

## О Т З Ы В

Официального оппонента на диссертационную работу  
Гаджиева Тимура Мажлумовича  
«СТРУКТУРНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КРИСТАЛЛОВ И ПЛЕНОК  $\text{CuInSe}_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ БРИДЖМЕНА  
И ДВУХЗОННОЙ СЕЛЕНИЗАЦИИ», представленной на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Многокомпонентные полупроводниковые соединения со структурой халькопирита, в частности  $\text{CuInSe}_2$ , вызывают особый интерес исследователей с точки зрения их использования в качестве поглощающего слоя в солнечных элементах в связи с высоким показателем поглощения солнечного излучения в области края фундаментального поглощения и высокими значениями КПД структур на основе  $\text{CuInSe}_2$ , высокой стабильностью электрофизических характеристик, возможностью изготовления их на гибкой подложке; низкой себестоимостью.

Однако, многокомпонентность состава  $\text{CuInSe}_2$ , сдерживает его промышленное внедрение из технологических трудностей получения однородного состава слоёв  $\text{CuInSe}_2$  на больших площадях. К тому же природа дефектов достаточно не изучена.

В связи с вышеизложенным, тема представленной диссертационной работы является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованной литературы

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы работы, сформулированы ее цель и задачи, определены объекты исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований, основные научные положения, выносимые на защиту, описаны апробация результатов работы, личный вклад автора, раскрыта структура работы, дана краткая характеристика каждой главы.

**В первой главе** представлены особенности кристаллической и зонной структуры полупроводникового соединения  $\text{CuInSe}_2$ . Рассмотрены основные результаты исследований морфологии, химического, структурного анализа, электрофизических и фотоэлектрических свойств кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$ .

Анализ литературных данных показал, что  $\text{CuInSe}_2$  синтезировали и выращивали двухзонным методом Бриджмена. Наблюдается разброс данных по химическому составу и структуре образцов кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$  в зависимости от температурных режимов, отсутствует достоверная информация о связи типа проводимости кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$  с условиями технологических процессов, концентрацией халькогена и исходным соотношением  $\text{Cu/In}$  металлических компонентов. Исходя из выше изложенного делается вывод о необходимости дальнейших исследований по разработке технологии выращивания кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$  с заданными характеристиками.

**Вторая глава** описываются установки и подбор технологических режимов выращивания кристаллов  $\text{CuInSe}_2$  трехзонным методом Бриджмена и получения пленок  $\text{CuInSe}_2$  методом двухэтапной селенизации.

**В третьей главе** приведены результаты исследований морфологии, химического состава, структуры кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$ . Необходимо отметить, что исследования морфологии и структуры синтезированных объемных кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$  показали:

- при оптимизированных условиях выращивания трехзонным методом Бриджмена формируются однородные, однофазные, совершенные кристаллы  $\text{CuInSe}_2$ ;
- рост пленок  $\text{CuInSe}_2$  реализуется по механизму Странски-Крастанова, включающий в себя образование центров селенизации, представляющих из себя микроскопические соединения селенидов меди и индия, коалесценцию таких центров в зерна и росту зерен. При температуре селенизации  $400\text{ }^\circ\text{C}$  происходит слияние всех зерен.
- пленки  $\text{CuInSe}_2$  полученные при  $T_{\text{сел.}} = 400\text{ }^\circ\text{C}$  являются поликристаллическими, ориентированными пленками стехиометрического состава.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований электрофизических свойств кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$ .

**В пятой главе** представлены результаты исследований фотоэлектрических свойств кристаллов и пленок  $\text{CuInSe}_2$ .

К наиболее значимым можно отнести следующие научные результаты:

- разработка технологии выращивания кристаллов  $\text{CuInSe}_2$  трехзонным методом Бриджмена.
- разработка метода получения пленок  $\text{CuInSe}_2$  (патент RU № 2354006),
- разработка установки, предназначенной для проведения процессов термодиффузионного синтеза в потоке газа-носителя реакционной компоненты (селенизации) (патент RU № 116614) и получение пленки  $\text{CuInSe}_2$ ;
- показано, что вольтамперные характеристики структур In/кристалл  $p\text{-CuInSe}_2$  и In/пленка  $p\text{-CuInSe}_2$  при  $T = 300\text{ K}$  имеют диодный тип. Напряжение отсечки структур In/кристалл  $p\text{-CuInSe}_2$   $U_c = 0,95\text{ В}$ , коэффициент выпрямления  $\beta = 1,4$  и для структур In/пленка  $p\text{-CuInSe}_2$   $U_c = 0,445\text{ В}$ , коэффициент выпрямления  $\beta = 1,73$ ;
- показано, что не зависимо от типа проводимости в кристаллах и пленках  $\text{CuInSe}_2$  в интервале температур  $77 \leq T \leq 300\text{ K}$  температурная зависимость электропроводности  $\sigma_{p,n}$  имеет активационный характер. Определены энергии активации как для кристаллов  $\text{CuInSe}_2$   $p$ -типа и для  $n$ -тип, так и для пленок.
- установлено, что на температурную зависимость подвижности носителей заряда в области  $100 \leq T \leq 300\text{ K}$  в кристаллах оказывает влияние рассеяние на тепловых колебаниях атомов или ионов кристаллической решетки и на атомах или ионах собственных дефектов. Причем, значения подвижности при комнатной температуре всех исследованных пленочных образцов меньше, чем в объемных кристаллах.
- установлено, что в кристаллах  $\text{CuInSe}_2$  стехиометрического состава имеют место дефекты: вакансии меди ( $V_{\text{Cu}}^{-/0}$ ), вакансии индия ( $V_{\text{In}}^{-/0}$ ) и медно-индиевые антиструктурные дефекты ( $\text{Cu}_{\text{In}}^{-/0}$ ), а в кристаллах с недостатком селена дефекты типа вакансии селена ( $V_{\text{Se}}^{+/0}$ ) и медь в междоузлии ( $\text{Cu}_i^{0/+}$ ).
- экспериментально выявлено, что с увеличением энергии фотонов при  $0,9 < h\nu < 1,5\text{ эВ}$  фототок проводимости и короткого замыкания в поверхностно – барьерных структурах In/кристалл  $p\text{-CuInSe}_2$  и In/пленка  $p\text{-CuInSe}_2$  резко возрастает. полученные результаты комплексных исследований кристаллов и пленок.

– монокристаллы и пленки  $\text{CuInSe}_2$ , получаемые по предлагаемым технологиям, могут быть использованы при разработке и создании фотопреобразовательных устройств.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений так как достигнута проведением комплексных исследований по апробированным методикам с использованием современных установок и сравнительным анализом полученных результатов с данными других исследователей, а также сопоставлением экспериментальных данных с теоретическими оценками.

Материалы диссертации неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях, и симпозиумах. По результатам диссертационного исследования опубликовано 17 работ, 4 из них входят в перечень ВАК, также получен патент на изобретение. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

К недостаткам и замечаниям представленной работы можно отнести:

1. В литературном обзоре недостаточное количество данных других авторов за последние 5 лет.
2. Желательно было бы рассмотреть вопросы роста пленок окисла  $\text{In}_2\text{O}_3$  на поверхности  $\text{CuInSe}_2$ , атомный механизм окисления и процессы высокотемпературной деградации материала термического окисления
3. Желательно было бы провести исследования при температурах ниже температуры 77 К.

Однако, высказанные недостатки и замечания не умаляют достоинства представленной работы.

Считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научно-методическом уровне и соответствует требованиям п. п. 9—14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Гаджиев Тимур Мажлумович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Академик РАН,  
доктор физ-мат наук, профессор каф. общей физики  
ФГБОУ ВО «Ингушский государственный университет»,  
386001, РИ, г. Магас, проспект И.Б. Зязикова, 7  
телефон: (8732) 22-38-65, +7928-747-15-20,  
e-mail: [matiyev-akhmet@yandex.ru](mailto:matiyev-akhmet@yandex.ru)



А.Х. Матиев

Подпись Матиева А.Х.  
заверяю:  
Проректор по НИР,  
профессор



З.Х. Султыгова