

На правах рукописи

УДК 535.37

ЕВЛОЕВ АЛИХАН МАКШАРИПОВИЧ

**ОПТИЧЕСКИЕ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ $TlGaSe_2$ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор,
Георгобиани Анатолий Неофитович

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор,
Матиев Ахмет Хасанович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
Горелик Владимир Семенович

кандидат физико-математических наук,
Левонович Борис Наумович

Ведущая организация: Московский государственный университет
путей сообщения (МИИТ)

Защита диссертации состоится «22» марта 2010 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д002.023.03 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «18» февраля 2010 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета		д.ф.-м.н., проф. Шиканов А.С.
---	--	-------------------------------

І ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Высокодисперсные и тонкопленочные материалы, измеряемые десятками и единицами нанометров, находят все более широкое применение в полупроводниковой, опто – и квантовой электронике. Качество таких пленок, как правило, и параметры создаваемых на их основе приборов зависят от условий формирования тонких слоев, размеров и ориентации кристаллитов, кинетических параметров фазовых превращений, сохранения или деструкции ближнего порядка в атомной структуре. Зарождение и механизм роста стабильных фаз, эпитаксиально выращенных в виде монокристаллических тонких пленок, которые в объемных образцах могут быть термодинамически устойчивы, наравне с такими параметрами, как концентрация, дислокаций, дефектов упаковки и т.д, определяются также условиями их получения, природой, чистотой.

Вследствие этого и ряда других причин не названных здесь, исследования вышеуказанных процессов в тонкопленочных образцах, отличающихся от объемных более легким выделением различных фаз в чистом виде, как термодинамически устойчивых так и метастабильных – с промежуточно – переходными структурами, возникающими на различных этапах химических реакций по пути к равновесию имеют общенаучное значение, результаты, которых могут быть использованы для создания многослойных гетероструктур с совершенной структурой отдельных слоев и границ раздела между ними. Такие пленки, имеют особые значения в технологии тонкопленочных структур, позволяют интенсифицировать научно – технические разработки и служат основой при изготовлении устройств современной твердотельной электроники.

Получение этих материалов, в свою очередь, основывается на детальном исследовании и интерпретации их свойств. Возможности получения новых материалов существенно расширяются при использовании твердых растворов. Проблема создания твердых растворов является одной из центральных в физике полупроводников, что подтверждается неослабевающим потоком информации, посвященной как уже хорошо себя зарекомендовавшим на практике твердым растворам на основе соединений A^3B^5 , так и твердым растворам на основе, сравнительно недавно открытых нового перспективного класса соединений $A^3B^3C^6_2$.

Соединения $A^3B^3C^6_2$ является изоэлектронными аналогами известных полупроводников групп A^3B^3 . Определенную перспективу в этом плане с нашей точки зрения, имеют твердые растворы на основе $TlGaSe_2$ и $CuGaSe_2$. Эти со-

единения являются перспективными материалами для разработки на их основе приемников излучения для видимой, ближней - ИК и рентгеновской областей спектра, а также для солнечных элементов. Кристаллы данной группы обладают уникальными свойствами. Они прозрачны в широком спектральном диапазоне, обладают слабой чувствительностью электрических свойств к вводимым примесям, низкой подвижностью и концентрацией свободных носителей заряда по сравнению с выше указанными полупроводниками. Это обстоятельство делает соединения типа $TlV^3C^6_2$ особенно интересными, как с точки зрения выяснения фундаментальных особенностей кристаллического строения слоистых полупроводников, так и с точки зрения технического применения.

В настоящее время объем и глубина этих исследований носят не достаточный, а порой и противоречивый характер, не позволяющий сделать адекватные обобщения, а тем более сформулировать практические рекомендации. Поэтому возникает необходимость систематического исследования электрических, оптических и фотоэлектрических свойств указанных материалов, позволяющего определить весь комплекс происходящих в них физических процессов, а также выявление реальных закономерностей изменения физических параметров с целью разумного управления ими. Исследование оптических свойств указанных материалов необходимо как для их практического применения, так и для фундаментального изучения их электронно-энергетической структуры. С этой точки зрения тема настоящей диссертационной работы - «ОПТИЧЕСКИЕ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ $TlGaSe_2$ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ» представляется весьма актуальной, открывающей возможности получения новых полупроводниковых материалов и твердых растворов на их основе.

Основная цель диссертационной работы

Экспериментальное исследование оптических, фотоэлектрических и электрофизических свойств полупроводников $TlV^3C^6_2$ и получение на этой основе предпосылок расширения возможностей их практического применения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- выращивание монокристаллов, как исходных соединений, так и твердых растворов и изучение фазовых равновесий в системах $TlGaSe_2$ - $CuGaSe_2$;
- исследование оптических, колебательных, электрофизических и фотоэлектрических свойств монокристаллов $TlGaSe_2$ и твердых растворов на их основе;

- изучение основных закономерностей взаимосвязи фундаментальных параметров изучаемых кристаллов и перспектив их практического использования.

Объектами для исследования являлись образцы монокристаллов TlGaSe_2 и твердые растворы на их основе, выращенные методом Бриджмена-Стокбаргера. Монокристаллы TlGaSe_2 и твердые растворы на их основе обладают моноклинной (псевдотетрагональной) слоистой структурой.

Экспериментальные исследования проводились с применением комплекса методов, основанных на изучении спектральных характеристик примесной фотопроводимости, фотолюминесценции, оптического гашения фотопроводимости. Образцы для исследований получали скалыванием монокристаллов на плоскопараллельные пластинки. Естественные сколы имели зеркальную поверхность, и в дополнительной полировке не было необходимости.

Научная новизна работы

Экспериментальные и теоретические исследования, выполненные в диссертационной работе, позволили:

1. изучить фазовые равновесия в системах $\text{TlGaSe}_2\text{-CuGaSe}_2$; построить диаграмму состояния; разработать технологию получения монокристаллов твердых растворов $\text{Tl}_{1-x}\text{Cu}_x\text{GaSe}_2$.

2. получить спектры ФЛ в видимой области в монокристаллах TlGaSe_2 и твердых растворах на их основе. Установить, что при частичном замещении атомов таллия атомами меди происходит сужение пика ФЛ и сдвиг его в коротковолновую сторону спектра.

3. изучить неравновесные процессы в кристаллах TlGaSe_2 . Исследовать механизм рекомбинации основных носителей методом примесной фотопроводимости и ИК - гашения.

4. определить методом термостимулированной проводимости в интервале температур от 77-300К параметры уровней прилипания в кристаллах TlGaSe_2 .

5. разработать фотоприемники на основе монокристаллов TlGaSe_2 для видимой и ближней - ИК областей спектра.

Научно-практическая значимость работы

1. предложены технологии и их режимы для выращивания монокристаллов TlGaSe_2 и твердых растворов на их основе;

2. получены сведения о механизмах электронных, оптических и фононных процессах, происходящих в кристаллах TlGaSe_2 и твердых растворах на их основе способствуют более глубокому пониманию их специфических свойств, например, ионной связи в тетраэдрах Tl - Se ;

3. определены сведения о параметрах уровней прилипания (концентрация, глубина залегания и сечение захвата);

Эти исследования способствуют более глубокому пониманию их специфических свойств, и позволяет рекомендовать данные материалы для создания на их основе:

- приемников излучения в видимой и ближней ИК областях спектра;
- гетеропереходов p- TlGaSe_2 n- CuGaSe_2 ;

Основные положения представленные к защите:

1. Диаграмма состояния псевдобинарной системы $\text{TlGaSe}_2 - \text{CuGaSe}_2$, построенная во всем концентрированном интервале с использованием методов дифференциально-термического (ДТА), рентгенофазового (РФА) и рентгеноструктурного (РСА) анализов.

2. Результаты исследования спектров свечения и возбуждения фотолуминесценции. Установлено, что при частичном замещении атомов таллия атомами меди происходит сужение спектрального пика и сдвиг его в коротковолновую сторону спектра.

3. Определены эффекты и свойства, имеющие прикладное значение и вытекающие из особенностей физических свойств монокристаллов TlGaSe_2 и твердых растворов на их основе, выявленных при исследовании электрических, оптических и фотоэлектрических свойств.

4. Установлена перспективность использования выращенных кристаллов TlGaSe_2 и твердых растворов на их основе, для создания фотоприёмников для видимой и ближней ИК- области спектра.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы обсуждались на: VII Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: (Дагестан: ДНЦ РАН, 2009); Международной конференции «Комбинационное рассеяние – 80 лет исследований» (Москва: ФИАН, 2008); Отдельные этапы работы обсуждались на семинарах Отдела люминесценции ФИАН (Москва).

Достоверность результатов

Всесторонний характер исследований, проведенных автором данной работы на одних и тех же образцах с использованием различных методик физического эксперимента, убеждает в достоверности, представленных результатов и обоснованности выводов, следующих на их основе. Все полученные результаты по исследованным объектам достаточно обоснованы и сопоставлены как с тео-

ретическими расчетами зонных структур, так и с экспериментальными результатами других авторов.

Личный вклад автора

Диссертация представляет итог самостоятельной работы автора, обобщающий полученные им и в соавторстве результаты. Основные положения, выносимые на защиту разработаны и сформулированы совместно с профессором А.Н. Георгобиани и с профессором А.Х. Матиевым. Все положения, выносимые на защиту, были доказаны лично диссертантом. Диссертантом проведены экспериментальные исследования и интерпретация полученных данных.

Автор выражает особую признательность научному руководителю, главному научному сотруднику ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, доктору физ.-мат. наук, профессору, академику РАЕН, А.Н. Георгобиани, а также профессору В.С. Горелику, профессору А.Х. Матиеву, профессору М.М. Хамидову, научным сотрудникам Отдела Люминесценция ФИАН за внимание и содействие в выполнении данной работы.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 7 работ опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 115 страницах, имеет 9 таблиц и 32 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 150 наименований.

Диссертация состоит из 4 глав, из которых две являются оригинальными.

II КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и выбор объектов исследований, сформулирована цель работы и научные положения выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной. В ней систематизирован с критическим анализом, имеющийся в литературе материал относительно исходных объектов исследования настоящей диссертационной работы и соответствующих твердых растворов катионного замещения на их основе. В начале данной главы обстоятельно обсуждаются физико-химические особенности известных полупроводниковых фаз в соответствующих псевдобинарных разрезах, в которых образуются исходные соединения, исследуемых в диссертации сложных полупроводниковых систем. Рассматриваются далее детали кристаллических структур и характер химической связи в указанных соединениях, крайне необходимые для понимания происходящих в них и системах на их основе физических процессов.

В конце главы излагаются литературные данные о физических свойствах исходных соединений TlV^3C^6_2 и твердых растворов катионного замещения на их основе. На основе проведенного анализа сделано заключение что, несмотря на достаточно большое количество публикаций по исследованию физических свойств кристаллов TlGaSe_2 , систематизация и обобщение их является крайне трудной задачей. Обоснована необходимость систематического исследования оптических свойств с использованием методов длинноволновой спектроскопии.

Глава завершается формулировкой постановки решаемых в диссертационной работе задач.

Вторая глава диссертации посвящена подробному описанию режимов синтеза и технологии выращивания монокристаллов, а также изучению фазовых равновесий и кристаллических структур исследуемых объектов. В начале главы, в частности, приводится, построенная диаграмма состояния системы $\text{TlGaSe}_2 - \text{CuGaSe}_2$ во всем концентрационном интервале с использованием методов дифференциально-термического, рентгенофазового, рентгеноструктурного анализов (рис.1).

В результате произведенных физико-химических анализов выявлены соответствующие пределы ограниченных областей взаимной растворимости исходных трехкомпонентных соединений в системе $\text{TlGaSe}_2 - \text{CuGaSe}_2$. С учетом особенностей построенной диаграммы состояния подобраны оптимальные режимы и впервые выращены крупные однородные монокристаллы твердых растворов переменного состава. Выращенные таким образом кристаллы подвергались предварительному дифференциально-термическому, рентгенофазовому, рентгеноструктурному анализам.

В конце главы приведены выводы.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований неравновесных процессов в соединениях TlGaSe_2 по спектрам фотопроводимости, термостимулированной проводимости.

Спектральное распределения фотопроводимости TlGaSe_2 снятые при 77 и 300 К, представлены на рис.2. Из рис.2. видно, что при комнатной температуре на спектральной зависимости фотопроводимости имеются ступенки и максимум при энергии 2,19 и 2,30 эВ.

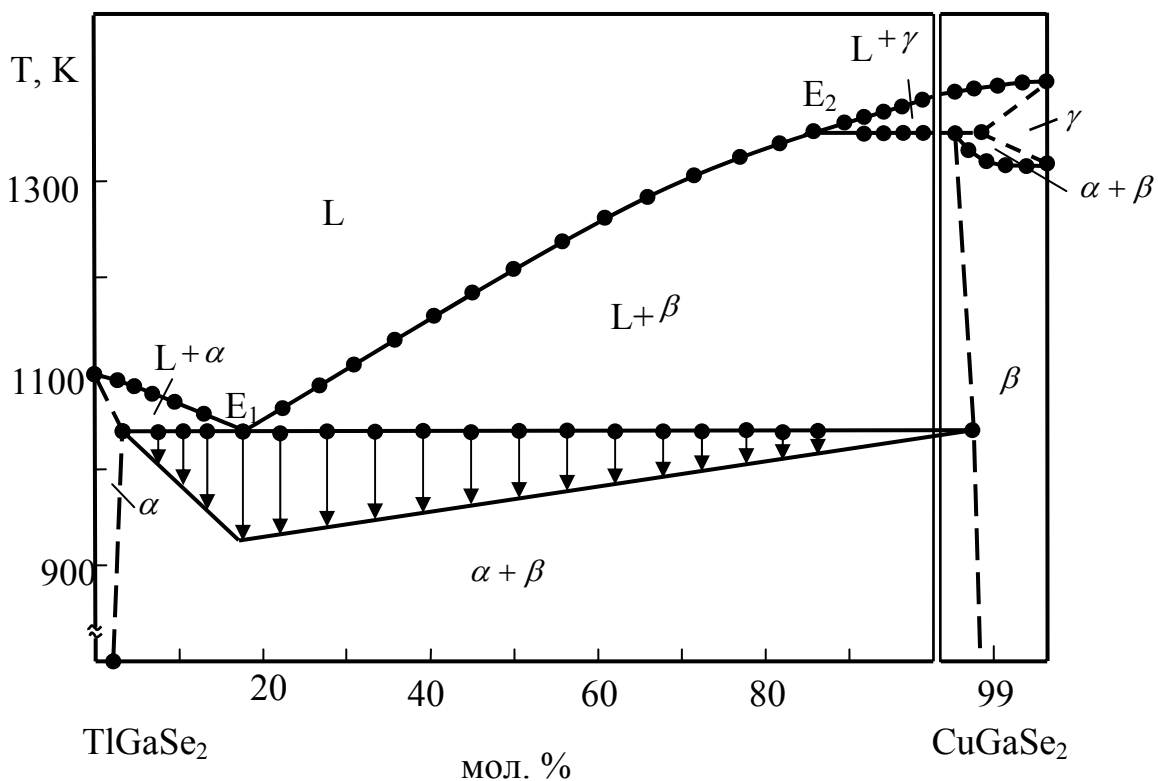


Рис.1. Диаграмма состояния системы $\text{TiGaSe}_2 - \text{CuGaSe}_2$

Резкий спад фототока при освещении кристалла светом с энергией кванта $h\nu < 2,3 \text{ эВ}$ говорит о том, что максимум, наблюдаемый при $h\nu = 2,3 \text{ эВ}$, соответствует собственному максимуму фототока. При температуре 77 К наблюдаются три четко выраженных фототока при энергиях $2,16 \text{ эВ}$, $2,49 \text{ эВ}$, $2,60 \text{ эВ}$. Температурный коэффициент и ширина запрещенной зоны, вычисленные из спектральных характеристик фотопроводимости, хорошо согласуются с наблюдаемыми прямыми переходами в кристаллах TiGaSe_2 . Исчезновение структуры на спектральной зависимости TiGaSe_2 с ростом температуры и смещение максимума фотопроводимости в сторону меньших энергий обусловлено интенсивным экситон-фононным взаимодействием при высоких температурах.

Наблюдения индуцированной примесной фотопроводимости и инфракрасного гашения фотопроводимости показывают, что в монокристаллах типа TiGaSe_2 рекомбинация основных носителей происходит по двум направлениям: через быстрые (s) и медленные (r) центры с участием уровней прилипания.

Для определения концентрации, энергетических уровней и сечения захвата носителей заряда был использован метод термостимулированной проводимости в интервале $77 \div 360 \text{ К}$ в кристаллах типа TiGaSe_2 (рис.3) Концентрация, глубина залегания и центров захвата приведен в табл. 1.

Энергии ионизации центров захвата и сечения захвата носителей тока были определены по формулам [1,2]

$$E_i = kT_M \ln\left(\frac{qN_c\mu}{\sigma_m}\right) \quad (1)$$

$$S = \frac{bE_i}{\nu_T kT_M^2 n_M} \quad (2)$$

где $\mu = 20 \text{ В/см}^2 \cdot \text{с}$, $N_c = 1,95 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, ν_T -тепловая скорость носителя, n_M - концентрации свободных носителей при T_M , равны 0,26, 0,51 и $4 \cdot 10^{-19}$, $3 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ соответственно.

В конце главы приведены выводы.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований колебательных, оптических и электрофизических свойств монокристаллов TlGaSe_2 и твердых растворов на их основе.

Исследования на электронном микроскопе LEO-1450 (рис.4)показывают, что образцы имеют зеркальную поверхность и слоистую структуру, и в дополнительной полировке не было необходимости.

Известно, что составляющие $\text{TlB}^3\text{C}^6_2(\text{B-In, Ga; C-S, Se})$ катионы Tl^{+1} и B^{+3} являются элементами третьей группы и обеспечивают различные координации атомов, валентные состояния и характер химических связей. Эти особенности являются причиной резкой анизотропии физических свойств этой группы материалов. Физические характеристики и фазовый состав является крайне важным для тонкопленочных солнечных элементов. Комбинационная спектроскопия является наиболее естественным и удобным методом для осуществления этой цели. Комбинационное рассеяние света в кристаллах было открыто выдающимися российскими учеными (Л.И. Мандельштамом, Г.С. Ландсбергом).

Этот процесс представляет собой неупругое рассеяние света на молекулярных колебаниях или фононах среды, при этом частота рассеянного света становится меньше частоты падающего света на частоту молекулярных колебаний, обычно лежащую в диапазоне от 100 до 3000 см^{-1} для конденсированных сред.

Спектры комбинационного рассеяния содержат всю информацию о фазовом составе образца, и проблема состоит в том, чтобы извлечь эту информацию как можно полнее.

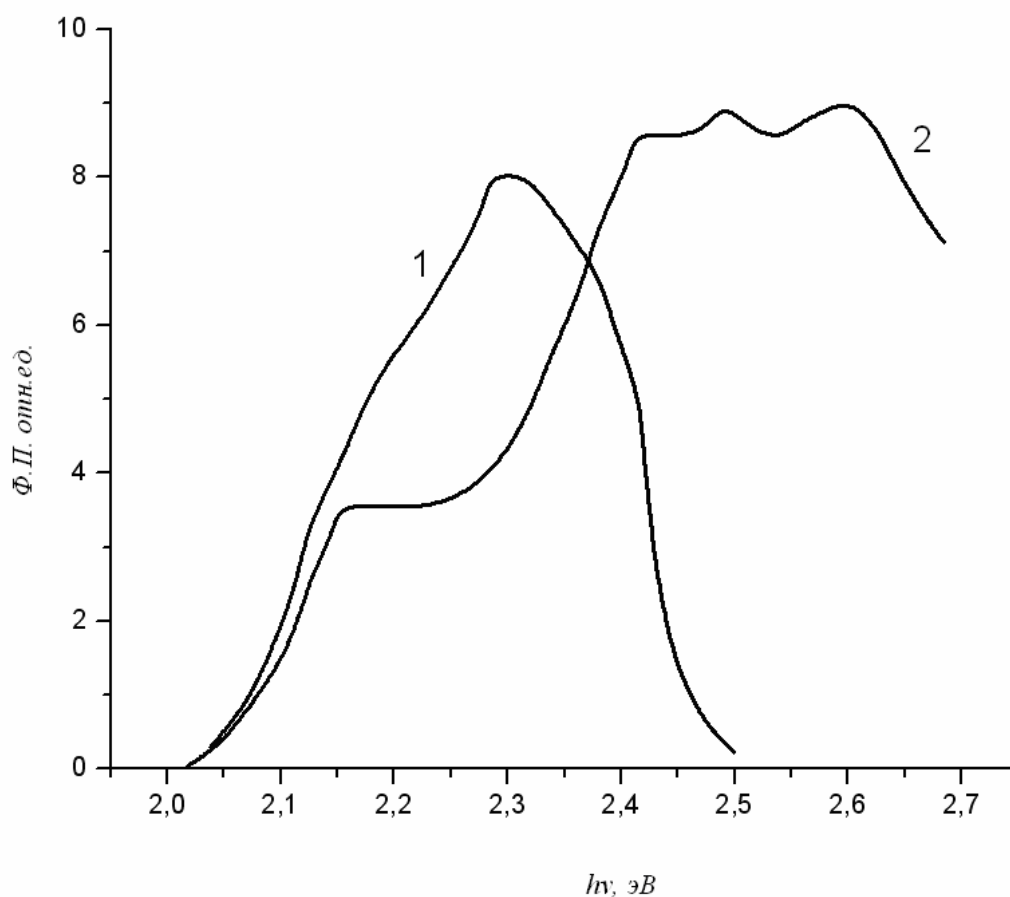


Рис. 2. Спектры фотопроводимости TI GaSe_2 при $T, \text{K}: 1 - 300; 2 - 77$

Спектр комбинационного рассеяния (КРС) в TI GaSe_2 , богат вследствие низкой симметрии кристалла и большого числа атомов в элементарной ячейке $Z=16$. Спектры КРС были получены при температуре 300К (рис.5) в интервале частот $10\text{-}1400 \text{ см}^{-1}$. Кристалл TI GaSe_2 имеет вторую из возможных по рентгеноструктурным данным группу симметрии C_{2h}^6 . Симметрия C_{2h}^6 подтверждается отсутствиями пьезоэлектричества в TI GaSe_2 и генерации второй гармоники. Известные спектры КРС кристаллов TI и GaSe позволяют сделать вывод, что частоты внутренних колебаний слоя должны превышать 50 см^{-1} . При сравнении с расчетным числом по корреляционному анализу нужно учесть, что в структуре типа TISe имеются как ковалентные, так и ионные связи. Причем интенсивность колебаний, относящаяся к ионным связям, обычно мала, и соответствующие частоты скорее всего, не проявляются в спектрах КРС. Частота межслоевого колебания является определенной характеристикой силы связи между слоями.

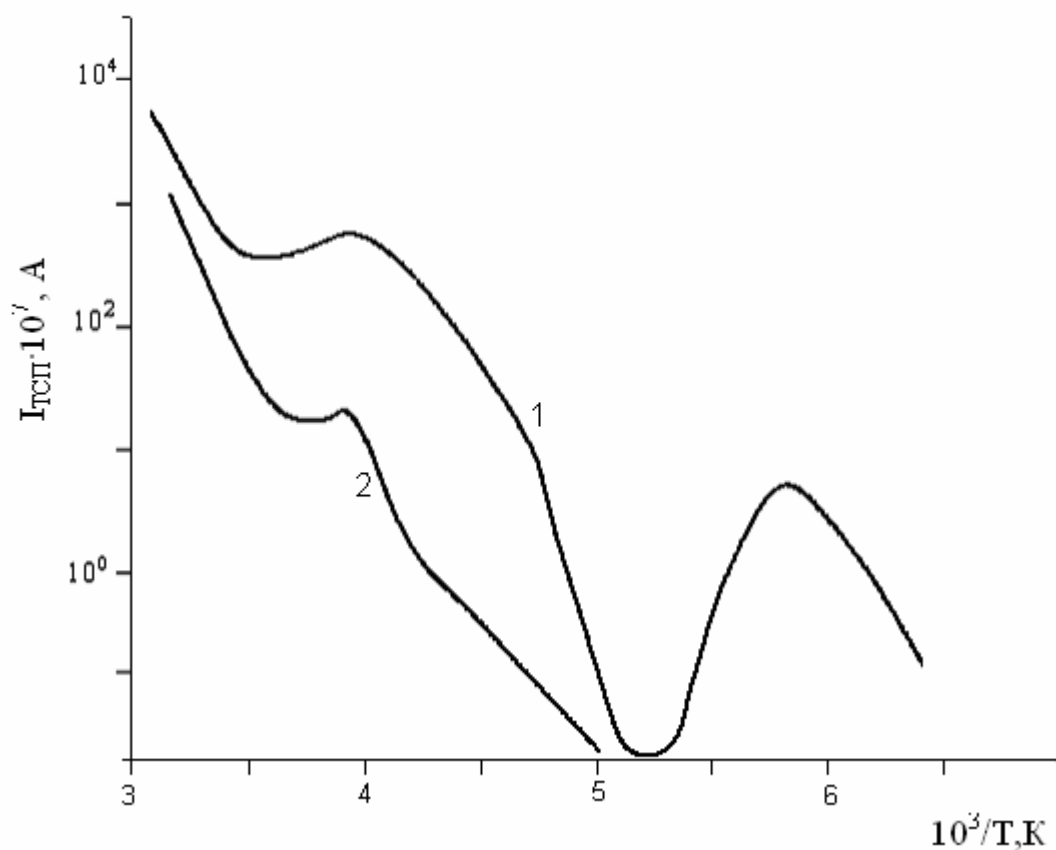
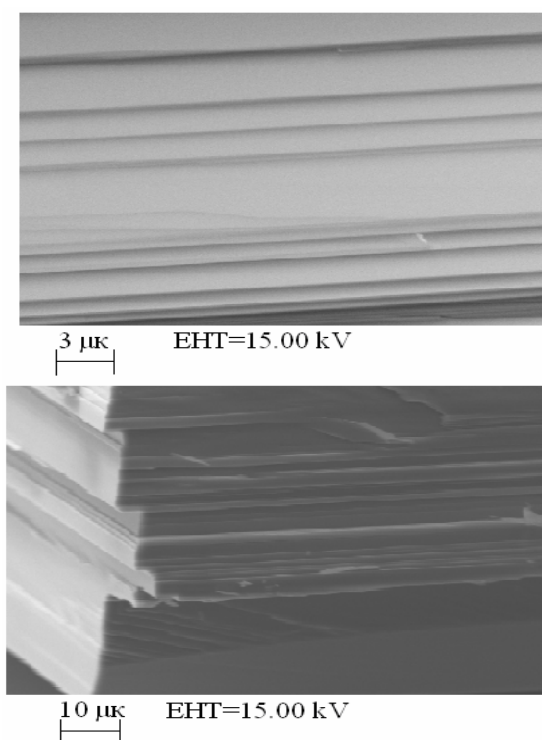


Рис. 3. Спектры термостимулированного тока при 77К:
 1- контакты нанесены перпендикулярно плоскостям скола,
 2- контакты нанесены параллельно плоскости скола

ПАРАМЕТРЫ ПРИМЕСНЫХ УРОВНЕЙ СОЕДИНЕНИЙ
 TiGaSe₂, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ПО ТСП

Таблица 1

T_M, K	$E_t, эВ$	$N_t, см^{-3}$	$s, см^2$
TiGaSe ₂			
173	0,26	$9,2 \times 10^{14}$	4×10^{-19}
263	0,51	$7,4 \times 10^{13}$	3×10^{-18}



**Рис.4. Микрофотографии
монокристаллов TI GaSe₂**

В спектре КРС кристалла TI GaSe₂ наблюдаются частоты большие 50см^{-1} . Отсюда можно заключить, что слои в данном кристалле связаны между собой силами не меньшими, чем в кристаллах типа GaSe.

Некоторые линии – $60, 230\text{ см}^{-1}$ в TI GaSe₂ не имеют своих аналогов в литературе. При понижении температуры разрешение линий улучшается, и сходство спектров становится более полным. Подобие спектров подтверждает изоструктурность исследованных кристаллов. При замене в кристалле TI GaSe₂ атома Se на атом S и атома Ge на более тяжелый атом In все частоты пиков в спектрах уменьшаются. В спектре монокристаллов наблюдались слабые широкие линии 340, 410, 770, 790. Из отношения интенсивностей этих линий в стоксовой и антистоксовой области спектра следует, что они относятся к колебаниям второго порядка.

Спектр ВЛ TI GaSe₂ при длине волны регистрации $\lambda_{\text{рег}}=630\text{ нм}$, соответствующей наблюдаемым максимумам полосы ФЛ представлен на рис.6. Спектр имеет сложный характер, и область возбуждения простирается от ультрафиолетового диапазона ($\lambda_{\text{возб}}=190\text{ нм}$) до голубого ($\lambda_{\text{возб}}=470\text{ нм}$). В них наблюдаются максимумы при $\lambda_{\text{возб}}=205, 268, 311, 372, 393\text{ нм}$.

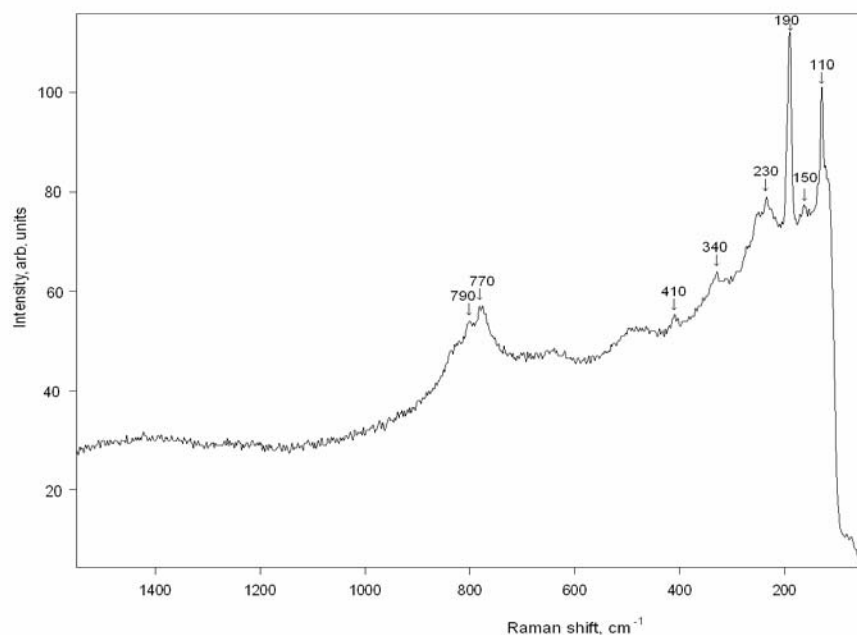


Рис.5 Спектр комбинационного рассеяния света соединением TI GaSe_2 при $T=300\text{K}$

На рис.7. представлен спектр фотолюминесценции (ФЛ) TI GaSe_2 при 300K. В спектре наблюдается ярко выраженная линия с максимумом при 630нм. Его полуширина 36нм. Линия ФЛ обусловлена рекомбинационными излучениями акцепторно-донорных пар наблюдающихся в тройных полупроводниковых соединениях. При фотовозбуждении донорно-акцепторных парах рекомбинация носителей заряда происходит излучательным образом. При низких интенсивностях возбуждения только малая часть донорных или акцепторных ловушечных центров захватывает носители заряда. Это приводит к рекомбинации в основном удаленных пар. Кулоновское взаимодействие между ионизованными примесями вносит большой вклад в энергию излучения фотонов в донорно-акцепторных парах.

В твердых растворах спектр КРС при 300K показан на рис.8. в интервале частот $10\text{-}1500\text{ см}^{-1}$. Из спектра видно, что при комнатной температуре наблюдаются 12 линий. Была обнаружена интенсивная резкая линия в узкой области на частоте 200 см^{-1} и ряд полос с более высокими частотами: 80, 110, 150, 320, 340, 420, 470, 630, 650, 780 и 1480 см^{-1} . Присутствие резкой интенсивной полосы было объяснено проявлением плоских мод.

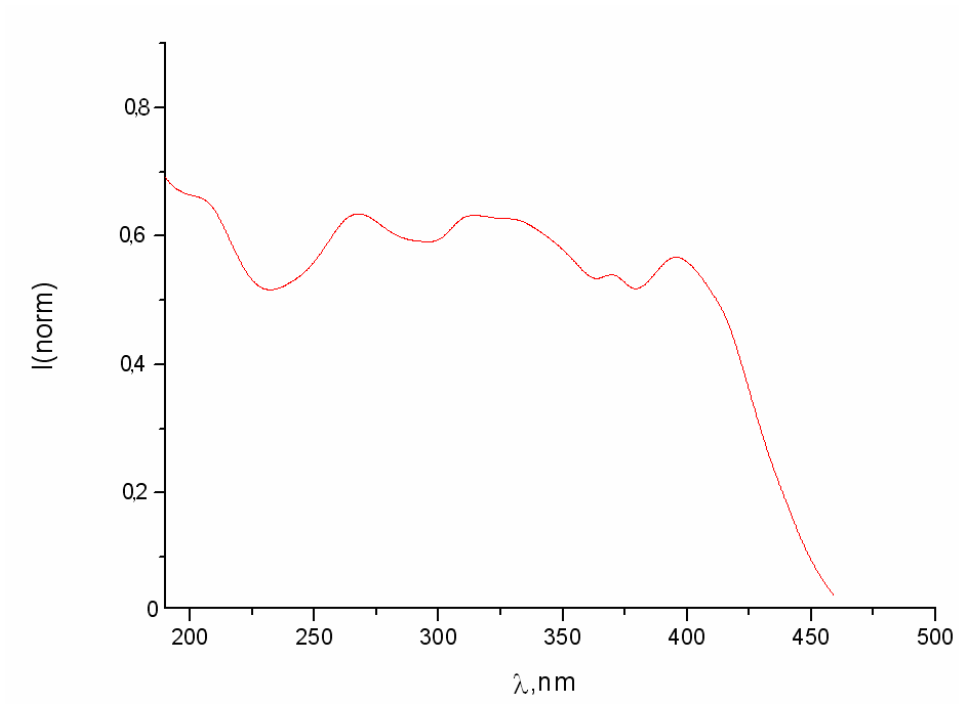


Рис.6. Спектр возбуждения TlGaSe_2 при $T=300\text{K}$

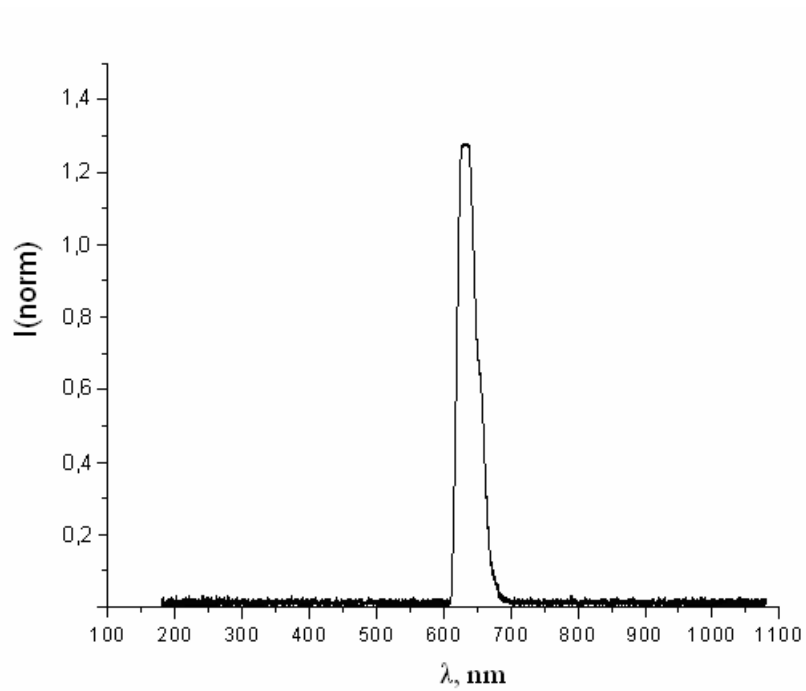


Рис.7. Спектр фотолюминесценции TlGaSe_2 при $\lambda_{\text{возб}}=520 \text{ nm}$ и $T=300\text{K}$.

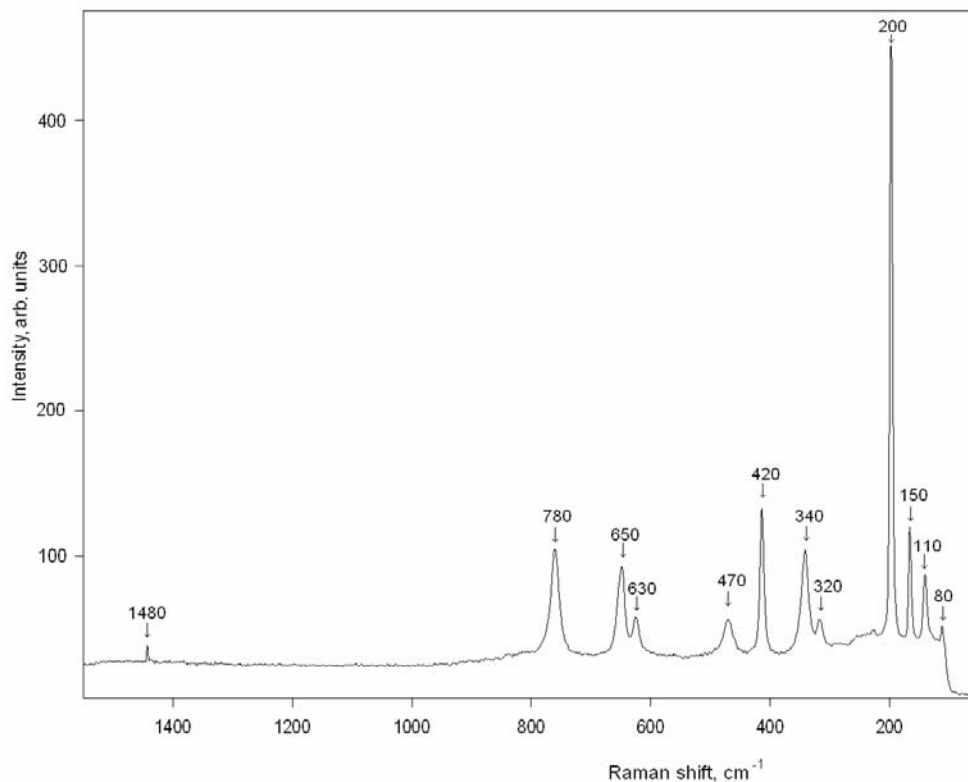


Рис.8. Спектр комбинационного рассеяния света в $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ при $T=300K$.

Частичное замещение атомов таллия атомами меди приводит к возникновению новых узких линий в указанном спектре 420, 470, 630, 650, 780 и 1480 см^{-1} . Здесь по-видимому, играет существенную роль, кроме фактора массы, также резкое изменение силы связи между атомами. На наш взгляд, частичное замещение атомов таллия атомами меди, приводит к ослаблению силы связи $Tl-Se$ в восьмивершиннике. Некоторые линии – $80, 110\text{ см}^{-1}$ в $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ не имеют своих аналогов в литературных данных. Спектр ВЛ $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ при длине волны регистрации $\lambda_{рег}=630\text{ нм}$, соответствующей наблюдаемому максимуму полосы ФЛ представлен на рис.9. Область возбуждения простирается от ультрафиолетового диапазона ($\lambda_{возб}=190\text{ нм}$) до голубого ($\lambda_{возб}=470\text{ нм}$). В ней наблюдаются максимумы при $\lambda_{возб}=213, 268, 290, 336, 398, 448\text{ нм}$.

На рис.10. показан спектр ФЛ $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ измеренный в интервале длин волн 200-900 нм при $T=300K$. В спектре наблюдается ярко выраженный максимум 624нм. Полуширина максимума составляет 31 нм. При частичном замещении атомов таллия атомами меди происходит сужение пика и сдвиг излучения в коротковолновую сторону спектра.

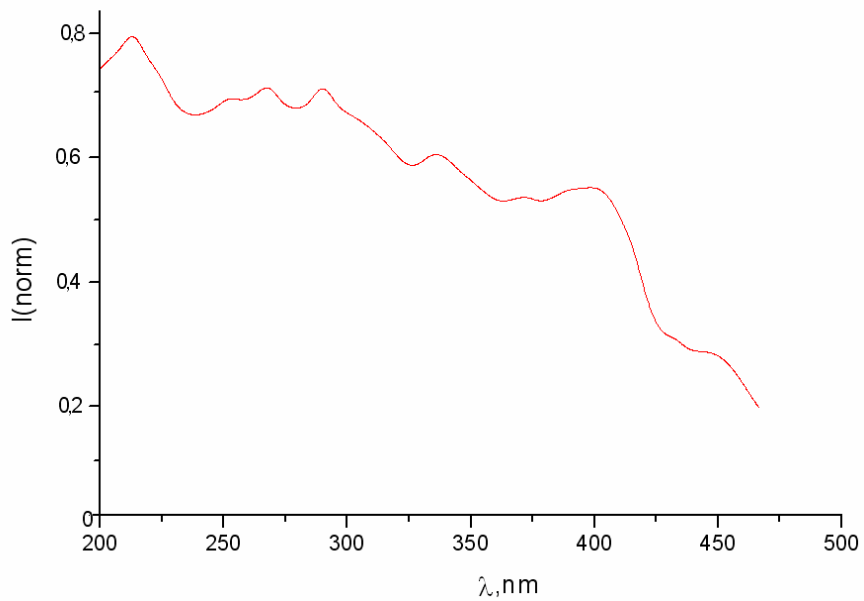


Рис.9. Спектр возбуждения ФЛ в $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ при $T=300K$

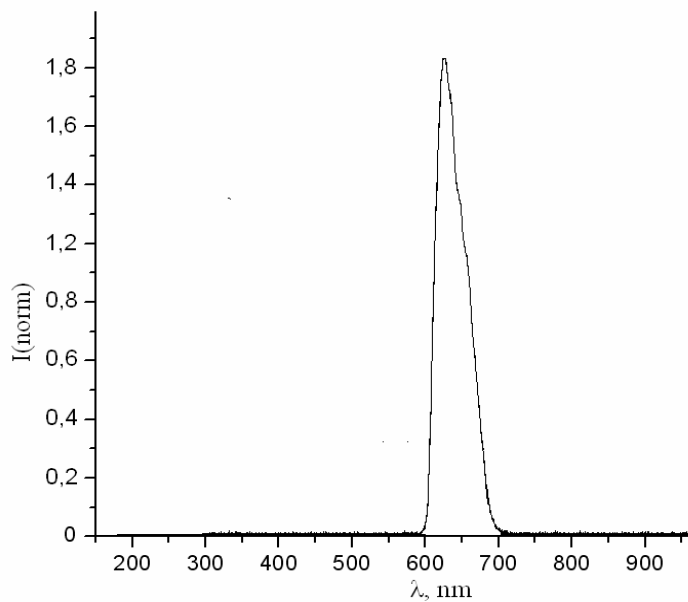


Рис.10. Спектр фотолюминесценции $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$
при $\lambda_{\text{возб}}=520$ нм и $T=300K$.

III ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. С учетом физико-химических особенностей выбраны оптимальные технологические параметры и выращены крупные ($l = 5-10$ см) однородные кристаллы систем $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$. Методами дифференциально-термического, рентгено-структурного анализов установлена идентичность выращенных кристаллов с исходными $TlGaSe_2$.

2. Впервые проведен физико-химический анализ и построена диаграмма состояния псевдобинарной системы $TlGaSe_2 - CuGaSe_2$. На основании результатов дифференциально-термического, рентгенофазового, рентгено-структурного анализов и комплекса других физических измерений установлено, что диаграмма состояния системы $TlGaSe_2 - CuGaSe_2$ представляет собой квазибинарный разрез с ограниченными взаимными растворимостями исходных компонентов в твердом состоянии. В системе $TlGaSe_2 - CuGaSe_2$ растворимость $CuGaSe_2$ в $TlGaSe_2$ при комнатной температуре составляет 2 мольн.%, а $TlGaSe_2$ в $CuGaSe_2$ 1,5 мольн.%.

3. Установлено, что при частичном замещении атомов таллия атомами меди в спектре ФЛ происходит сужение пика и сдвиг излучения в коротковолновую сторону спектра, связанный с изменением кристаллической структуры.

4. Показано, что частичное замещение атомов таллия атомами меди в монокристаллах $TlGaSe_2$ существенно влияет на спектр комбинационного рассеяния света. Выявлено, что замещение атомов таллия атомами меди перестраивает фонный спектр в области значений $200\div 700$ cm^{-1} . Здесь играет существенную роль, кроме фактора массы, также резкое изменение силы связи между атомами.

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. А.Н. Георгобиани, А.Х. Матиев, Б.М. Хамхоев, А.М. Евлоев «Диаграмма состояния системы в системах $TlGaSe_2 - CuGaSe_2$ » Неорганические материалы, т.41, №3, 2005, С.148-150

2. А.Н. Георгобиани, А.Х. Матиев, Б.М. Хамхоев, А.М. Евлоев «Фазовые равновесия в системах $TlGaSe_2 - CuGaSe_2$ и $TlInSe_2 - AgInSe_2$ » Неорганические материалы, т.41, №2, 2006, С.224-229

3. А.Н. Георгобиани, А.Х. Матиев, А.М. Евлоев «Исследование фотоэлектрических свойств монокристаллов $TlGaSe_2$ » Изв. Вузов. Материалы электронной техники. 2008. №1. С.29-31

4. А.Н. Георгобиани, А.М. Евлоев «Комбинационное рассеяние света в полупроводниковом кристалле TlGaSe_2 ». Тезисы докладов Международной конференции «Комбинационное рассеяние – 80 лет исследований». М.: ФИАН, 2008.

5. VII Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: Дагестан: ДНЦ РАН, 2009. С.301

6. А.Н. Георгобиани, В.П. Токарева, А.М. Евлоев, Е.В. Перлов Спектры комбинационного рассеяния света в монокристаллах TlGaSe_2 . Краткие сообщения по физике ФИАН, 2009, №.10, С.19-23

7. А.Н. Георгобиани, А.М. Евлоев, Н.П. Дацкевич, В.П. Токарева, Е.В. Перлов, С.В. Семендяев Фотолюминесценция монокристаллов $\text{Tl}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ Краткие сообщения по физике ФИАН, 2009 № 10, С.24-28

8. А.Н. Георгобиани, А.М. Евлоев Комбинационное рассеяние света и электрофизические свойства монокристаллов $\text{Tl}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ Краткие сообщения по физике ФИАН, 2009 № 11.

9. А.Н. Георгобиани, А.М. Евлоев Спектры фотолюминесценции в полупроводниковых структурах TlGaSe_2 Краткие сообщения по физике ФИАН, 2009 № 11.

Список цитируемой литературы

1. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир. 1973. С. 451.

2. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. М.: Мир. 1976. С. 24-28.

3. Лисица М.П. Спектрофотометрический метод исследования дисперсии и поглощения твердых веществ. Докл. АН СССР. 1956. Т.3. С.803-805.

4. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука. 1977. С. 366.

5. Сонки А.С., Василевская А.С. Электрооптические кристаллы. - М.: Атомиздат. 1971. С. 328.

6. Волков А.А., Гончаров Ю.Г., Козлов Г.В. и другие. Сегнетоэлектрическая мягкая мода в полупроводниковом кристаллах типа TlGaSe_2 . Письма в ЖЭТФ. 1983. Т.37. В.11. С. 517-520.