточувствительность при освещении со стороны белка имеет широкополосный характер с максимальными значениями η в интервале между шириной запрещенной зоны соединения CuInS_2 и коротковолновым спадом фоточувствительности вблизи 3,5 эВ. Это типичный для идеальных гетеропереходов «эффект окна». Проявление коротковолновой границы вблизи 3,5 эВ позволяет принять эту энергию за псевдощель в энергетическом спектре белка. Длинноволновая граница фоточувствительности определяется величиной

E_g монокристалла CuInS_2 . Длинноволновый край η экспоненциальный и его крутизна $S = \delta(\ln \hbar\omega) / \delta(\hbar\omega)$ значительная и составляет 60 эВ^{-1} , что отвечает прямым межзонным переходам в соединении CuInS_2 .

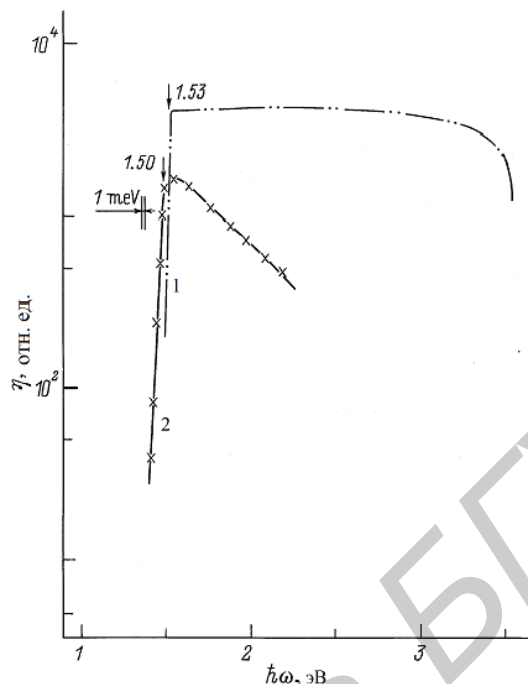


Рисунок 3 – Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования (η) для структуры монокристалл CuInS_2 /белок/металл

На рисунке 3 для соединения CuInS_2 показан также и характерный для поверхностной рекомбинации носителей заряда выраженный коротковолновый спад η (рисунок 3, кривая 2). Он проявляется в созданных структурах при механической обработке поверхности монокристалла, тогда как при использовании естественной плоскости (112) коротковолновой спад η отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Выполнен анализ существующих методов синтеза и выращивания соединения CuInS_2 . На основе результатов исследований физико-химических, оптических и электрических свойств, приведенных различными авторами, сделан вывод о технологических трудностях получения оптически однородных монокристаллов указанного соединения. Это обуславливает актуальность установления оптимальных температурных и временных режимов получения однородных монокристаллов соединения CuInS_2 .

2. Методом химических газотранспортных реакций получены пластинчатые монокристаллы соединения CuInS_2 , со средними размерами $8 \times 4 \times 2$ мм. Определен

состав полученных монокристаллов, параметры элементарной ячейки, плотность, микротвердость, температуры фазовых превращений, по спектрам пропускания в области края фундаментального поглощения при температурах 80 и 295 К определена ширина запрещенной зоны (E_g).

3. На основе монокристаллов соединения CuInS_2 сформирована фоточувствительная поверхностно-барьерная структура CuInS_2 /белок/ Mo , исследованы ее фотоэлектрические свойства. Показано, что сформированная поверхностно-барьерная структура обеспечивает спектральную фоточувствительность в диапазоне 1,53-3,5 эВ. Максимальные значения вольтовой фоточувствительности S_u составляют $\sim 10^4$ В/Вт и токовой $S_I=7$ мА/Вт фоточувствительностью при $T=300$ К, что указывает на возможность эффективного использования выращенных монокристаллов в качестве широкополосных фотопреобразователей солнечного излучения.

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 «Проектирование интегральных микросхем».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Тезисы конференций

1. Осакович Е.В. Получение монокристаллов CuInS_2 / Е.В. Осакович, В.В. Шаталова // материалы 53-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017. – В печати.

2. Осакович Е.В. Исследования свойств монокристаллов CuInS_2 / Е.В. Осакович, В.В. Шаталова // материалы 53-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017. – В печати.

3. Осакович Е.В. Перспективы развития солнечных элементов на основе перовскита / Е.В. Осакович, В.В. Шаталова // 13-я Международная молодежная научно-техническая конференция "Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2017", 23–27 октября 2017 г. / УО «СевГУ». – Севастополь, 2017. – В печати.

4. Осакович Е.В. Анализ перспективных направлений исследований солнечных элементов на основе перовскита / Е.В. Осакович, В.В. Шаталова // 13-я Международная молодежная научно-техническая конференция "Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2017", 23–27 октября 2017 г. / УО «СевГУ». – Севастополь, 2017. – В печати.

РЭЗІЮМЭ

Асаковіч Яўген Віктаравіч

Даследаванне фотаэлектрычных уласцівасцяў структуры паўправаднік / бялок

Ключавыя словы: CuInS_2 , паўправаднік / бялок.

Мэта працы: атрыманне аднародных монакрышталяў CuInS_2 , а таксама стварэнне павярхоўна-бар'ернай структуры на аснове монакрышталяў названага злучэння.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: вызначаны аптымальны тэмпературны і часовай рэжым вырошчвання монакрышталяў CuInS_2 метадам хімічных газатранспартных рэакцый; вызначаны фізіка-хімічныя, аптычныя, электрычныя уласцівасцяў монакрышталяў CuInS_2 ; створана павярхоўна-бар'ерная структура CuInS_2 / бялок і даследаваны яе фотаэлектрычныя ўласцівасці.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі ў навучальны курс «Праектаванне інтэгральных мікрасхем».

Вобласць ужывання: паўправадніковая прамысловасць, пераўтваральнікі сонечнага выпраменьвання.

РЕЗЮМЕ

Осакович Евгений Викторович

Исследование фотоэлектрических свойств структуры полупроводник/белок

Ключевые слова: CuInS_2 , полупроводник/белок.

Цель работы: получение однородных монокристаллов CuInS_2 , а также создание поверхностно-барьерной структуры на основе монокристаллов указанного соединения.

Полученные результаты и их новизна: определен оптимальный температурный и временной режим выращивания монокристаллов CuInS_2 методом химических газотранспортных реакций; определены физико-химические, оптические, электрические свойств монокристаллов CuInS_2 ; создана поверхностно-барьерная структура CuInS_2 /белок и исследованы ее фотоэлектрические свойства.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре Проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” в учебный курс “Проектирование интегральных микросхем”.

Область применения: полупроводниковая промышленность, преобразователи солнечного излучения.

SUMMARY

Osakovich Eugene Victorovich

Research of the semiconductor/protein structure photovoltaic properties

Keywords: CuInS₂, semiconductor/protein.

Research subject: synthesis of homogeneous single crystals of CuInS₂, creating a surface-barrier structure based on obtained single crystals.

The results and novelty: the optimal temperature and time regime for CuInS₂ single crystal growth by chemical gas transport reactions was determined; The physicochemical, optical, electrical properties of CuInS₂ single crystals have been determined; A surface-barrier structure of CuInS₂ / protein was created and its photoelectric properties were determined.

Utility: the results implemented into the educational process at the information and computer design department of "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics" and used to supplement "Integrated circuit design" course.

Sphere of application: semiconductors, photovoltaic technology.