

ЧЕРНОВИЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Юрия ФЕДЬКОВИЧА

На правах рукописи

МАХНИЙ Виктор Петрович

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ
НА ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ А²В⁶

01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Черновцы-1992



00819637 (Y)

Работа выполнена на кафедре физики
государственного университета им. В. Стефаніка

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН Молдовы,
доктор физико-математических наук,
профессор Симашкевич А.В.
доктор физико-математических наук,
профессор Курик М.В.
доктор физико-математических наук,
профессор Ковалюк З.Д.

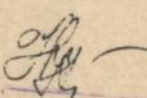
Ведущая организация: институт полупроводников АН Украины

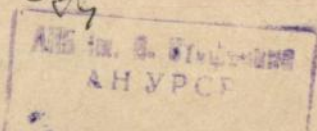
Защита состоится "27" ноября 1992 г. на заседании
специализированного совета Д 068.16.01 Черновицкого государ-
ственного университета им. Юрия Федьковича по адресу:
274012, г. Черновцы, ул. Котлябинского, 2. Черновицкий гос-
университет.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Черновицкого государственного университета, ул. Леси Украинки, 23.

Автореферат разослан "26" сентября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

 Н.В. Курганецкий



Актуальность темы. Основой большинства полупроводниковых приборов является контактный энергетический барьер, определяющий выпрямляющие, инжектирующие, фотоэлектрические, электролюминесцентные и другие свойства. Однако, к настоящему времени элементная база микро- и оптоэлектроники ограничена главным образом использованием элементарных полупроводников, а также узкозонных соединений A^3B^5 и A^2B^6 с шириной запрещенной зоны $\leq 1,5$ эВ. Вместе с тем использование широкозонных полупроводников позволило бы существенно повысить ряд эксплуатационных параметров приборов (рабочую температуру, быстродействие, критическую напряженность электрического поля, радиационную стойкость, температурную стабильность и др.) и тем самым расширить границы областей их применения.

С этой точки зрения перспективными являются в первую очередь широкозонные соединения A^2B^6 и их твердые растворы [1]. Большой диапазон изменения ширины запрещенной зоны (1,5+3,7 эВ), а также высокие фоточувствительность и вероятность излучательной рекомбинации, позволяют использовать их в качестве источников и приемников видимого и ультрафиолетового излучения. Кроме того, использование более широкозонного материала при том же уровне легирования приводит к существенному увеличению напряжения лавинного пробоя [2]. Большой атомный номер в сочетании с высокой радиационной стойкостью делают соединения A^2B^6 пригодными для создания полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений [3].

Широкое использование этих материалов в разрабатываемых элементах полупроводниковой электроники сдерживается отсутствием решений ряда практических и теоретических задач. Большое разнообразие собственных дефектов и склонность к самокомпенсации

обуславливают преимущественную монополярную проводимость соединений A^2B^6 (за исключением теллурида кадмия), что является главным препятствием на пути создания р-п-гомопереходов. Необходимые условия для изготовления на этих материалах анизотипного гетероперехода (ГП) с совершенной границей раздела (идентичность кристаллической структуры и согласование постоянных решеток) выполняются только для кубических модификаций селенида кадмия и теллурида цинка [4, 5]. Применяемая в настоящее время технология поверхностно-барьерных диодов (ПВД) на широкозонных полупроводниках (в том числе и на фосфиде галлия - наиболее широкозонном из коммерчески используемых материалов) в большинстве случаев не позволяет использовать их в приборах, работающих при обратных смещениях, вследствие "микроплазменного" характера пробоя. Имеющиеся в литературе результаты исследований свойств диодных структур на широкозонных полупроводниках посвящены в основном решению узких конкретных задач, разобщены, а порой и противоречивы. Кроме того, целый ряд наблюдаемых характеристик не находят объяснения в рамках существующих теорий контактных явлений [2, 4 - 7].

Из вышеизложенного следует, что разработка технологии изготовления и исследование физических процессов в диодных структурах на основе широкозонных полупроводников представляют собой актуальную научную и техническую задачу.

Цель работы - комплексное исследование физических процессов и установление общих закономерностей контактных явлений в диодных структурах различного типа на основе широкозонных полупроводников, изучение возможностей их практического применения. Для ее достижения представляется необходимым:

I. Исследовать и провести анализ основных физико-химических процессов и методов, учитывающих особенности технологии

получения диодов на основе широкозонных соединений (CdTe , CdSe , CdS , ZnTe , ZnSe , ZnS и GaP) и выбрать оптимальные условия изготовления выпрямляющих структур различного типа (поверхностно-барьерных диодов, МДП-структур, p-p-гомо- и гетеропереходов) с воспроизводимыми и стабильными характеристиками.

2. Провести комплексное исследование электрических, оптических, фотоэлектрических и излучательных свойств диодов и установить их связь с технологическими условиями получения структур.

3. Выяснить роль в формировании электрических, фотоэлектрических и электролюминесцентных характеристик исследуемых диодов различных механизмов - надбарьерного прохождения носителей, генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, различных видов туннелирования, токов ограниченных пространственным зарядом и ударной ионизации.

4. Исследовать возможности практического применения диодов и обосновать на примерах конкретных разработок.

Объект и методы исследования. Исследовались диодные структуры различного типа (ПВД, МДП, p-p-гомо- и гетеропереходы), полученные применением соответствующих технологических методов - вакуумного напыления, сплавления, диффузии, отжига в активированных парах халькогена, реакций твердофазного замещения и ионного легирования. Подложками служили монокристаллы фосфида галлия, халькогенидов кадмия и цинка с концентрацией нескомпенсированной примеси в пределах от 10^{15} до нескольких единиц 10^{18} см^{-3} .

Решение поставленной задачи базируется на использовании комплекса экспериментальных и теоретических методов, включающих исследование электрических, емкостных, фотоэлектрических, оптических, излучательных и других свойств диодов. Измерения проводились в широком температурном ($4,2 \pm 500 \text{ К}$) и спектральном

(0,5–6 эВ) диапазонах, широких пределах изменения уровня возбуждения и других условий опыта. В подавляющем большинстве случаев экспериментальные исследования подтверждались результатами теоретического анализа и расчетов.

Научная новизна.

1. Впервые изготовлены лабораторные образцы анизотипных гетеропереходов с совершенной границей раздела на соединениях A^2B^6 с сильно рассогласованными решетками, а также на основе материалов с ярко выраженной монополярной электронной проводимостью. Для получения ПБД на основе используемых полупроводников впервые применена технология, исключая влияние поверхностных и краевых утечек, промежуточного слоя, а также микро неоднородностей по площади выпрямляющего контакта.

2. Выработан единый подход для рассмотрения механизмов токопрохождения в выпрямляющих структурах различного типа и установлена их связь с технологией получения диода, а также с его фотоэлектрическими и электролюминесцентными характеристиками.

3. Установлена роль надбарьерного прохождения носителей в образовании тока диодов различного типа, проведена интерпретация экспериментальных результатов. Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать диффузионную длину и время жизни неосновных носителей заряда в структурах с р-п-гомопереходом на основе широкозонных полупроводников.

4. Изучены особенности генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда ПБД с участием единичных глубоких центров, а также донорно-акцепторных пар. Предложены физические модели и получены аналитические выражения, описывающие генерационно-рекомбинационные токи в исследуемых ПБД.

5. Выявлены условия, при которых существенное влияние на свойства диодных структур оказывает туннелирование носителей. Для объяснения наблюдаемых зависимостей проведено теоретическое рассмотрение туннельных процессов с участием глубоких уровней, а также стимулированных теплом. Получены аналитические выражения в рамках параболического и кейновского законов дисперсии. Предложен метод определения реального закона дисперсии из вольт-амперных характеристик ПБД.

6. Обнаружено явление аномально слабой температурной зависимости обратного тока ряда исследуемых диодов в определенной области напряжений. Предложена модель и получены аналитические выражения, связывающие наблюдаемые характеристики с основными параметрами выпрямляющей структуры. Исследованы лавинные процессы, определено участие в них электронов и дырок.

7. Экспериментально изучены фотоэлектрические свойства, установлена их связь с технологией получения и основными параметрами диодных структур, а также с условиями эксплуатации (интенсивность и спектральный состав облучения, температура, полярность и величина смещения и т.п.)

8. В широком спектральном и температурном диапазонах исследованы спектры излучения диодов при прямом и обратном смещениях, проведена их интерпретация. Установлены механизмы возникновения электролюминесценции в ее связи с процессами переноса заряда через барьер. Предложена и теоретически обоснована модель излучательной рекомбинации в области пространственного заряда ПБД через донорно-акцепторные пары.

Практическая ценность.

1. Результаты экспериментальных исследований в изучаемых диодных структурах предопределяют пути целенаправленного управления

их параметрами, а также могут быть использованы при разработке новых и усовершенствовании существующих приборов, основой работы которых является выпрямляющий барьер на базе широкозонного полупроводника.

2. Предложен метод определения диффузионной длины и времени жизни неосновных носителей в структурах с р-п-гомопереходом на основе широкозонных полупроводников (положительное решение 4774413/25 от 13.05.91 г.).

3. На уровне изобретения разработана воспроизводимая дешевая технология создания омических контактов к р-п-переходам на основе широкозонных соединений A^3B^5 - арсенида и фосфида галлия (а.с. 1630567 от 19.07.88 г.).

4. Предложен способ изготовления излучающего элемента с р-п-переходом, который может быть использован при массовом производстве единичных и многоэлементных устройств визуального отображения информации (положительное решение 4872244/25 от 29.07.91 г.).

5. Разработана технология получения ПБД и созданы лабораторные образцы:

а) фотодетекторов для спектральной области $0,2+0,8$ мкм с квантовой эффективностью $0,5+0,8$ электрон/квант. На базе контактов золото-сульфоселенид цинка созданы лабораторные образцы детекторов загарного и эритемного спектров действия;

б) "солнечно-слепых" фотодетекторов с коэффициентом использования спектра солнечного излучения меньше 10^{-3} , основой которых является ПБД на сульфиде цинка;

в) инжекционных светодиодов на основе контакта золото-сульфид цинка с внешней квантовой эффективностью 10^{-3} квант/электрон при 300 К в зелено-голубой области спектра (положительное

решение 4878285/25 от 13.06.91 г.);

г) предпробойных излучателей с равномерным распределением свечения по площади выпрямляющего контакта, обладающих высокой временной и температурной стабильностью (положительное решение 4657196/25 от 21.01.91 г. и 4941430/25 от 14.01.92 г.).

6. Разработана технология получения анизотипных ГП на базе соединений A^2B^6 и созданы лабораторные образцы:

а) широкополосных и селективных фотодетекторов для спектрального диапазона $0,3+1,0$ мкм с квантовой эффективностью $0,5+0,8$ электрон/квант;

б) фотопреобразователей на основе ГП сульфид теллурид кадмия, имеющих в условиях освещенности AM2 при 300 К к.п.д. преобразования солнечной энергии в электрическую до 9% ;

в) фотодетекторов на основе ГП сульфид-селенид цинка и селенид-теллурид кадмия, имеющих в режиме инжекционного усиления токовую чувствительность 10 и 100 А/Вт для 0,34 и 0,63 мкм соответственно;

г) на базе кристаллов селенида цинка и сульфида кадмия, легированных теллуром, созданы лабораторные образцы монолитных устройств "сцинтиллятор-фотодиод" с дозовой чувствительностью до $3 \cdot 10^{-3}$ В·Р⁻¹ час;

д) инжекционных светодиодов на основе анизотипных ГП сульфид-селенид цинка с максимумом излучения 0,48 мкм и внешней квантовой эффективностью 10^{-4} квант/электрон при 300 К.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Лабораторная технология изготовления выпрямляющих структур различного типа (поверхностно-барьерных диодов, МП-структур, р-п-гомо- и гетеропереходов) на базе широкозонных соединений A^2B^6 и фосфида галлия, позволяющая получать диоды с воспроизво-

димыми и стабильными параметрами и характеристиками, а на их основе создавать различные оптоэлектронные приборы и устройства.

2. Методики измерений и расчета характеристик и параметров образцов с учетом особенностей, связанных с широкой запрещенной зоной полупроводника. Впервые предложенные способы нахождения закона дисперсии в запрещенной зоне полупроводника, а также определения малых значений диффузионных длин и времени жизни неосновных носителей в структурах с р-п-гомопереходом.

3. Физические модели и соответствующие теоретические выражения, объясняющие ряд наблюдаемых явлений:

а) зависимость высоты потенциального барьера ПВД от уровня легирования полупроводниковой подложки;

б) особенности генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда ПВД с участием единичных глубоких центров и донорно-акцепторных пар;

в) влияние на характер протекания туннельных процессов основных параметров полупроводника и выпрямляющей структуры, условий опыта, глубоких уровней и отклонения закона дисперсии для туннелирующего носителя от параболического;

г) аномально слабую температурную зависимость обратного тока ряда диодов при определенном значении напряжения.

4. Предложения по практическому использованию исследуемых диодных структур в оптоэлектронике, дозиметрии, спектрофотометрии и других областях.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на: Всесоюзных совещаниях и конференциях по электролюминесценции (Ставрополь - 1973 г., Днепропетровск - 1977 г., Запорожье - 1979 г., Вильнюс - 1989 г., Ангарск - 1991 г.); IV и VI Всесоюзных совещаниях "Физика, химия и технические применения полупроводников A^2B^6 " (Киев - 1976 г., Ужгород - 1988 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Получение и свойства полупроводниковых соединений A^2B^6 и A^2B^4 и твердых растворов на их основе" (Москва - 1977 г.); III и V Всесоюзных конференциях по физическим процессам в полупроводниковых гетеропереходах (Одесса - 1982 г., Калуга - 1990 г.); V Всесоюзном совещании "Физика и техническое применение полупроводников A^2B^6 " (Вильнюс - 1983 г.); III Всесоюзном совещании "Физика и технология широкозонных полупроводников" (Махачкала - 1986 г.); II Всесоюзной конференции "Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов" (Кишинев - 1986 г.); II и III Всесоюзных конференциях "Материаловедение халькогенидных и кислородосодержащих полупроводников" (Черновцы - 1986, 1991 г.); республиканском семинаре "Оптическая техника и интегральная оптика" (Киев - 1987 г.) V республиканской конференции "Физические проблемы МДП-интегральной электроники" (Дрогобыч - 1987 г.); I Всесоюзном семинаре "Низкотемпературное легирование полупроводников и многослойных структур микроэлектроники" (Устинов - 1987 г.); V Всесоюзной конференции "Физика и применение контакта металл-полупроводник" (Киев - 1987 г.); Всесоюзной школе "Физико-химические основы электронного материаловедения" (Новосибирск - 1988 г.); I Всесоюзной конференции "Физические основы твердотельной электроники" (Ленинград - 1989 г.); координационном совещании социалистических стран по проблемам оптоэлектроники

(Вару - 1989 г.); Всесоюзной конференции "Оптико-электронные измерительные устройства и системы" (Томск - 1989 г.); IV и V международных конференциях по полупроводникам A^2B^6 (Берлин - 1989 г., Осака - 1991 г.); международной конференции "Поликристаллические полупроводники" (Швабиш Холл - 1990 г.), а также на итоговых научных конференциях профессорско-преподавательского состава Черновицкого госуниверситета 1973-1992 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 84 работы, из которых 6 авторских свидетельств на изобретения. Список публикаций, содержащих основные результаты диссертационной работы, приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и содержит 293 страницы машинописного текста, 120 рисунков, 14 таблиц, 193 наименования цитируемых работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранного направления исследования, формулируется цель и основные задачи работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, кратко излагается содержание, приводятся данные о публикации и апробации материалов диссертации.

В первой главе проведен анализ литературных данных, посвященных вопросам технологии, физики и практического применения диодных структур различного типа (ПЕД, МДП-структур, p-p-гомо- и гетеропереходов) на основе широкозонных полупроводников. Класс рассматриваемых материалов ограничен халькогенидами кадмия-цинка и фосфидом галлия. Рассмотрены методы получения используемых кристаллов и способы их легирования, а также приведены

их физико-химические свойства. Рассмотрены основные методы создания диодных структур на исследуемых материалах, проведен анализ их электрических, фотоэлектрических и электролюминесцентных свойств.

Из литературного обзора следует, с одной стороны, перспективность широкозонных соединений для создания на их основе различных полупроводниковых приборов с выпрямляющим барьером, а с другой – недостаточная изученность технологии получения диодных структур различного типа и физических процессов, определяющих их свойства. В большинстве работ обсуждение экспериментальных данных обычно завершается высказыванием предположений о происходящих в диодах явлениях без количественного сопоставления с теорией. Обобщение описанных в литературе данных затруднено, поскольку в каждой из работ решается конкретная задача, причем, как правило, для определенного полупроводника и диодной структуры, интервала напряжений, температур, спектрального диапазона и т.п. Кроме того, ряд наблюдаемых зависимостей не находит объяснения в рамках существующих теорий контактных явлений. Недостаточная ясность в понимании картины происходящих в диодах на широкозонных полупроводниках физических процессов не позволяет корректно оценить возможности их практического использования.

Содержание главы используется в качестве развернутого обоснования для формулировки задачи работы.

Во второй главе приведены основные методики исследования, технологические методы и режимы изготовления диодных структур различного типа и омических контактов к ним. Особое внимание уделено химической обработке полупроводниковой подложки, выбору в каждом конкретном случае состава травителя и режимов травления.

Используемая технология получения ПБД позволяет исключить

влияние на их свойства поверхностных и краевых утечек, промежуточного слоя и микронеоднородностей по площади выпрямляющего контакта. Последний создавался преимущественно путем термического вакуумного напыления соответствующих металлов. Для изготовления р-п-гомопереходов на различных материалах использовались соответствующие технологические методы - сплавление, диффузия, отжиг в активированных парах халькогена, ионное легирование, эпитаксия. МДП-структуры создавались вакуумным напылением различных диэлектрических слоев на низкоомные подложки сульфида кадмия.

Методом реакций твердофазного замещения (РТЗ) на основе соединений A^2B^6 с сильно рассогласованными решетками изготовлены анизотипные ПП с низкой плотностью поверхностных состояний. Данный способ позволяет создавать одно- и многослойные структуры как на низкоомных, так и на изолирующих кристаллах. При этом резко снижаются требования к выбору оптимальной кристаллографической ориентации подложки и ее структурному совершенству, расширяется температурный диапазон получения гетерофазных слоев, что выгодно отличает РТЗ от обычно используемых для этих целей различных эпитаксиальных методов [4, 5]. Установлено, что процесс гетерофазного замещения носит диффузионный характер, определены коэффициенты и энергии активации диффузии. В комбинации с оптической активацией паров халькогена метод РТЗ позволяет получать анизотипные ПП на основе материалов с ярко выраженной электронной проводимостью, в частности, ПП сульфид-селенид цинка.

Исследование спектров оптического пропускания свидетельствует об образовании на границе раздела ПП слоев соответствующих твердых растворов, которые устраняют различие постоянных

решеток, кристаллической структуры и коэффициентов термического расширения. Полученная из емкостных измерений плотность поверхностных состояний в исследуемых ПП находится в пределах $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что на несколько порядков ниже ожидаемо⁴. Зависимости емкости от напряжения таких ПП, а также ПВД и сплавных диодов свидетельствуют о резком характере перехода, а диффузионных - о плавном. Найденная из вольт-фарадных характеристик высота барьера φ согласуется с φ_0 , определенной другими методами. Емкость диодов с шириной барьера больше 1 мкм и МПП-структур слабо зависит от приложенного напряжения.

Экспериментально и теоретически показано, что высота барьера исследуемых ПВД существенным образом зависит от уровня легирования подложки и плотности поверхностных состояний. Последняя максимальна (около 10^{13} см^{-2}) для контактов металл-теллурид кадмия, убывает по мере роста степени ионности полупроводника и практически не влияет на высоту барьера контактов металл-сульфид цинка.

Комплексное применение независимых экспериментальных методов и методов расчета позволили корректно определить основные параметры диодов и построить возможные зонные диаграммы исследуемых структур.

В третьей главе рассмотрены механизмы прохождения носителей заряда, генерированных теплом. Установлено, что для исследуемых ПВД с $N \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ влияние сил зеркального изображения на зависимость $J(V)$ можно не учитывать. Коэффициент идеальности прямой ветви ВАХ контактов металл-полупроводник с промежуточным слоем существенным образом зависит от плотности поверхностных состояний N_s . Зависимости $J_{np}(V)$ образцов с низкой $N_s \approx 10^{11} \text{ см}^{-2}$ отличаются от идеальных уже при толщине

слоя $\delta \geq 20 \text{ \AA}$, а для $N_3 = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ - только при $\delta \geq 100 \text{ \AA}$.

Последнее приводит однако к резкому уменьшению абсолютной величины надбарьерного тока, а также к увеличению коэффициента инжекции неосновных носителей.

Показано, что ток определяется надбарьерным прохождением носителей, начиная с самых низких напряжений, только для диодов с $\varphi_0 \leq 0,8 \text{ эВ}$ и $N \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При этом для всех изучаемых структур применима диффузионная теория выпрямления [2, 6, 7]. На основе последней (при одних и тех же параметрах, найденных из независимых опытов) рассчитаны прямые и обратные ветви ВАХ контактов металл-теллурид кадмия с $N \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, которые согласуются с наблюдаемыми зависимостями $J(V)$. Надбарьерный ток остальных исследуемых диодов с шириной ОПЗ меньше 1 мкм доминирует только при высоких (близких к φ_0/e) прямых смещениях, а его экспериментальная величина во всех случаях согласуется с расчетной. Вклад надбарьерного тока в формирование обратной ветви ВАХ этих структур при $T \leq 300 \text{ К}$ пренебрежимо мал и его можно не учитывать.

Обоснована необходимость учета генерационно-рекомбинационных токов в ОПЗ исследуемых диодов, причем для ПБД они существенны только если $\varphi_0 > \mathcal{E}_g/2$. При этом их роль возрастает для структур, изготовленных на более широкозонном полупроводнике и с меньшим временем жизни. На основе статистики Шокли-Рида-Холла получены аналитические выражения для генерационно-рекомбинационного тока J_{gr} в ОПЗ контакта металл-полупроводник через единичный уровень \mathcal{E}_t . Если последний расположен в нижней половине запрещенной зоны, то

$$J_{gr} = \frac{en_1 d}{\tau_n} \frac{\sqrt{\mathcal{E}_t - eV} - \sqrt{\mathcal{E}_g - \mathcal{E}_t}}{\sqrt{\varphi_0 - eV}} [\exp(eV/kT) - 1], \quad (1)$$

которая при $eV \geq |2\epsilon_t - \epsilon_g|$ переходит в

$$J_{g2} = \frac{en_i d}{\sqrt{\tau_n \tau_p}} \frac{kT}{\sqrt{(\epsilon_g - eV)(\varphi_0 - eV)}} \exp(eV/2kT) \quad (2)$$

Здесь τ_n и τ_p - времена жизни электронов и дырок; d - ширина барьера; n_i - собственная концентрация; n_1 - равновесная концентрация электронов, когда уровень Ферми совпадает с уровнем ловушки. (Для уровней ϵ_t , расположенных в верхней половине запрещенной зоны, величина n_1 заменяется на p_1 , имеющую тот же смысл). Если $\varphi_0 < \epsilon_g$, то начиная с напряжений $V \geq |2\varphi_0 - \epsilon_g|/e$ зависимость (2) переходит в $J_{g2} \sim (\varphi_0 - eV)^{-1/2}$. Полученные выражения количественно описывают наблюдаемые прямые и обратные ВАХ контактов металл- CdTe с $\varphi_0 > \epsilon_g/2$, причем при расчете используется только один подгруппочный параметр $\sqrt{\tau_n \tau_p}$ при одной температуре.

Для ПВД на основе фосфида галлия и сульфоселенидов цинка более вероятны генерационно-рекомбинационные процессы с участием донорно-акцепторных пар (ДАП). При этом начальные участки ВАХ описываются выражениями (1) и (2) если τ_p заменить на τ_2 , ϵ_t на $\epsilon_g - (\epsilon_a + \epsilon_d)$, n_i на $\sqrt{N_c N_a} \exp[-(\epsilon_g - \epsilon_a)/2kT]$, где τ_2 - время перехода электрона с донорного ϵ_d на акцепторный ϵ_a уровни с концентрацией N_a . При увеличении прямого смещения становится более вероятным переход свободного электрона непосредственно на акцепторный уровень и зависимость (2) переходит в

$$J_{g2} \sim N_c N_a \exp[-(\epsilon_g - \epsilon_a)/kT] \exp(eV/kT). \quad (3)$$

Рекомбинационные процессы определяют также начальные участки прямых ветвей ВАХ p-n-гомопереходов на основе теллурида кадмия

и фсрбца галлия, а также ПП с $d = 0,3 \pm 1,0$ мкм. Показано, что обратные генерационные токи этих структур при $T \leq 300$ К можно не учитывать.

ВАХ диодных структур с шириной ОПЗ больше 1 мкм описываются теорией токов ограниченных пространственным зарядом. Экспериментально определены основные параметры квазиизолирующего слоя - положение уровня Ферми, а также концентрация и энергетическое положение глубоких ловушек.

В четвертой главе рассмотрены механизмы токопрохождения, обусловленные сильным электрическим полем барьера. Проведен анализ основных видов туннельных переходов с учетом параметров полупроводника и диодной структуры, а также условий опыта - температуры, знака и величины напряжения. Установлено, что для исследуемых ПБД с концентрацией основных носителей около 10^{18} см⁻³ начальные участки прямых ветвей ВАХ в диапазоне 77 ± 300 К определяются термополевой эмиссией, а опытные зависимости $J(V)$ диодов Шоттки на основе CdTe и CdS с $\varphi_0 < \varepsilon_g/2$ согласуются с расчетными. Обратный ток этих структур при $|eV| \geq \varphi_0$ описывается в рамках теории чисто полевой эмиссии [6] без учета влияния непараболичности закона дисперсии, глубоких уровней и флуктуаций параметров диода.

Обратные ВАХ ПБД с $\varphi_0 > \varepsilon_g/2$ и $N < 10^{17}$ см⁻³, а также Г-п-гомопереходы и ПП, описываются выражением, характерным для туннельного тока.

$$J_e = a_0 (\varphi_0 - eV)^{2m} \exp[-b_0 (\varphi_0 - eV)^{-m}], \quad (4)$$

где a_0 и b_0 - параметры, не зависящие от напряжения, а $m = 1/2$ для резкого и $m = 2/3$ для плавного переходов. Количественное рассмотрение туннелирования проведено на основе моделей, учитывающих кэйнский закон дисперсии $k^2(\varepsilon) =$

$= 2m^* \varepsilon (1 - \varepsilon / \varepsilon_g) / \hbar^2$ и наличие глубоких примесных уровней в ОПЗ. Полученные выражения адекватно описывают ВАХ исследуемых структур всех типов в той области напряжений и температур, когда туннельные процессы являются доминирующими. Предложены методики расчета реального закона дисперсии в за-прешенной зоне полупроводника для туннелирующего носителя, его эффективную "туннельную" массу и ее зависимость от энергии, а также энергетическое положение глубоких центров.

Наблюдаемый при больших обратных смещениях более сильный по сравнению с туннельным рост темнового тока - следствие ударной ионизации, что подтверждается умножением фототока. Результаты умножения фотоносителей объясняются в рамках теорий ударной ионизации атомов кристаллической решетки [8]. При этом для всех используемых полупроводников (исключая сульфид цинка) коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок, входящих в выражения для коэффициентов умножения M , нужно считать сильно отличающимися.

Обнаруженное явление аномально слабой температурной зависимости обратного тока ряда исследуемых диодов в определенной области напряжений объясняется совместным действием туннельных и лавинных процессов. Напряжение V_A , при котором температурный коэффициент его изменения близок к нулю, находится из полученного нами выражения

$$V_A = \left[\frac{b}{\ln \alpha - \ln(\ln M)} \right]^{1/2m}, \quad (5)$$

где величины α , b и M полностью определяются параметрами диодной структуры и могут быть рассчитаны теоретически [8] или определены экспериментально из независимых опытов.

В пятой главе содержатся результаты исследований фотоэлектрических свойств наиболее перспективных с этой точки зрения диодных структур - ПБД и ПП.

Установлено, что наиболее широким спектром фоточувствительности $E_g \div 6$ эВ обладают структуры на основе контактов золото-полупроводник. Фототок в этой области энергий имеет надбарьерную природу и определяется генерацией электронно-дырочных пар вблизи барьерной области. Фоточувствительность при $\hbar\omega < E_g$ обусловлена эмиссией электронов из металла в зону проводимости полупроводника п-типа, а найденные из зависимостей $J_p(\hbar\omega)$ величины высот барьеров согласуются со значениями Φ_0 , определенные другими методами.

Спектральное распределение фоточувствительности ПП существенным образом зависит от технологии его получения и может изменяться в широких пределах - от практически плоского спектра, ограниченного E_g контактирующих материалов, до узкой полосы с соответствующим максимумом в этом диапазоне энергий. Низкая плотность поверхностных состояний ($N_s \leq 10^{12} \text{ см}^{-2}$) на границе раздела обеспечивает высокую квантовую эффективность (0,7+0,8 электрон/квант), а зависимости $J_p(V)$ свидетельствуют о преобладающей генерации фотоносителей в ОПЗ ПП.

Установлено, что сдвиг спектральных характеристик исследуемых диодов под действием сильного электрического поля адекватно объясняются в рамках теории эффектов Франца-Хеллдыша и Шоттки [2]. Температурные изменения параметров и характеристик согласуются с теоретическими. Экспериментально показано, что для ПП с шириной ОПЗ больше 1 мкм возможно инжекционное усиление фототока. Темновые и световые ВАХ таких структур,

а также полевых транзисторов на сульфиде цинка, определяются процессами ограничения тока пространственным зарядом.

Найденная из зависимостей $J_p(d)$ ПБД диффузионная длина дырок L_p в исследуемых полупроводниках находится в пределах 0,2-1 мкм. Получены аналитические выражения, позволяющие определить диффузионную длину и время жизни неосновных носителей в структурах с p-n-гомопереходом

$$L_n = \frac{\kappa T \sigma_n n_i^2}{J_s n_o p_o} \left(1 - \frac{\ln p_o / N_V}{\ln n_o / N_C} \right), \quad (6)$$

$$L_p = \frac{\kappa T \sigma_p n_i^2}{J_s n_o p_o} \left(1 - \frac{\ln n_o / N_C}{\ln p_o / N_V} \right),$$

где n_o , σ_n и p_o , σ_p - концентрации основных носителей в квазинейтральных областях кристалла и их проводимости, N_V и N_C - эффективные плотности состояний в валентной и зоне проводимости, J_s - плотность надбарьерного тока насыщения. Времена жизни $\tau_{n,p}$ неосновных носителей определяются из выражения $\tau_{n,p} = e L_{n,p}^2 / \kappa T \mu_{n,p}$, где $\mu_{n,p}$ - их подвижности.

Шестая глава посвящена исследованию инжекционной и предпробойной электролюминесценции (ИЭЛ и ПЭЛ) диодных структур.

При 300 К спектры ИЭЛ CdTe -диодов состоят, как правило из нескольких широких полос в диапазоне 0,5-1,5 эВ, а при низких T - они включают в себя около 20 полос, соотношение между которыми зависит от параметров исходного материала, технологии получения структуры, условий опыта и т.п. Установлено, что для всех типов CdTe -диодов излучение в области энергий фотонов $\hbar\omega > 1,2$ эВ определяется рекомбинацией носителей в нейтральных областях кристалла, а при $\hbar\omega < 1,1$ эВ - в ОПЗ через глубокие уровни. Последние участвуют также в формировании ВАХ исследуемых

диодов в области низких смещений. Наиболее интенсивная полоса 1,41 эВ в области геллиевых температур обнаруживает тонкую структуру, обусловленную взаимодействием носителей с продольными оптическими фононами с энергией 0,02 эВ.

МДП-структуры на основе CdS в полосе 2,4 эВ обладают эффективностью $\eta \approx 0,004$ и 0,1% при 300 и 77 К соответственно, а излучение обусловлено инжекцией дырок из металла в валентную зону и последующей рекомбинацией в нейтральной части кристалла с участием ДАП. Установлено, что широкая полоса ИЭЛ с максимумом 1,7 эВ ПВД на основе $CdS(Te)$ формируется в ОПЗ, а наблюдаемые зависимости интенсивности излучения от напряжения объясняется в рамках рассмотренной в третьей главе модели рекомбинации в ОПЗ через единичные глубокие центры.

ИЭЛ ПВД на селениде цинка наблюдается только для структур с $\varphi_0 > \varepsilon_g/2$, причем спектр излучения в видимом диапазоне не зависит от природы выпрямляющего контакта, а определяется составом легирующих примесей и условиями отжига исходных кристаллов. Максимумы излучения при 300 К находятся в области энергий фотонов 1,8+2,14 эВ и коррелируют с максимумами полос в спектрах фотолюминесценции, "голубая" полоса ИЭЛ ПВД проявляется только при $T < 200$ К, а в ионно-легированных р-п-переходах отсутствует даже при 77 К. Показано, что если р-п-переход создан путем отжига низкоомных кристаллов $ZnSe$ в активированных парах селена, то "голубая" полоса наблюдается и при 300 К, хотя η не выше 0,001%. Механизм возбуждения ИЭЛ $ZnSe$ -диодов - инжекция неосновных носителей в нейтральные области кристалла с последующей рекомбинацией через соответствующие центры свечения.

Спектр ИЭЛ контактов золото-сульфид цинка при 300 К представлен широкой полосой с максимумом около 2,6 эВ. Применение метода Алленева-Фока позволило выделить также полосы 1,8 и 2,2 эВ.

Достаточно высокая эффективность "голубого" излучения ($\eta = 0,1\%$ при 300 К), а также зависимости интенсивности излучения от напряжения, тока и температуры адекватно объясняются в рамках предложенной модели излучательной рекомбинации в ОПЗ ПБД с участием ДАП. Впервые полученные анизотипные ГП сульфид-селени цинка обладают ИЭЛ с максимумом при 2,6 эВ и эффективностью около 0,01% при 300 К.

Наиболее характерная особенность ПЭЛ - наличие широкого бесструктурного спектра, форма которого слабо зависит от природы полупроводника и типа выпрямляющей структуры, температуры и уровня возбуждения, состава и концентрации примесей в исходной подложке. Данное излучение обусловлено непрямыми внутризонными переходами горячих носителей при их преимущественном взаимодействии с акустическими фононами [9]. На широкополосное предпробойное излучение диода могут накладываться рекомбинационные полосы (аналогичные полосам ИЭЛ и фотолюминесценции) при благоприятных условиях для такого типа излучательных переходов - широкий барьер, низкие температуры и т.п. Экспериментально установлено, что предпробойные излучатели с однородным свечением обладают гораздо большей временной стабильностью электролюминесцентных характеристик и параметров чем структуры с "микроплазменным" свечением. Совместные исследования и анализ электрических и электролюминесцентных характеристик диодов при обратном смещении позволили получить эмпирическое выражение для определения срока службы t_m предпробойных излучателей

$$t_m \approx C_0 T^{1/\mu_0} \exp(\epsilon_a/kT), \quad (7)$$

где C_0 и μ_0 - параметры, определяемые экспериментально из деградационных зависимостей обратного тока при низких напряжениях, а ϵ_a - энергия активации коэффициента диффузии, определяющего

деградацию примеси.

В седьмой главе рассмотрены возможности практического применения исследуемых диодных структур в качестве фотоприемников, светодиодов, детекторов ионизирующих излучений.

На базе контактов золото-полупроводник и ПП сульфид-теллурид цинка и теллурида цинка-кадмия изготовлены лабораторные образцы фотодетекторов для спектрального диапазона $0,2+1,0$ мкм и обнаружительной способностью не хуже 10^{13} Вт⁻¹·см·Гц^{1/2} при 300 К. Небольшой (меньше 0,001) коэффициент использования солнечного излучения ПБД на основе сульфида цинка позволяет применять их в качестве пороговых детекторов УФ-излучения в условиях сильной засветки видимого диапазона. Инжекционные фотодиоды на основе ПП теллурид-селенид кадмия и сульфид-селенид цинка обладают токовой чувствительностью 100 и 10 А/Вт соответственно при прямом смещении 10 В. Данные фотодиоды с учетом спектрального распределения и высокой стойкости материалов к лазерному излучению могут быть использованы для детектирования излучения He-Ne и N₂-лазеров.

К.п.д. фотопреобразования солнечной энергии в электрическую ПП сульфид-теллурид кадмия при 300 К достигает 9%, а его температурный коэффициент изменения не превышает $2,5 \cdot 10^{-2}$ проц. на градус, что примерно в четыре раза меньше чем у кремниевых солнечных элементов. Последнее особенно важно при работе фотопреобразователей в условиях концентрированного солнечного излучения.

На основе низкоомных кристаллов сульфоселенидов цинка созданы инжекционные светодиоды, обладающие внешним квантовым выходом в голубой области спектра $0,01+0,1$ % при 300 К. МДП-структуры на сульфиде кадмия имеют эффективность в полосе 2,4 эВ 0,004 и 0,1 % при 300 К и 77 К соответственно. Внешний квантовый выход диффузионных CdTe-диодов в области температур жидкого азота достигает нескольких процентов, что, с учетом дефицита галлия,

делает их конкурентноспособными с арсенидгаллиевыми светодиодами. На основе фосфида галлия и сульфоселенидов цинка изготовлены широкополосные ($0,5 + \epsilon_g$) эВ предпробойные излучатели с однородным свечением и ТКИ достигающим 0,001 проц. на градус. Эффективность предпробойных излучателей на базе материалов с $\epsilon_g > 2$ эВ не хуже 0,001 %, что вполне достаточно для использования их в качестве средств визуального отображения информации.

Предложенный способ изготовления светоизлучающих элементов с р-п-переходом позволяет увеличить процент выхода годных приборов и уменьшить их себестоимость, а также применять его при изготовлении монолитных многоэлементных индикаторов. Использование в р-п-переходах на фосфиде галлия никелевых контактов допускает их эксплуатацию при повышенных температурах, вплоть до 300°C.

Разработаны и изготовлены лабораторные образцы детекторов эритемного и загарного спектров действия с чувствительностью при 300 К 1 мА/эритема и 10 мА/Вт соответственно. На базе скнтилляционных кристаллов сульфида кадмия и селенида цинка созданы монолитные детекторы ионизирующих излучений с чувствительностью около 10^{-7} А·Р⁻¹. час.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. На основе халькогенидов кадмия-цинка и фосфида галлия изготовлены выпрямляющие структуры различного типа - поверхностно-барьерные диоды, МДП-структуры, р-п-гомо- и гетеропереходы с воспроизводимыми параметрами и характеристиками. Применение метода реакций твердофазного замещения обеспечивает низкую (меньше 10^{12} см⁻²) плотность состояний на границе раздела ГГ на основе соединений А²В⁶ с сильно рассогласованными решетками, а в сочетании с активацией паров халькогена допускает изготовление анизотипных ГП и на материалах с ярко выраженной

электронной проводимостью. Экспериментально и теоретически показано, что высота барьера исследуемых ПВД существенным образом зависит от уровня легирования полупроводниковой подложки и плотности поверхностных состояний. Последняя максимальна (около 10^{13} см^{-2}) для контактов металл-теллурид кадмия, убывает по мере роста степени ионности полупроводника и практически не влияет на высоту барьера контактов металл-сульфид цинка.

2. Анализ показывает, что физические процессы, определяющие оптоэлектронные свойства диодов на широкозонных полупроводниках различны в зависимости от свойств исходного материала, технологии получения выпрямляющей структуры и условий опыта. Это с одной стороны объясняет разнобразие и кажущуюся противоречивость свойств диодов, описанных в литературе, а с другой – позволяет (варьируя параметры материала, выбирая определенный интервал температур и напряжений, используя барьеры различного типа) создавать условия, при которых каждый из возможных механизмов становится доминирующим. Именно такой подход дает возможность изучать закономерности интересующих процессов экспериментально, сопоставлять полученные результаты с теорией, находить необходимые параметры из независимых опытов и на основе этого предсказывать роль каждого из процессов в диодных структурах с другими параметрами.

3. Установлено, что прямой ток исследуемых диодов в общем случае определяется генерационно-рекомбинационными процессами в нейтральных частях и ОПЗ структуры, а также различными видами туннелирования – полевой и термостимулированная эмиссия с участием примесных центров или без них. При обратном смещении вводимый в область сильного электрического поля генерационный или туннельный ток может дополнительно расти за счет лавинного размножения носителей, возникающих в результате ударной ионизации.

4. Надбарьерные составляющие прямого и обратного токов являются преобладающими по сравнению с другими, начиная с самых низких смещений, лишь для ПБД с $N \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_0 \leq 0,8 \text{ эВ}$ и $T \geq 300 \text{ К}$. Для остальных диодных структур надбарьерный ток доминирует во всем исследуемом температурном диапазоне только при больших (близких к φ_0/e) прямых напряжениях. Истинная зависимость $J(V)$ в этой области смещений искажается за счет падения напряжения на последовательном сопротивлении базы кристалла и контактов, которое, однако можно учесть. При условиях, когда надбарьерное прохождение носителей является преобладающим, прямые и обратные ветви ВАХ рассчитываются на основе диффузионной теории выпрямления.

5. Теоретически рассмотрены генерационно-рекомбинационные процессы в ОПЗ контакта металл-полупроводник с участием как единичных глубоких центров, так и донорно-акцепторных пар. Полученные выражения хорошо описывают наблюдаемые ВАХ ПБД с высотой барьера больше $\varepsilon_g/2$ в интервале напряжений и температур, когда надбарьерный и туннельные токи несут существенны. Начальные участки прямых ветвей ВАХ структур с р-п-переходом и шириной ОПЗ $0,3+1,0 \text{ мкм}$ интерпретируются в рамках теории Саа-Нойса-Шокли, а генерационный обратный ток в них при $T \leq 300 \text{ К}$ пренебрежимо мал и его можно не учитывать. ВАХ диодов с шириной ОПЗ больше 1 мкм описываются теорией ТОПЗ.

6. Установлено, что для исследуемых ПБД с концентрацией основных носителей в подложке около 10^{18} см^{-3} начальные участки прямых ВАХ в диапазоне $77+300 \text{ К}$ определяются термополевой эмиссией, а экспериментальные зависимости диодов Шоттки на теллуриде и сульфиде кадмия с $\varphi_0 < \varepsilon_g/2$ согласуются с расчетными. Обратные ветви ВАХ этих структур описываются известным выражением Фаулера-Нордгейма для чисто полевой эмиссии. Обратный ток ПБД

с $\varphi_0 > \epsilon_g/2$ и $N \leq 10^{17}$ см⁻³, а также структур с р-п-переходом тоже имеет туннельный характер, однако для его описания привлекаются выражения, полученные с учетом кейновского закона дисперсии и глубоких примесных уровней в ОПЗ. Предложена методика расчета реального закона дисперсии в запрещенной зоне полупроводника для туннелирующего носителя, величину его эффективной массы и ее зависимости от энергии. Предложенные модели адекватно описывают участки В/Х всех исследуемых структур в той области напряжений и температур, когда туннельные процессы являются доминирующими.

7. При больших обратных напряжениях развиваются процессы лавинного размножения носителей, что подтверждается умножением фототока. Установлено, что в структурах на основе теллурида и сульфида кадмия, селенида цинка и фосфида галлия ударная ионизация осуществляется преимущественно носителями одного знака, а для сульфиде цинка - электронами и дырками. Абсолютные значения напряжения пробоя и его температурные зависимости согласуются с расчетными. Обнаруженное явление аномально слабой температурной зависимости обратного тока ряда диодов в определенной области напряжений объясняется совместным действием туннельных и лавинных процессов. Получены аналитические выражения, связывающие наблюдаемые характеристики с основными параметрами выпрямленной структуры.

8. Установлено, что наиболее широким спектром фоточувствительности обладают ПБД с полупрозрачным золотым контактом, причем фототок в диапазоне энергий фотонов $\epsilon_g \pm 6$ эВ определяется генерацией электронно-дырочных пар вблизи барьерной области и имеет надбарьерную природу. Спектральное распределение фоточувствительности ПП существенно образом зависит от технологии его получения и может изменяться в широких пределах - от практически

"плоского" спектра, ограниченного E_g контактирующих материалов, до узкой полосы с соответствующим максимумом в этом диапазоне энергий. Зависимость $J_p(V)$ свидетельствует о преобладающей генерации фотоносителей в ОПЗ гетероперехода. Получены аналитические выражения, позволяющие определить диффузионную длину и время жизни неосновных носителей в структурах с р-п-гомопереходом. Наблюдаемые изменения спектральных характеристик под действием сильного электрического поля качественно и количественно объясняются в рамках теорий эффектов Шоттки и Франца-Келдыша. Установлено, что опытные темновые и световые ВАХ фотоприемников с внутренним усилением (инжекционных фотодиодов с ПП и полевых транзисторов с барьером Шоттки на сульфиде цинка) описываются теорией ТОПЗ.

9. Экспериментально установлено, что основные характеристики электролюминесценции при прямом смещении (спектр и эффективность излучения, их зависимости от величины тока, напряжения и температуры) определяются не только типом полупроводниковой подложки и выпрямляющей структуры, но и областью преобладающей рекомбинации носителей. Наблюдаемые зависимости адекватно описываются аналитическими выражениями, учитывающими рекомбинацию носителей заряда в нейтральных областях кристалла, а также в ОПЗ диода с участием единичных глубоких уровней или донорно-акцепторных пар. На основе исследуемых материалов изготовлены СИД, излучающие в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра с внешним квантовым выходом 0,1-4 % при 77 К. Показана перспективность использования контактов золото-сульфид цинка, а также р-п-гомо- и гетеропереходов (полученных отжигом в активированных парах селена низкоомных подложек селенида и сульфида цинка соответственно) в качестве голубых СИД, работающих в области комнатных температур.

10. Экспериментально установлено, что электролюминесценция обратносмещенных диодов на основе исследуемых полупроводников характеризуется широкополосным бесструктурным спектром излучения, обусловленного прямыми внутризонными переходами горячих носителей. Форма этого спектра слабо зависит от природы полупроводника и типа выпрямляющей структуры, температуры и уровня возбуждения, состава и концентрации примесей в исходной подложке. В ряде случаев на широкополосное излучение могут накладываться рекомбинационные полосы как следствие процессов ударной ионизации. На основе комплексных исследований и анализа электрических и электролюминесцентных характеристик диодов при обратном смещении предложена методика ускоренного определения срока службы предпробойных излучателей.

11. На основе исследуемых диодных структур разработаны и изготовлены лабораторные образцы - широкополосных и селективных фотоприемников для спектрального диапазона $0,2+1,0$ мкм; солнечных элементов с к.п.д. около 9% при 300 К; единичных и многоэлементных индикаторов визуального отображения информации; широкополосных источников оптического излучения с высокой временной и температурной стабильностью; детекторов эритемного и загарного спектров действия; монолитных детекторов ионизирующих излучений типа "сцинтиллятор-фотодиод".

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Косяченко Л.А., Махний В.П. Излучение горячих носителей в теллуриде кадмия. //Изв. ВУЗов. Физика.-1975.-т.18,№7.-с.151-153.
2. Косяченко Л.А., Матлак В.В., Махний В.П., Павлин П.А. Туннельные и лавинные процессы в электролюминесцентных CdTe-диодах. //УФЖ.-1976.-т.21.-№1.- с.92-96.

3. Косяченко Л.А., Махний В.П. Температурные зависимости генерационно-рекомбинационных и ионизационных процессов в CdTe-диодах. // УФЖ. - 1977. - т. 22, № 3. - с. 476-482.
4. Косяченко Л.А., Махний В.П., Потыкевич И.В. Генерация - рекомбинация в области пространственного заряда контакта металл-CdTe. // УФЖ. - 1978. - т. 23, № 2. - с. 279-286.
5. Косяченко Л.А., Махний В.П. Электролюминесцентные свойства CdTe-диодов в предпробойном режиме работы. // Сб. Вопросы физики электролюминесценции. - Днепропетровск. - 1979. - с. 82-88.
6. Косяченко Л.А., Махний В.П. Влияние закона дисперсии на туннелирование в CdTe-диодах. // ФТП. - 1984. - т. 18, № 7. - с. 1285-1287.
7. Кабанова И.С., Косяченко Л.А., Махний В.П. Рекомбинационное излучение в области пространственного заряда контакта металл-CdS // УФЖ. - 1985. - т. 30, № 6. - с. 865-868.
8. Косяченко Л.А., Махний В.П. Спектры рекомбинационного излучения диодов на основе теллурида кадмия. // УФЖ. - 1986. - т. 31, № 2. - с. 261-266.
9. Бандур А.И., Косяченко Л.А., Махний В.П., Собитанский Б.М. Механизм прохождения прямого тока в Pt-ZnSe-диодах. // УФЖ. - 1986. - т. 31, № 6. - с. 935-939.
10. Махний В.П. Туннелирование в обратносмещенных CdTe-диодах. // Изв. ВУЗов. Физика. - 1986. - т. 29, № 4. - с. 104-106.
11. Косяченко Л.А., Махний В.П. Напряжение лавинного пробоя в CdTe-диодах. // Физ. электроника. - 1986. - в. 33. - с. 58-61.
12. Горбенко Н.В., Косяченко Л.А., Махний В.П., Шейнман М.К. Излучательная рекомбинация на донорно-акцепторных парах в области пространственного заряда Au-ZnS-диодов. // ФТП. - 1986. - т. 20. - в. 4. - с. 619-624.
13. Баранюк В.Е., Косяченко Л.А., Махний В.П. Лавинные процессы и излучение горячих носителей в диодах на сульфиде кадмия. //

УФЖ.-1986.-т.31, №11.-с.1713-1716.

14. Кабанова И.С., Косяченко Л.А., Махний В.П. Излучающие в предпробойном режиме поверхностно-барьерные диоды на фосфиде галлия.//Электр. техника. Сер.2. Полупроводн.приборы.-1986.-в.5 (184).-с.7-10.
15. Махний В.П. Электрические свойства контакта $Au-n-CdTe$ //Физ. электроника.-1987.-в.34.-с.27-33.
16. Баранюк В.Е., Косяченко Л.А., Махний В.П. Предпробойное излучение диодов на сульфиде кадмия.//ЖПС.-1987.-т.46, №2.-с.334-336.
17. Махний В.П. Пороговая энергия ударной ионизации в широкозонных соединениях A^2B^6 //Физ.электроника.-1987.-в.34.-с.23-25.
18. Кабанова И.С., Косяченко Л.А., Махний В.П. Механизм прохождения тока в $Ni-GaP$ -диодах.//УФЖ.-1987.-т.32, №5.-с.758-764.
19. Баранюк В.Е., Косяченко Л.А., Махний В.П., Рыжиков В.Д. Высокоэффективный фотодиод на сульфиде кадмия.//ФТП.-1987.-т.21, в.5.-с.1264.
20. Кабанова И.С., Махний В.П. Свойства диодов Шоттки на полярных гранях фосфида галлия.//Изв. ВУЗов. Физика.-1987.-т.30, №10.-с.125.
21. Кабанова И.С., Косяченко Л.А., Махний В.П. Туннелирование в фосфидгаллиевых диодах Шоттки.//ФТП.-1987.-т.21, в.11.-с.2087-2090.
22. Кабанова И.С., Косяченко Л.А., Махний В.П. Зависимость параметров GaP -диодов Шоттки от параметров контактирующего металла.//УФЖ.-1988.-т.33, №1.-с.116-119.
23. Горбенко Н.В., Косяченко Л.А., Махний В.П., Шейнман М.К., Механизм прохождения прямого тока в электролюминесцентных диодах $Au-ZnS$ //ФТП.-1988.-т.22, в.9.-с.1656-1662.

24. Кабанова И.С., Косяченко Л.А., Махний В.П. Нахождение закона дисперсии в запрещенной зоне полупроводника из измерений туннельного обратного тока в диоде Шоттки. // ФТП. - 1988. - т. 22, - в. 10. - с. 1852-1855.
25. Вербицкий О.П., Косяченко Л.А., Махний В.П., Рыжиков В.Д. Свойства системы спинтилятор-фотодиод на основе структуры селенид-теллурид цинка // Письма в ЖТФ. - 1988. - т. 14, в. 8. - с. 702-705.
26. Баранюк В.Е., Косяченко Л.А., Махний В.П. Свойства фотоэлемента на основе варизонной структуры сульфид-теллурид кадмия // Гелиотехника. - 1988. - № 5. - с. 17-20.
27. Козак Е.Н., Махний В.П., Собицанский Б.М., Стахира П.И. Электрические свойства р-п-перехода на селениде цинка. // Физ. Электроника. - 1988. - в. 37. - с. 19-24.
28. Баранюк В.Е., Махний В.П. Спектральные характеристики гетеро-перехода сульфид-теллурид кадмия. // ФПС. - 1989. - т. 50, № 2. - с. 333-336.
29. Кабанова И.С., Махний В.П. Лавинные процессы в контактах металл-GeP // УФЖ. - 1939. - т. 34, № 6. - с. 904-907.
30. Баранюк В.Е., Махний В.П. Энергетическая структура границы раздела контакта металл-сульфид кадмия. // УФЖ. - 1989. - т. 34, № 4. - с. 615-617.
31. Кабанова И.С., Махний В.П. Определение параметров ударной ионизации в фосфиде галлия. // УФЖ. - 1989. - т. 34, № 11. - с. 1738-1740.
32. Горбенко Н.В., Косяченко Л.А., Махний В.П., Шейнман М.К. Ультрафиолетовый фотоприемник на сульфиде цинка. // ПТЭ. - 1989. - № 3. - с. 243.
33. Горбенко Н.В., Косяченко Л.А., Махний В.П., Шейнман М.К. Фотоэлектрические свойства диодов Au-ZnS в ультрафиолетовой области спектра. // ЖПС. - 1989. - т. 51, № 2. - с. 335-337.

34. Махний В.П., Малик А.И., Мельник В.В. "Солнечно-слепой" фотодиод на основе гетероструктуры ITO-ZnS . //ЖТФ.-1990.-т.60, в.9.-с.146-147.
35. Козак Е.Н., Махний В.П., Собишанский В.М. Свойства поверхностно-барьерных диодов на основе селенида цинка. //Физ.электроника.-1990.-в.40.-с.41-47.
36. Кабанова И.С., Махний В.П. Высота барьера в контактах металл-GaP. //Физ.электроника.-1990.-в.40.-с.3-6.
37. Баранюк В.Е., Махний В.П. Туннелирование в контактах металл-CdS. //УФЖ.-1990.-т.35, №7.-с.1099-1105.
38. Махний В.П. Механизм образования гетероструктур при твердофазном замещении на основе соединений A^2B^6 . //Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы.-1991.-т.27, №3.-с.619-620.
39. Кабанова И.С., Махний В.П. Исследование механизмов деградации свойств контакта Ni-GaP. //Физ.электроника.-1991.-в.41.-с.18-23.
40. А.С. №1630567 СССР. Способ изготовления омических контактов к диодным структурам на основе соединений A^3B^5 . /ЧГУ им. Ю.Федьковича: авт.изобретения Махний В.П., Мельник В.В.-Заявл. 19.07.88., № 4493807.
41. Полупроводниковый излучатель. / ЧГУ им. Ю.Федьковича: Авт. изобретения Гуц В.В., Косяченко Л.А., Махний В.П.- положительное решение от 21.01.91 по заявке № 4657196 от 27.02.89.
42. Баранюк В.Е., Махний В.П. Электрические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов сульфид-теллурид кадмия. //ФТП.-1991.-т.25, в.2.-с.217-221.
43. Махний В.П. Полупроводниковый излучатель с повышенной температурной стабильностью. // Письма в ЖТФ.-1991.-т.17, в.3.-с.17-21.

44. Kosyachenko L.A., Makhniy V.P. Preparation and properties of solid-state substitution heterojunctions in wide-gap II-VI compounds. // *J. Cryst. Growth*. - 1991. - v. 110. - p. 523-527.
45. Баранюк В.Е., Махний В.П., Мельник В.В. Широкополосные электролюминесцентные излучатели на основе сульфоселенидов цинка. // ПТЭ. - 1991. - №. - с. 235.
46. Способ определения диффузионной длины неосновных носителей заряда в гомо-р-п-переходе. / ЧГУ им. Ю.Федьковича: авт. изобретения Андреева Т.П., Махний В.П. - положительное решение от 13.05.91 по заявке № 4774413/25 от 26.12.89.
47. Способ изготовления излучающих элементов с р-п-переходом. / ЧГУ им. Ю.Федьковича: авт. изобретения Махний В.П. - положительное решение от 29.07.91 по заявке № 4872244/25 от 31.10.90.
48. Способ изготовления инжекционного светодиода. / ЧГУ им. Ю.Федьковича: авт. изобретения Махний В.П., Мельник В.В. - положительное решение от 13.06.91 по заявке № 4878285/25 от 29.10.90.
49. Махний В.П. Особенности температурной зависимости обратного тока диодов на основе широкозонных полупроводников. // УФЖ. - 1991. - т. 36. - № 9. - с. 1554-1559.
50. Махний В.П. Оптоэлектронные свойства варизонных гетеропереходов на основе широкозонных соединений A^2B^6 . // Электрон. техника. Сер. Материалы. - 1991. - в. 4 (258). - с. 30-32.
51. Способ изготовления предпробойного электролюминесцентного излучателя на основе селенида цинка. / ЧГУ им. Ю. Федьковича: авт. изобретения Баранюк В.Е., Махний В.П. - положительное решение от 14.01.92 по заявке № 4941430/25 от 4.06.91.
52. Kosyachenko L.A., Makhniy V.P., Baranyuk V.E., Melnik V.V. Optoelectronic properties of diode heterostructures based on ZnS and ZnSe. // *J. Cryst. Growth*. - 1992. - v. 117, N 1. - p. 583-586.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Георгобиани А.Н. Широкозонные полупроводники A^2B^6 и перспективы их применения. // УФН. - 1974. - т. 113, в. 1. - с. 129-155.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. / Пер. с англ. под ред. Суриса Р.А. - М.: Мир. - 1984. - 156 и 352 с.
3. Рыжиков В.Д. Сцинтилляционные кристаллы полупроводниковых соединений A^2B^6 . Получение, свойства, применение. / М.: НИИТЭХИМ - 1989. - 124 с.
4. Симашкевич А.В. Гетеропереходы на основе полупроводниковых соединений A^2B^6 . / Кишинев. Штиинца. - 1980. - 156 с.
5. Шарма Б.Л., Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы. / Пер. с англ. под ред. Гуллева Ю.В. - М.: Сов.радио. - 1979. - 232 с.
6. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. / Пер. с англ. под ред. Степанова Г.В. - М.: Радио и связь. - 1982. - 208 с.
7. Стриха В.И. Контактные явления в полупроводниках. / Киев. Вища школа. - 1982. - 224 с.
8. Верещагин И.К. Электролюминесценция кристаллов. / М.: Наука. - 1974. - 279 с.
9. Косяченко Л.А. Электролюминесценция полупроводникового диода при обратном смещении. // Уч. зап. Тартуского гос. ун-та. - Тарту. - 1983. - в. 655. - с. 12-34.

Подписано к печати 23.10.92.
Формат 60x84/16. Бумага типографская №2.
Офсетная печать. Усл.печ. листов 2,2.
Уч.-изд.листов 2,3. Заказ 331.
Тираж 100. Бесплатно

Лаборатория копировально-множительной печати
Черновицкого государственного университета

г.Черновцы, ул.Коцюбинского,12

467737

БЕСПЛАТНО

AB 25.721

~~12~~

~~12~~