

На правах рукописи



Михайлюк Екатерина Андреевна

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$**

Специальность 01.04.10 – «физика полупроводников»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

Научный

руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
БЕЗРЯДИН НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

Научный

руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент,
Котов Геннадий Иванович

**Официальные
оппоненты:**

Калинин Юрий Егорович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», кафедра физики твердого тела заведующий.

Середин Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», физический факультет, кафедра физики твердого тела и наноструктур, доцент.

Ведущая организация:

ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «25» февраля 2016 г. в 15¹⁵ на заседании диссертационного совета Д.212.038.10 при Воронежском государственном университете по адресу: 394006, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394006, г. Воронеж, Университетская площадь, 1 и на сайте ВУЗа <http://www.science.vsu.ru/disser>, с авторефератом – также на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маршаков
Владимир Кириллович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие микроэлектроники тесно связано с необходимостью исследования многослойных композиций, включающих различные комбинации полупроводников и диэлектрических слоев. Основное направление совершенствования приборов связано с увеличением рабочей частоты и уменьшением их геометрических размеров. Это в свою очередь приводит к возрастанию влияния различных микронеоднородностей, в частности, сложных профилей распределения легирующей примеси в области пространственного заряда полупроводника и в диэлектрике, наличие поверхностного заряда на границе раздела полупроводник – диэлектрик на электрофизические параметры гетероструктур типа металл – диэлектрик – полупроводник (МДП). Одно из направлений совершенствования МДП–структур состоит в применении вместо диэлектрика пленок широкозонных полупроводников (П') с толщинами много меньшими дебаевской длины экранирования. В этом случае необходим материал слоя П' с параметрами кристаллической решетки максимально близкими к решетке полупроводниковой подложки. В качестве основы для таких полевых гетероструктур еще в 1974 году, в работах Б.И. Сысоева и В.Ф. Сынорова, была предложена изорешеточная система Ga_2Se_3/Si .

Для повышения быстродействия полевых приборов применяют полупроводники типа $A^{III}B^V$ с большей подвижностью носителей зарядов по сравнению с кремнием. Но наличие высокой плотности центров локализованных зарядов на границе раздела $D/A^{III}B^V$ и, как следствие, отсутствие модуляции области пространственного заряда (ОПЗ) внешним напряжением является основным отрицательным фактором, ограничивающим функциональные возможности таких приборов. Поэтому следующим шагом в развитии быстродействия полевых приборов стало использование тонкого слоя широкозонного полупроводника (П'), включенного в гетероструктуру и выполняющего функции диэлектрика в отношении экранирования внешнего электрического поля. В качестве таких слоев используются соединения со стехиометрическими вакансиями типа $A_2^{III}B_3^{VI}$. Электрические характеристики этих соединений не чувствительны к легирующим примесям и радиационным воздействиям; имеют низкую подвижность основных носителей (в $10^4 \div 10^5$ раз меньше, чем в Si и $A^{III}B^V$), при этом большинство полупроводников $A_2^{III}B_3^{VI}$ кристаллизуются в решетке типа сфалерит. Данное обстоятельство удовлетворяет принципам объемного соответствия в гетеропереходах типа $A_2^{III}B_3^{VI} - Si$, $A_2^{III}B_3^{VI} - A^{III}B^V$ и, как следствие, позволяет создать границу раздела с низкой плотностью ЦЛЗ.

Сказанное выше определяет актуальность темы данной диссертации, которая выполнялась в соответствии с направлением госбюджетной НИР кафедры физики Воронежского Государственного университета инженерных технологий "Физико-химические процессы в объеме и на границе раздела в неоднородных твердотельных системах" (№ гос. рег. 01960012699) при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 03 – 02 – 96480. Часть работы выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта 15-52-61017 и при поддержке Минобрнауки

России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы. Проект N 757.

Цель работы: Определение закономерностей и построение модели процессов токопрохождения в пленках $A_2^{III}B_3^{VI}$ гетероструктур на основе арсенида индия.

Основные задачи исследования:

1. Изучение условий формирования гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) по технологии гетеровалентного замещения и методом напыления в квазизамкнутом объеме из независимых источников в рамках предложенной модели изорешеточной системы, с целью характеристики объекта исследования.

2. Определение параметров глубоких уровней в тонких слоях соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$ на $InAs$ (n – типа) методом анализа вольт – фарадных (ВФХ) и вольт – амперных характеристик (ВАХ) МДП – структур для построения теоретической модели процессов токопрохождения.

3. Построение эквивалентной схемы гетероструктур и расчет параметров ЦЛЗ в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) методом адмиттанса.

4. Создание модели процессов токопрохождения в полупроводниковых гетероструктурах на основе арсенида индия с тонкими слоями соединений со стехиометрическими вакансиями типа In_2Te_3 с целью согласования экспериментальных данных с расчетными параметрами электронных явлений.

5. Исследование гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) с точки зрения вклада ЦЛЗ в электронные процессы и определение оптимальных условий использования тонких слоев соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$ в качестве подзатворных и полуизолирующих в МДП–структурах.

Объекты и методы исследования: Объектом исследования является МПП–структура. В качестве основного материала подложки из группы $A^{III}B^V$ выбран $InAs$ (n - тип): подвижность носителей зарядов $\mu \approx 22600 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, ширина запрещенной зоны $E_g=0.356$ эВ, уровень легирования 10^{19} см^{-3} . Для формирования изолирующего слоя гетероструктур на основе $InAs$ выбран In_2Te_3 , типичный представитель полупроводниковых соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$, с подвижностью носителей заряда $\mu \approx 340 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, шириной запрещенной зоны $E_g=1.1$ эВ, концентрацией основных носителей заряда $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Электрические характеристики In_2Te_3 из-за большой концентрации стехиометрических вакансий (10^{21} см^{-3}) слабо чувствительны к примесям и радиационным воздействиям. Гетероструктуры $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) не только удовлетворяют требованиям МДП – структур с идеальным диэлектриком концепции Сынорова-Сысоева, но и отвечают всем принципам объемного соответствия в гетеропереходах. Так как теллурид индия относится к классу соединений со стехиометрическими вакансиями с кристаллической структурой типа сфалерита, а хорошее соответствие постоянных кристаллических решеток In_2Te_3 ($a_0 \sim 0.616$ нм) и $InAs$ ($a_0 \sim 0.606$ нм) предопределяет возможность формирования качественной границы раздела между этими материалами.

Для исследования границы раздела в гетероструктурах использовался метод электронной микроскопии; элементный состав получаемых пленок

контролировался методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и методом послойной Оже – электронной спектроскопии. Для исследования спектра поверхностных электронных состояний (ПЭС) использовался метод дифференциальной проводимости и емкости в диапазоне частот тестового сигнала от 20 Гц до 2 МГц и температур от 77 К до 400 К. Исследование электронных явлений в гетероструктурах проводилось методами: вольт – фарадных, вольт – амперных характеристик и адмиттанса. Развитие модельных представлений о процессах токопрохождения в полупроводниковых гетероструктурах типа МПТ проводилось методом адмиттанса с использованием методики построения эквивалентных схем. При решении уравнения электронейтральности использовались методы численного математического моделирования.

Научная новизна:

1. Методом анализа вольт – фарадных характеристик гетероструктуры $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) зафиксировано снижение ёмкости до значений, менее геометрической ёмкости C_2 при частотах $f < 10^3$ Гц, которое интерпретировано как реактивное сопротивление индуктивного характера.

2. Построена эквивалентная схема гетероструктур $Al/In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $Al/In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа), которая легла в основу определения параметров ЦЛЗ в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ методом адмиттанса.

3. Установлено появление на зависимостях нормированной проводимости $\frac{G_p}{\omega}$ нового максимума при $f \sim 4.6$ кГц с энергией 0.36 эВ, соответствующего нейтральной ловушке.

4. Предложено модифицированное уравнение электронейтральности и его решение для гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) с учётом двух типов глубоких уровней в запрещённой зоне материала слоя.

5. В результате моделирования процессов токопрохождения в слоях типа $A_2^{III}B_3^{VI}$ гетероструктур на основе арсенида индия доказано изменение типа проводимости с электронного на дырочный при температуре выше $T \sim 250$ К, обусловленное участием центра с энергией 0.36 эВ в процессах захвата и выброса электронов.

Практическая значимость:

1. Установленные механизмы токопрохождения в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}$ контролируются двумя типами глубоких уровней ($E_d \sim 0.5$ эВ и $E_t \sim 0.36$ эВ), появление которых можно связать с практической технологией формирования гетероструктур на основе систем халькогенид – $A^{III}B^V$.

2. Предложенная методика построения эквивалентных схем гетероструктур может быть использована для оценки параметров ЦЛЗ в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}$, в полевых гетероструктурах подобного типа.

3. Доказана принципиальная возможность использования гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) в качестве полевых, так как слои теллурида индия отвечают всему комплексу

требований предъявляемых к подзатворным и полуизолирующим слоям в структурах типа МДП.

4. Обнаруженные локальные уровни (0.5 эВ и 0.36 эВ) в слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) с аномально большим временем жизни носителей заряда ($\sim 7.95 \cdot 10^{-4}$ с) позволяют использовать их для изготовления фоторезисторов с эффектом памяти. Использование таких оптоэлектронных устройств возможно при создании моделей нейронных сетей.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Новый акцепторный центр в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}$ соответствует нейтральной ловушке с энергией 0.36 эВ, концентрация которого зависит от способа получения и технологических режимов.

2. Механизмы токопрохождения и параметры электронных процессов в слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}$ обусловлены участием двух типов уровней с энергией 0.5 эВ и 0.36 эВ в запрещённой зоне материала слоя.

3. Смена механизма токопрохождения (изменение вклада ЦЛЗ) в интервале температур (77 – 400) К определяет изолирующие свойства слоя In_2Te_3 или $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) и возможность их использования в качестве подзатворных слоев в МДП-структурах.

Личный вклад автора. Настоящая работа выполнена на кафедре физики Воронежского государственного университета инженерных технологий. Постановка задачи и определение направлений исследования осуществлялись д.ф.-м.н., профессором Н.Н. Безрядиным. Автор самостоятельно осуществил построение физических и математических моделей, произвел аналитические и численные расчёты. Обсуждение результатов исследования электрофизических свойств тонких плёнок и электронных процессов в гетероструктурах на протяжении всей работы проведены с д. ф. м. – н., профессором Н.Н. Безрядиным и доцентами кафедры физики Прокоповой Т. В., Котовым Г. И. Результаты, по анализу данных о структуре и составе образцов, получены совместно с сотрудниками кафедры, участие которых отражено в списке литературы.

Автор выражает искреннюю благодарность всему коллективу кафедры физики Воронежского государственного университета инженерных технологий, ранее возглавляемой моим научным руководителем, д.ф.-м.н., профессором Безрядиным Николаем Николаевичем.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением поверенных и калиброванных средств измерений, корректностью использованных электрофизических методов исследования многослойных композиций, надёжной статистикой экспериментов, применением современных численных методов обработки данных, используемых при моделировании, непротиворечивостью полученных результатов известным физическим моделям и теориям, а также согласованием с результатами других исследователей.

Апробация работы. Ниже перечислены конференции, семинары и совещания, на которых представлялись результаты работы: Материалы XLI отчетной конференции (Воронеж, 2002); Материалы XLII отчетной конференции (Воронеж, 2003); Материалы XLIII отчетной конференции (Воронеж, 2004); Материалы Международной научной конференции «Тонкие пленки и

наноструктуры» (Москва, 2004); III международная научно – техническая конференция «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк, 2006); Материалы международной научно – практической конференции «Образование, наука, производство и управление» (Старый Оскол, 2006); XII Всероссийской научно – технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2013); ВГТУ Материалы НТК – 2015 (Воронеж, 2015); ВГУ Материалы НТК – Фагран 2015 (Воронеж, 2015).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 7 статей в журналах рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Объем диссертации составляет 107 страниц машинописного текста, включая 27 рисунков, 2 таблицы. Список литературы содержит 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объекты исследования; показана научная новизна полученных результатов, их практическая и научная значимость; представлены основные положения, выносимы на защиту и приведены сведения об апробации работы, публикациях, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

В первой главе приводятся результаты анализа современных моделей МДП-структур с однородно распределенным поверхностным потенциалом. Особое внимание уделено теории адмиттанса МДП-структур и методике исследования поверхностных состояний. Обсуждается математическая модель перезарядки поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – диэлектрик, путем введения в эквивалентную схему МДП-структуры емкости C и проводимости G с участием поверхностных состояний. Рассмотрены основные механизмы переноса заряда для анализа экспериментальных вольт – амперных характеристик гетероструктур.

Во второй главе приводится анализ общих требований к структурам типа МДП и возможности использования гетероструктур типа $A_2^{III}B_3^{VI}/A^{III}B^V$ для формирования однослойных МП-структур, удовлетворяющих требованиям МДП-структур с идеальным диэлектриком. Приводится анализ и краткое описание способов получения слоев In_2Te_3 по технологии гетеровалентного замещения и методом испарения из независимых источников индия и теллура, а также слоев твердых растворов в системе $Ga_2Te_3-In_2Te_3$ соиспарением индия и галлия в парах теллура в камере квазизамкнутого объема. Делается заключение о возможности формирования гетероструктур типа $A_2^{III}B_3^{VI}/InAs$ с резкой границей раздела и низкой плотностью поверхностных состояний по причине подобия кристаллических структур и почти полного соответствия постоянных кристаллических решеток In_2Te_3 ($a_0=6.1460 \text{ \AA}$), $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ (при $x \sim 0.65$, $a_0 \sim 6.0584 \text{ \AA}$) и $InAs$ ($a_0=6.0584 \text{ \AA}$) (рис.1). Кроме того, показано, что технология гетеровалентного замещения и методы напыления из независимых источников позволяют получать слои In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) состав которых

соответствует стехиометрии, что свидетельствует о возможности применения таких методов для формирования высококачественных структур для исследования электрофизических параметров.

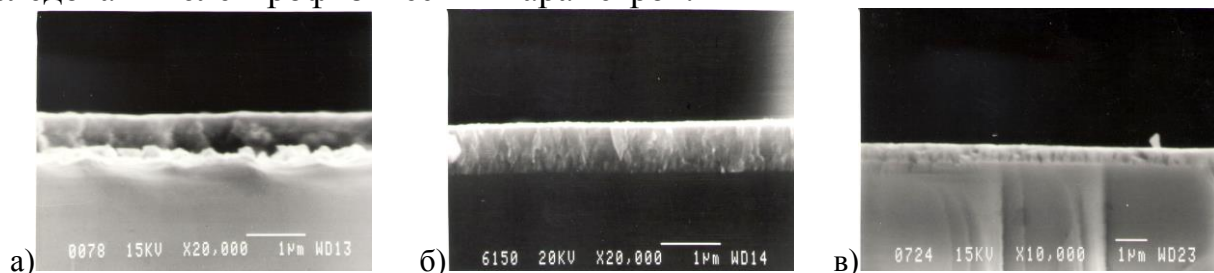


Рис. 1. Микрофотографии поперечного излома гетероструктур: (а) $In_2Te_3/InAs$, полученной по технологии гетеровалентного замещения; (б) $In_2Te_3/InAs$, полученной методом напыления из двух независимых источников In и Te ; (в) $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$, полученной методом напыления из трех независимых источников In , Ga и Te

В третьей главе приведены расчеты электрических характеристик гетероструктур на основе арсенида индия со слоями теллурида индия In_2Te_3 и твердого раствора $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$. Методом анализа ВАХ исследован и установлен механизм токопрохождения в гетероструктурах $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа). Доказано, что при отрицательном напряжении на алюминиевом контакте он соответствует модели тока ограниченного пространственным зарядом, при положительном напряжении – механизму Пула–Френкеля. Методом анализа температурных зависимостей тока для гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) оценены параметры глубоких уровней ЦЛЗ. При положительном потенциале на Al контакте ЦЛЗ соответствует донорному центру с энергией ~ 0.5 эВ и ~ 0.62 эВ, относительно дна зоны проводимости ($In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ соответственно). Эти же центры определяют температурную зависимость тока в слоях полупроводников типа $A_2^{III}B_3^{VI}$ и при отрицательном потенциале. В результате анализа зависимости тока $I(T)$ в гетероструктуре $Al/In_2Te_3/InAs$ (n – типа) при отрицательном потенциале на Al контакте, в интервале температур перехода к собственной проводимости, обнаружен участок с пониженным наклоном $\sim (0.3 \div 0.35)$ эВ, делается предположение об участии дополнительного центра в процессах токопрохождения, подчиняющегося ТОПЗ с захватом на ловушки.

Методом анализа ВФХ рассчитаны параметры R_0 , R_c , C_s , C_0 и построены эквивалентные схемы для гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ ($x \sim 0.65$) (n – типа) (рис. 2).

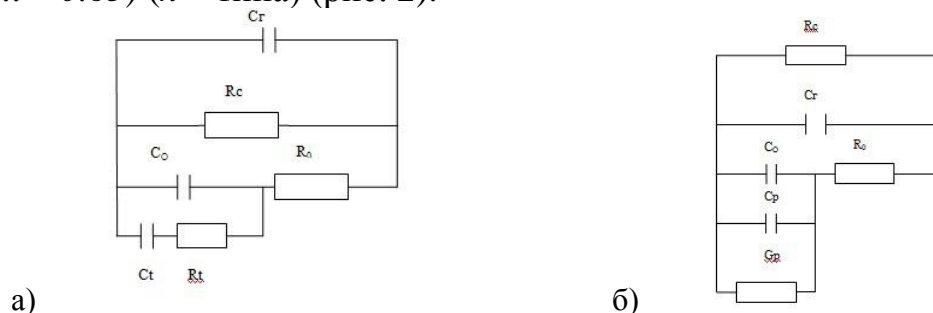


Рис. 2. Эквивалентные схемы для гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ ($x \sim 0.65$).

В схемах последовательная $R_t C_t$ цепочка (рис. 2 а), моделирующая вклад обмена зарядом центра с разрешенной зоной (модель Леговека и Слободского), преобразована в параллельную цепь, состоящую из дифференциальной проводимости (G_p) и ёмкости центра (C_p) (рис. 2 б). Измеренные значения дифференциальной проводимости (G_m) и ёмкости (C_m) с использованием выражения (1) пересчитаны в нормированную проводимость гетероструктуры $\frac{G_p}{\omega}(\omega)$ (модель Николлиана-Гоетцбергера, Прайера).

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{G_0 \cdot [G_m^2 + \omega^2 \cdot (C_m - C_z)^2] \cdot [G_0 \cdot G_m - (G_m^2 + \omega^2 \cdot (C_m - C_z)^2)]}{\omega \cdot [G_0 \cdot G_m - (G_m^2 + \omega^2 \cdot (C_m - C_z)^2)]^2 + \omega^2 \cdot G_0^2 \cdot (C_m - C_z)^2} \quad (1)$$

Установлено, что на зависимостях $\frac{G_p}{\omega}(\omega)$ (рис. 3 б) имеются два максимума: первый при частоте $f \sim 200$ Гц для пленки In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$, второй при $f \sim 2$ кГц для $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ и $f \sim 4.6$ кГц для In_2Te_3 .

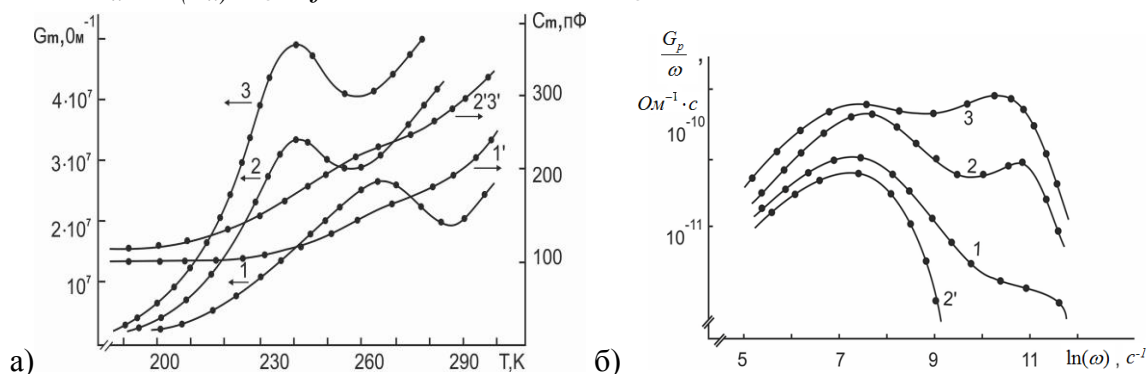


Рис. 3. Температурные зависимости дифференциальной проводимости $G_m(T)$ и емкости $C_m(T)$ (а): (кривые 1-3) и (кривые 1'-3') гетероструктур $In_2Te_3/InAs$, полученных гетеровалентным замещением (кривые 1, 1'), напылением (кривые 2, 2') и гетероструктур $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ ($x \sim 0.65$) (кривые 3, 3') при $f = 2$ кГц. Зависимости нормированных проводимостей $\frac{G_p}{\omega}(\omega)$ (б): гетероструктур $In_2Te_3/InAs$, полученных гетеровалентным замещением (кривая 1), напылением In_2Te_3 (кривые 2, 2') и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) (кривая 3) из независимых источников.

Особенность существования двух максимумов на зависимостях нормированных проводимостей $\frac{G_p}{\omega}(\omega)$ (рис. 3 б) в отличие от одной на зависимостях дифференциальной проводимости $G_m(T)$ (рис. 3 а) свидетельствует о присутствии двух энергетических уровней в запрещенной зоне исследуемых слоёв теллуридов и о различии частотных факторов центров, обуславливающих эти уровни. На зависимости $G_m(T)$ проявление только одного максимума объясняется наложением сквозного тока дифференциальной проводимости и частот тестового сигнала при температурах выше 250 К в структурах с напыленными пленками (кривая 2', рис. 3 б), а так же низким значением концентрации центров локализации зарядов с меньшей энергией активации в структурах полученных по технологии гетеровалентного замещения (кривой 1, рис. 3 б). Пик на кривых $\frac{G_p}{\omega}(\omega)$ (рис. 3 б) в области частот тестового сигнала $f \sim 200$ Гц наблюдается вплоть до $T \sim 350$ К. Оценка значения энергии активации

ответственного за этот максимум производится по зависимостям $G_m(T)$ для пленок полученных гетеровалентным замещением, и составляет $\Delta E \sim 0.5$ эВ ($\Delta E = \frac{k \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{f_2}{f_1}$). Делается заключение, что максимум на зависимостях $\frac{G_p}{\omega}(\omega)$ при частоте тестового сигнала $f \sim 200$ Гц связан с параметрами центра донорного типа, обуславливающего явление токопрохождения в слое и при положительном, и при отрицательном потенциале на Al – контакте. Второй максимум при частоте тестового сигнала $f \sim 3$ кГц отвечает характеру поведения нейтральной ловушки.

Из анализа частотных зависимостей $\frac{G_p}{\omega}(\omega)$ ($C_i = 2 \cdot \frac{G_p}{\omega} \Big|_{\max}$, $C_i = q \cdot S \cdot N_{ss}$), при варьировании температуры и внешнего напряжения, рассчитаны концентрации центров в слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ (таблица).

Таблица. Параметры ЦЛЗ в слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$).

Вид центра	Энергия активации центра, эВ	Состав пленки	Метод получения	Значение концентрации центра, см ⁻³	Сечение захвата центров σ , см ²	Постоянная времени релаксационного процесса τ , с
донор	0,5	In_2Te_3	ГВЗ	$4 \cdot 10^{15}$	10^{-12}	$(3 \div 4.6) \cdot 10^{-3}$
		In_2Te_3	напыление	$6 \cdot 10^{15}$		
		$In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$	напыление			
нейтральная ловушка	0,36	In_2Te_3	ГВЗ	$8 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$(7.94 \div 7.96) \cdot 10^{-4}$
		In_2Te_3	напыление	$2 \cdot 10^{15} \div 6 \cdot 10^{14}$		
		$In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$	напыление	$4 \cdot 10^{15} \div 10^{15}$		

Установлено, что для донорного уровня в пленках In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) среднее значение концентрации составляет $N_d \sim 4 \cdot 10^{15}$ см⁻³, в зависимости от метода получения и не зависит от приложенного внешнего напряжения. Полученные данные хорошо коррелируются со значениями, определенными из

соотношения $N_d = \frac{2}{q\epsilon_0} \left[-\frac{1}{d \left(\frac{1}{C^2} \right) / dV} \right]$. Значения концентрации ловушечного уровня N_t в

структурах, сформированных разными методами, для центра с энергией ~ 0.36 эВ имеют разброс $N_t \sim 10^{13} \div 10^{15}$ см⁻³. При этом в пленке In_2Te_3 , полученной гетеровалентным замещением, нет зависимости концентрации от приложенного внешнего напряжения, а в напыленных пленках In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ такая зависимость наблюдается ($V_{пл} = \frac{qN_t d^2}{2\epsilon_0}$). Сделан вывод, что появление глубокого центра донорного типа (N_d) в исследованных слоях связано с объемом теллурида, а нейтральной ловушки (N_t) со структурным несовершенством слоя теллурида индия.

В четвертой главе приведены результаты моделирования процессов токопрохождения в слоях типа $A_2^{III}B_3^{VI}$ гетероструктур на основе арсенида индия. Данные о параметрах ЦЛЗ в запрещенной зоне материала слоя In_2Te_3 используются для решения уравнения электронейтральности (2) в структуре $Al/In_2Te_3/InAs$ (n – типа), с учётом двух типов уровней в запрещенной зоне материала слоя:

$$n + N_t - p_t = p + N_d - n_d, \quad (2)$$

где n – концентрация электронов в зоне проводимости, p – концентрация дырок в валентной зоне, N_t – концентрация акцепторной примеси, N_d – концентрация донорной примеси, p_t – концентрация дырок на акцепторной примеси, n_d – концентрация электронов на уровне донорной примеси. Все энергии отсчитываются относительно дна зоны проводимости ($E_c=0$).

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \quad (3) \quad p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \quad (4)$$

$$n_d = \frac{2N_d}{\exp\left(\frac{E_d - E_F}{kT}\right) + 2} \quad p_t = \frac{2N_t}{\exp\left(\frac{E_F - E_t}{kT}\right) + 2}$$

$$N_c \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) + \frac{N_t}{1 + 2\exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} - \frac{N_d}{1 + 2\exp\left(\frac{E_F - E_d}{kT}\right)} = N_v \exp\left(\frac{E_g - E_F}{kT}\right) \quad (5)$$

где N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, N_v – эффективная плотность состояний в валентной зоне:

$$N_c \approx 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{1,08 \cdot T}{300}\right)^{3/2} \text{ см}^{-3} = 2,5 \cdot 10^{25} \left(\frac{1,08 \cdot T}{300}\right)^{3/2} \text{ м}^{-3} = C_1 \cdot T^{3/2}$$

$$N_v \approx 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{0,56 \cdot T}{300}\right)^{3/2} \text{ см}^{-3} = 2,5 \cdot 10^{25} \left(\frac{0,56 \cdot T}{300}\right)^{3/2} \text{ м}^{-3} = C_2 \cdot T^{3/2}$$

В уравнение электронейтральности (5) вводится дополнительный глубокий пустой центр, обеспечивающий появление электронов как основных носителей заряда, так как в *InAs* теллур является донорной примесью ($E_{dm} = 0.03$ эВ и $N_{dm} = 10^{14}$ см⁻³).

$$p^* = \frac{N_{dm}}{1 + 2 \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_{dm}}{kT}\right)}$$

$$N_c \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) + \frac{N_t}{2\exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} - \frac{N_d}{2\exp\left(\frac{E_F - E_d}{kT}\right)} = N_v \exp\left(\frac{E_g - E_F}{kT}\right) + \frac{N_{dm}}{2\exp\left(\frac{E_F - E_{dm}}{kT}\right)} \quad (6)$$

Для решения уравнения производится ряд замен:

$$q = \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) = e^{E_F/kT}; \quad t_{dm} = \frac{E_{dm}}{kT}; \quad \exp\left(\frac{E_g - E_F}{kT}\right) = \frac{e^{E_g/kT}}{e^{E_F/kT}} \Rightarrow t_g = e^{E_g/kT}$$

$$\exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right) = \frac{e^{E_t/kT}}{e^{E_F/kT}} \Rightarrow t_a = e^{E_t/kT}; \quad \exp\left(\frac{E_F - E_d}{kT}\right) = \frac{e^{E_F/kT}}{e^{E_d/kT}} \Rightarrow t_d = e^{E_d/kT}$$

Итоговое выражение:

$$C_1 \cdot T^{3/2} \cdot q^2 \cdot 2t_a + N_t \cdot q^2 - N_d \cdot t_d \cdot t_a - C_2 \cdot T^{3/2} \cdot 2t_g \cdot t_a - N_{dm} \cdot t_{dm} \cdot t_a = 0 \quad (7)$$

Решение квадратичного уравнения (7) относительно q позволяет установить зависимость уровня Ферми от температуры.

$$q^2 \left[2 \cdot C_1 \cdot T^{3/2} \cdot t_a + N_t \right] = N_{dm} \cdot t_{dm} \cdot t_a + t_a \cdot N_d \cdot t_d + C_2 \cdot T^{3/2} \cdot 2t_g \cdot t_a \quad (8)$$

С учетом данных, представленных в таблице, произведен расчет зависимости энергии уровня Ферми (рис.4 а) от температуры в интервале (77 – 400) К. В процессе изменения температуры при значениях концентрации

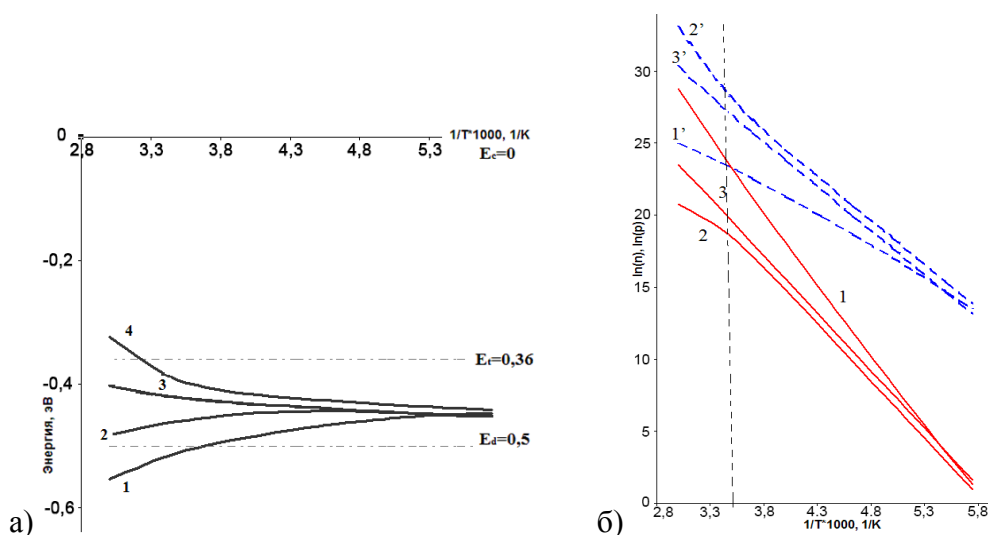


Рис. 4. Зависимость энергии уровня Ферми от температуры (а): 1 - $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 - $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 - $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 4 - $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; Температурная зависимость концентрации электронов (1' - 3') и дырок (1 - 3) в слоях In_2Te_3 (б): 1 - 1': $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 - 2': $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 - 3': $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

примеси $N_t \sim (10^{13} - 10^{15}) \text{ см}^{-3}$ и $N_d \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ наблюдается соответствующий вклад в проводимость донорного или ловушечного центра. Температуры, соответствующие такому положению уровня Ферми, при отклике уровня с энергией 0.5 эВ составляют $T \sim 277 \text{ К}$ (рис. 4 а, кривая 1), для уровня с энергией 0.36 эВ - $T \sim 296 \text{ К}$ (рис. 4 а, кривая 4). Увеличение концентрации ловушечной примеси (N_t) до значения $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ с ростом температуры приводит к резкому изменению поведения кривой $E_F(T)$ и смене типа проводимости с электронного на дырочный (рис. 4 а, кривые 3, 4). Таким образом, результаты моделирования свидетельствует о включении в процесс токопрохождения ловушечного центра с энергией 0.36 эВ, так как кроме процессов генерации ионизированных доноров, за счет термического выброса электронов с донорного уровня в зону проводимости, и их рекомбинации, вследствие захвата электронов из валентной зоны, становится возможен и процесс захвата электрона из валентной зоны на акцепторную ловушку. Анализ зависимости концентрации электронов (n) и дырок (p) от температуры образца (рис. 4 б) показал, что вблизи интервала температур $T \sim (250 \text{ К} - 300) \text{ К}$ происходит плавное изменение наклона кривых (рис. 4 б), что обусловлено проявлением центра с энергией 0.36 эВ. Делается вывод, что действительно, в таких структурах в токопрохождении участвуют ловушки и особенно интересен процесс их заполнения в результате повышения температуры. При более низких температурах $T < 250 \text{ К}$ электропроводность обусловлена электронами и контролируется уровнями в верхней половине запрещенной зоны материала. При последующем увеличении температуры в интервале $\sim (250 - 300) \text{ К}$ происходит изменение типа носителей, обеспечивающих преобладающий вклад в процесс токопереноса. Тогда особенность температурной зависимости тока $I(T)$ гетероструктуры

$Al/In_2Te_3/InAs$ (n – типа) действительно может быть обусловлена изменением степени заполнения глубоких уровней с энергиями ~ 0.36 эВ и ~ 0.03 эВ в процессе увеличения температуры, а не истощением на глубоком центре с энергией ~ 0.5 эВ в In_2Te_3 .

Достаточно высокий уровень легирования подложки арсенида индия ($n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и малая ширина запрещенной зоны (~ 0.36 эВ) позволяет рассматривать гетероструктуры $Al/In_2Te_3/InAs$ (n – тип) как структуру типа металл–полупроводник–металл. Решение для любых двух зависимостей $I(T)$ (рис. 5 б) системы уравнений (9) совместно с выражениями (3, 4) позволяет вычислить значения подвижности электронов и дырок (рис. 5 а).

$$I_1 = q \cdot (n_1 \cdot \mu_n + p_1 \cdot \mu_p) \cdot \frac{V_1 \cdot S}{d} \quad (9)$$

$$I_2 = q \cdot (n_2 \cdot \mu_n + p_2 \cdot \mu_p) \cdot \frac{V_2 \cdot S}{d}$$

где I_1 и I_2 – токи через гетероструктуру при напряжениях на Al контакте V_1 и V_2 соответственно, $S \sim 0.3 \text{ мм}^2$ – площадь алюминиевого контакта, $d \sim 500 \text{ нм}$ – толщина плёнки теллурида индия, n_1, p_1 и n_2, p_2 – концентрации электронов и дырок при напряжениях V_1 и V_2 соответственно.

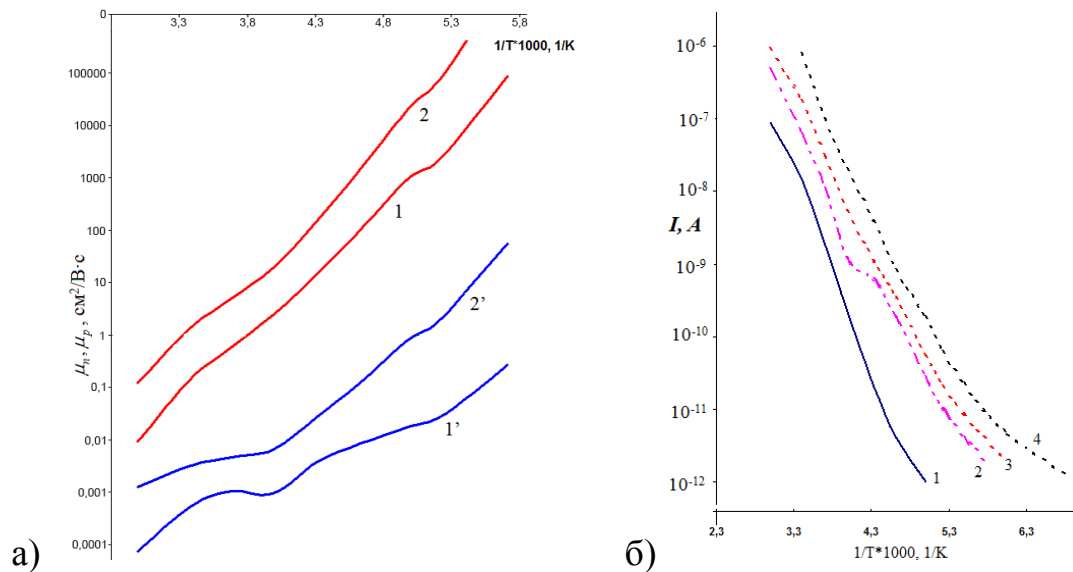


Рис. 5. Температурная зависимость подвижности электронов (1', 2') и дырок (1, 2) в слоях In_2Te_3 (а): (1 - 1': $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 - 2': $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_t = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{dm} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$); Температурная зависимость тока в гетероструктуре $In_2Te_3/InAs$, полученной методом напыления из независимых источников, при различных значениях напряжения (б): 1 – 0.4 В, 2 – 0.2 В, 3 – 0.2 В, 4 – 1 В.

Так как в реальных полупроводниках строгая периодичность поля решетки нарушена в результате наличия в ней различных дефектов, то механизм рассеяния носит сложный характер. Анализ зависимости представленной на рис. 5 а показывает, что во всей области температур подвижность дырок в теллуриде индия выше подвижности электронов. Другой особенностью этих зависимостей является отсутствие на них участков, отвечающих рассеянию носителей заряда на ионизированных примесях, так как

при уменьшении температуры подвижность носителей заряда тоже должна уменьшаться. Поэтому делается вывод, что основной вклад в рассеяние носителей заряда в плёнках теллуридов индия вносят дефекты кристаллической решётки In_2Te_3 , а также фононные колебания.

Основные результаты и выводы:

1. На основе изучения условий формирования гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) по технологии гетеровалентного замещения и методом напыления установлено, что получение более совершенной границы раздела возможно в гетероструктуре $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ (n – типа), полученной методом напыления при значении коэффициента стехиометрии $x \sim 0.65$.

2. Показано, что совместное использование анализа эквивалентных схем и метода адмиттанса в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ позволяет определить присутствие энергетических уровней с низкой концентрацией ($N_t \sim 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и наблюдать различие в частотных факторах, обуславливающих их проявление. Определен тип ЦЛЗ и рассчитаны их параметры.

3. Определена энергия и тип глубоких уровней в тонких слоях соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$ на $InAs$ (n – типа), один из которых с энергией 0.5 эВ ниже дна зоны проводимости является центром донорного типа, второй – с энергией 0.36 эВ отвечает характеру поведения нейтральной ловушки.

4. Доказано, что гетероструктуры $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ ($x \sim 0.65$) (n – типа) независимо от способа получения, содержат на границе раздела глубокие центры с энергией активации 0.5 эВ и 0.36 эВ ниже дна зоны проводимости, при этом концентрация нейтрального ЦЛЗ ($2 \cdot 10^{15} \div 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) напрямую зависит от способа получения и технологических режимов.

5. Предложена модель процессов токопрохождения в слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ на арсениде индия, основанная на решении уравнения электронейтральности с учетом двух типов глубоких уровней в запрещенной зоне материала слоя In_2Te_3 .

6. Результаты моделирования подтверждают наличие в запрещённой зоне теллурида индия двух центров локализации заряда с энергиями 0.5 эВ и 0.36 эВ и доказывают изменение типа проводимости в диэлектрическом слое при температуре выше 250 К с электронного на дырочный, обусловленное участием центра с энергией 0.36 эВ.

7. Рассчитанные значения подвижности свободных носителей заряда $[\mu_p = (10^5 \div 10^{-2}) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad \mu_e = (10^2 \div 10^{-4}) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}]$ в диапазоне температур (77 – 400) К свидетельствуют о возможности использования слоев In_2Te_3 или $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) в качестве изолирующих в полевых гетероструктурах на основе $InAs$.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Безрядин, Н.Н. Внутренняя фотоэмиссия в гетеропереходе Ga_2Se_3/Si [Текст] / Н.Н. Безрядин, Т.А. Кузьменко, С.В. Сизов, Е.А. Михайлюк, Ю.В. Сыдоров // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2004. Т.6. – № 3. – С. 20 – 24.

2. Безрядин, Н.Н. Устойчивость к облучению γ -квантами полевых гетероструктур типа МДП на основе кремния [Текст] / Н.Н. Безрядин, Т.А. Кузьменко, С.В. Сизов, Е.А. Михайлюк, Ю.В. Сыдоров, Г.М. Щевелева // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2004. Т.6. – №1. – С. 8 – 11.

3. Безрядин, Н.Н. Влияние металла на поверхностные электронные состояния кремния в слоистой системе $M/Ga_2Se_3/(SiO_x)Si$ [Текст] / Н.Н. Безрядин, В.В. Асessorов, С.В. Сизов, Е.А. Михайлюк, Ю.В. Сыдоров, Т.А. Кузьменко, В.Н. Пахомов // Известия вузов, Электроника. – 2006. – №2. – С. 18 – 25.

4. Безрядин, Н.Н. Электрофизические свойства In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ в гетероструктурах на основе $InAs$ [Текст] / Н.Н. Безрядин, Е.А. Михайлюк, А.В. Буданов, Т.В. Прокопова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. Т.10. – № 4. – С. 69 – 73.

5. Михайлюк, Е.А. Проводимость пленок In_2Te_3 в гетероструктурах на основе $InAs$ [Текст] / Е.А. Михайлюк, Н.Н. Безрядин, Е.А. Татохин, Т.В. Прокопова // Вестник Воронежского государственного университета. – 2014. – № 4. – С. 37 – 44.

6. Михайлюк, Е.А. Моделирование процессов токопрохождения плёнок $A^{III}_2B^{VI}_3$ в гетероструктурах на основе арсенида индия [Текст] / Е.А. Михайлюк, Н.Н. Безрядин, Т.В. Прокопова // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2015. Т.17. – № 2. – С. 181 – 191.

7. Домашевская, Э.П. Глубокие центры на границе раздела в гетероструктуре $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ и $In_2Te_3/InAs$ [Электронный ресурс] / Э.П. Домашевская, Е.А. Михайлюк, Н.Н. Безрядин, Т.В. Прокопова // Физика и техника полупроводников. – 2016. Т.50. – № 3. – С. 313 – 317. – Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/ftp>.

Статьи и материалы конференций

8. Безрядин, Н.Н. Моделирование электростатических характеристик слоистых систем [Текст] / Н.Н. Безрядин, С.В. Сизов, Е.А. Михайлюк // Математическое моделирование информационных и технологических систем: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТА, 2005. – Вып.7. – С. 12 – 20.

9. Кузьменко, Т.А. Влияние термодинамической работы выхода металла на электронные состояния границы раздела ПП в МПДП системах [Текст] / Т.А. Кузьменко, С.В. Сизов, Е.А. Михайлюк // ХЛІ отчетная конференция за 2002 год: тез. докл. – Воронеж: ВГТА, 2003. – С. 148.

10. Безрядин, Н.Н. Гетероструктуры $Me/Ga_2Se_3/Si$ с эффектом поля [Текст] / Н.Н. Безрядин, Т.А. Кузьменко, С.В. Сизов, Е.А. Михайлюк, Ю.В. Сыдоров // Международная научная конференция "Тонкие пленки и наноструктуры" (Пленки 2004): тез. докл. – Москва: МИРЭА. – Ч.1. – С. 204.

11. Безрядин, Н.Н. Туннельный механизм встраивания поверхностных электронных состояний в системах $M/Ga_2Se_3/(SiO_2)Si$ [Текст] / Н.Н. Безрядин, С.В. Сизов, Е.А. Михайлюк // XLII отчетная конференция за 2003 год: тез. докл. – Воронеж: ВГТА, 2004. – С.6.

12. Безрядин, Н.Н. Проводимость пленок In_2Te_3 в гетероструктурах на основе арсенида индия [Текст] / Н.Н. Безрядин, Е.А. Татохин, Т.В. Проколопова, Е.А. Михайлюк // Твердотельная электроника и микроэлектроника: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2005. – С. 4 – 9.

13. Безрядин, Н.Н. Температурные зависимости тока и дифференциальной проводимости пленок In_2Te_3 [Текст] / Н.Н. Безрядин, Е.А. Татохин, Е.А. Михайлюк // XLIII отчетная конференция за 2004 год: тез. докл. – Воронеж: ВГТА, 2005. – Ч.2. – С.165.

14. Михайлюк, Е.А. Планарная неоднородность в МДП-структурах и методы их исследования [Текст] / Е.А. Михайлюк, С.В. Сизов // III международная научно-техническая конференция «Современная металлургия начала нового тысячелетия» 31 окт.-3 нояб.2006 г., сб. науч. тр. – Липецк, 2006. – Ч.3. – С.118 – 121.

15. Михайлюк, Е.А. Метод адмиттанса для исследования планарной неоднородности в МДП-структурах [Текст] / Е.А. Михайлюк, С.В. Сизов // Материалы международной научно-практической конференции «Образование, наука, производство и управление» 23-24 ноября 2006 год: тез. докл. – Старый Оскол: НИТУ МИСиС, 2006. – Т.1. – С. 354.

16. Янин, А.А. Электронейтральность примесей в соединениях типа $A_2^{III}C_3^{VI}$ [Текст] / А.А. Янин, А.И. Корчагин, А.В. Буданов, Е.А. Михайлюк // Твердотельная электроника, микроэлектроника и наноэлектроника: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. – С. 104 – 129.

17. Михайлюк, Е.А. Математическое моделирование гетероструктур с эффектом поля [Текст] // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве»: тез. докл. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. – С. 16.

18. Михайлюк, Е.А. Построение эквивалентных схем для оценки параметров поверхностных состояний на границе раздела гетероструктур со слоями теллуридов индия [Текст] / Е.А. Михайлюк, Е.А. Татохин, Т.В. Проколопова // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2014. Ч.5. – №6. – С. 7 – 12.

19. Михайлюк, Е.А. Глубокие центры на границе раздела в гетероструктуре $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ и $In_2Te_3/InAs$ [Текст] / Е.А. Михайлюк, Т.В. Проколопова // VII Всероссийская конференция «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах» 10-15 ноября 2015 г. – С. 236 – 237.

20. Михайлюк, Е.А. Моделирование в гетероструктуре $Al/In_2Te_3/InAs$ при условии электронейтральности с учетом двух типов уровней в запрещенной зоне материала слоя In_2Te_3 [Текст] / Е.А. Михайлюк, Т.В. Проколопова // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Новые технологии в научных

исследованиях, проектировании, управлении, производстве (НТ – 2015)» тез. докл. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2015. – С. 138.

21. Михайлюк, Е.А. Электрофизические свойства полупроводниковых гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ [Текст] / Е.А. Михайлюк, Т.В. Прокопова, Г. И. Котов // XII Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» 18-20 ноября 2015 г. Т.2. – С. 223 – 230.