

На правах рукописи

КРИВОРОТОВ Николай Павлович

**ТЕНЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И НАДЕЖНОСТЬ
ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

Специальность 01.04.10 - физика полупроводников

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Т о м с к – 2002

Работа выполнена в Сибирском физико-техническом институте им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете и в Федеральном государственном унитарном предприятии «НИИПП»

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор
Карavaев Г.Ф.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Полыгалов Ю.И.

доктор технических наук, профессор
Смирнов С.В.

доктор физико-математических наук, профессор
Коханенко А.П.

Ведущая организация:

Новосибирский государственный технический университет (г. Новосибирск)

Защита состоится « 28 » мая 2002 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск. пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « » апреля 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

М.В. Коровкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Достоинства арсенида галлия среди прочих полупроводников хорошо известны. Это - высокая подвижность электронов при широкой запрещенной зоне, эффективная излучательная рекомбинация, низкий уровень СВЧ шумов, наличие эффекта Ганна, достижимость высокоомного состояния, а также широкие возможности создания гетеро- и квантово-размерных структур с полупроводниками из элементов III-V групп таблицы Менделеева. Эти достоинства определяют всё более широкое применение арсенида галлия в современной опто-, микро- и нанoeлектронике. Соответственно, работы по расширению функциональных возможностей и повышению качества приборов на основе арсенида галлия являются актуальными.

Качество прибора во многом определяется надежностью. Средние показатели надежности дискретных приборов на арсениде галлия не ниже, чем на кремнии. Однако большие дисперсии и высокие вероятности ранних отказов, присущие арсенидогаллиевым приборам, существенно снижают их гарантийные показатели надежности. Самые общие причины больших дисперсий отказов понятны. Это меньшая однородность электрофизических свойств и большее разнообразие структурных дефектов арсенида галлия по сравнению с кремнием, низкая термическая устойчивость поверхности арсенида галлия и отсутствие собственного плотного окисла, невысокие механические напряжения зарождения поверхностных дислокаций и дефектов упаковки, и др. Тем не менее, выяснение конкретных причин высоких дисперсий и вероятностей ранних отказов приборов на основе арсенида галлия является актуальным.

Обширный практический опыт Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (ФГУП «НИИПП», г. Томск) – ведущей в России организации по разработке и промышленному освоению изделий электронной техники на основе арсенида галлия – показывает, что за ранние отказы бывают ответственны структурные и механически-напряженные неоднородности, локализованные в активной зоне прибора и её окрестности. Приборы с опасными неоднородностями не всегда удается выявить в процессе стандартных технологических испытаний, что понуждает к поиску альтернативных методов диагностики. Одна из идей данной работы состоит в предположении о том, что указанные неоднородности отличаются от окружения не только электрическими свойствами, что собственно вызывает отказ, но и механическими характеристиками, и что возможны испытания приборов внешними механическими воздействиями, деформирующими однородный материал упруго, а неоднородный - не упруго. Если неоднородность локализована в окрестности активной зоны, то неупругая деформация может вызвать аномальное изменение

электрических параметров прибора (т. н. аномальный тензоэлектрический эффект), по которому прибор и может быть распознан как потенциально ненадежный. Для практической реализации подобных методов распознавания актуальны исследования природы нормальных и аномальных тензоэлектрических свойств приборов в их взаимосвязи с надежностью.

Исследования тензоэлектрических свойств приборных структур на основе арсенида галлия актуальны также для техники измерения давлений. Действительно, дно зоны проводимости арсенида галлия обладает большой константой деформационного потенциала, и приборы, электрические параметры которых экспоненциально зависят от энергии дна, высокочувствительны к всестороннему сжатию. Это открывает перспективу создания безмембранных (объемночувствительных) преобразователей давления, способных работать в широких амплитудных и частотных диапазонах измерения. Идея разработки таких преобразователей, сформулированная заведующим отделом физики полупроводников Сибирского физико-технического института (СФТИ, г. Томск) А.П. Вяткиным в начале 70-х годов, получила развитие в исследованиях сектора тензоэлектрических явлений СФТИ и лаборатории надежности ФГУП «НИИПП», выполненных под научным руководством автора и нашедших отражение в данной работе. Основными объектами исследований в рамках реализации данной идеи явились туннельные p-n переходы из GaAs и эпитаксиальные пленки из n-AlGaAs, сочетающие в себе высокую чувствительность электрических характеристик к всестороннему сжатию с высокой температурной стабильностью.

Таким образом, перспектива повышения надежности приборов на основе арсенида галлия и возможность разработки объемночувствительных преобразователей давления определили актуальность цели и задач данной диссертационной работы.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы явилось выяснение природы нормальных и аномальных тензоэлектрических свойств приборов на основе арсенида галлия, установление взаимосвязи данных свойств с надежностью приборов, поиск на этой основе способов повышения надежности и разработка интегральных тензопреобразователей давления с объемночувствительными элементами.

Цель достигалась решением следующих задач:

- исследование тензоэлектрических явлений в туннельных p-n переходах из арсенида галлия и в эпитаксиальных пленках из алюминия-галлия-мышьяка, разработка на этой основе интегральных тензопреобразователей статических и ударных давлений;

- исследование аномальных тензоэлектрических явлений в СВЧ и излучающих диодах на арсениде галлия, поиск на этой основе способов распознавания потенциально ненадежных диодов;
- исследование механизмов деградации и статистики отказов СВЧ диодов из арсенида галлия при повышенных температурах, электрических и механических воздействиях, разработка на этой основе методов ускоренных испытаний СВЧ диодов на надежность.

Объекты и методы исследования.

В работе исследовались: туннельные диоды из GaAs и GaSb; излучающие диоды с гомо (GaAs) - и гетеро (AlGaAs/GaAs) - p-n переходами; диоды с барьером Шоттки, диоды Ганна и лавинные S-диоды из GaAs; эпитаксиальные пленки GaAs и AlGaAs. При выполнении работы использовались технологические установки СФТИ и ФГУП «НИИПП»; установки измерения вольтамперных и вольтфарадных характеристик, тепловых сопротивлений и СВЧ параметров диодов, интегральной мощности излучения светодиодов, ЭДС Холла в эпитаксиальных пленках (ФГУП «НИИПП», СФТИ); стенды испытаний излучающих и СВЧ диодов на надежность (ФГУП «НИИПП»); рентгеновский микроанализатор состава, оптические и электронные микроскопы (СФТИ, ФГУП «НИИПП»); сосуд высокого давления, термобарокамера с оптическим окном, устройства трехточечного и двухосного изгиба полупроводниковых подложек, установка индентирования поверхности полупроводников (СФТИ); аэродинамическая ударная труба (ИГ СО РАН); микропирометр 14КИ1-001 (НПО «ПУЛЬСАР»); установка двойного дифференцирования вольтамперных характеристик (ИФП при Белорусском госуниверситете); образцовые манганиновые манометры (ВНИИФТРИ).

Научная новизна работы.

Оригинальные исследования, выполненные в диссертации, и научные результаты, полученные впервые, могут быть обобщены в виде следующих пунктов.

1. Систематически исследованы аномальные тензоэлектрические свойства приборов на основе арсенида галлия. Показана возможность распознавания потенциально ненадежных приборов воздействием циклов всестороннего давления.

2. Исследованы физические и статистические закономерности деградации диодов с барьером Шоттки на арсениде галлия при комплексном воздействии повышенных температур, механических напряжений, стационарных и импульсных электрических нагрузок. Показано, что напряжения сжатия контактной поверхности кристалла не влияют на скорость деградации, а напряжения растяжения увеличивают последнюю и могут вызвать смену механизма деградации от диффузионно-межфазного к микропластическому.

3. Исследованы физические и статистические закономерности деградации диодов Ганна из арсенида галлия. Показано, что кристалл генерирующего диода может быть разрушен вязкой трещиной при температурах и механических напряжениях, меньших, соответственно, температуры хрупко-пластического перехода и предела прочности арсенида галлия.

4. Показан способ ввода в p-n переход одиночных дефектов пластической деформации кристалла, открывающий перспективу изучения электронных свойств данных дефектов и детальной кинетики низкотемпературной микропластической деформации в полупроводниках.

5. Обнаружен эффект насыщения барической зависимости уровня Ферми в электронном вырожденном арсениде галлия, обусловленный захватом электронов минимума Γ на энергетические состояния, индуцированные в зоне проводимости донорной примесью.

6. Предложена модель сдвиговой тензочувствительности туннельного тока, построенная в корректном для вырожденных полупроводников приближении больших энергий дырок. В рамках данной модели рассчитаны коэффициенты сдвиговой тензочувствительности междузонного туннельного тока в арсениде галлия.

7. Предложена модель статистического расчета флуктуаций плотности легирующих атомов в сильнолегированных p-n переходах. Показано, что известные парадоксы высокой плотности междузонного тока и малости напряжений отсечки вольтфарадных характеристик туннельных диодов могут быть обусловлены флуктуационно-коррелированным распределением доноров и акцепторов в вырожденном p-n переходе.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Аномальная зависимость электрических характеристик полупроводниковых приборов от внешних механических воздействий (аномальный тензоэлектрический эффект) обусловлена пластическими деформациями металла на контакте с полупроводником и (или) микропластическими деформациями полупроводника на неоднородностях структуры кристалла. Приборы, склонные к демонстрации аномальных тензоэлектрических эффектов, склонны также к ранним отказам при наработке.

2. Скорость деградации диодов с барьером Шоттки на арсениде галлия при изотермических отжигах и при электрических воздействиях вплоть до предельно допустимых по рассеиваемой мощности определяется в основном температурой контакта с барьером Шоттки. Эта скорость зависит также от типа барьерообразующего металла, качества защиты периферии контакта диэлектрическими пленками и уровня механических напряжений растяжения контактной поверхности

кристалла. При статических электровоздействиях деградирует преимущественно периферия контакта, а при импульсных электровоздействиях – центр контакта.

3. Арсенид-галлиевым диодам Ганна миллиметрового диапазона длин волн присущи два вида деградации – монотонное ухудшение рабочих электрических параметров и катастрофические отказы. В основе обоих видов лежит единый механизм – термоактивационное распространение в активную зону диода дислокаций и микротрещин от концентраторов механических напряжений, локализованных на периферии диодного кристалла.

4. Флюктуации плотности легирующих атомов в сильнолегированных p-n переходах вызывают три эффекта: сосредоточение туннельного тока во флюктуационных сужениях p-n перехода и рост интегральной плотности туннельного тока; сосредоточение избыточных туннельных токов, формирующих туннельные спектры, в предельных флюктуационных сужениях p-n перехода; уменьшение наклона зависимости логарифма избыточного туннельного тока от напряжения смещения на p-n переходе. Указанные эффекты выражены тем значительнее, чем выше компенсация легирования p-n перехода.

5. Междузонное туннелирование электронов в вырожденных p-n переходах из арсенида галлия протекает с сохранением перпендикулярной направлению электрического поля составляющей квазиимпульса. Зависимости междузонного туннельного тока от температуры и всестороннего давления определяются исходными уровнями легирования p-n переходов, термической и барической зависимостями ширины запрещенной зоны, энергии побочных минимумов зоны проводимости и энергий электронных состояний, индуцированных в зоне проводимости донорной примесью.

Практическая значимость работы.

1. На основании исследований статистики и механизмов деградации СВЧ диодов из арсенида галлия даны рекомендации по снижению дисперсии отказов диодов Ганна миллиметрового диапазона длин волн, смесительных и настроечных диодов с барьером Шоттки, установлены и внесены в Технические Условия ФГУП «НИИПП» режимы и условия ускоренных испытаний диодов на долговечность.

2. Разработана, защищена патентом России и внедрена методика отбраковки потенциально ненадежных приборов из арсенида галлия путем воздействия циклов всестороннего давления.

3. Разработана и защищена авторскими свидетельствами СССР технология изготовления интегральных тензопреобразователей импульсных и ударных давлений с эпитаксиальными туннельными p-n переходами из арсенида галлия в качестве объемночувствительных элементов. Тензопреобразователи апробированы в

технике измерения давлений ударных волн. По совокупности параметров – миниатюрность, частотный и амплитудный диапазоны измерения, низкая стоимость, удобство калибровки – разработанные преобразователи превосходят известные аналоги.

4. Определен оптимальный для применения в датчиках давления состав твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$: $x = 0,20 \pm 0,03$. Выполнена опытно-конструкторская работа по интегральным тензопреобразователям давления с объемночувствительными элементами из эпитаксиальных пленок $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$. Тензопреобразователи защищены патентом России и апробированы в технике измерения статических давлений.

Приоритет работы состоит в изучении природы аномальных тензоэлектрических свойств полупроводниковых приборов и в разработке на этой основе оригинальной методики распознавания ненадежных приборов; в установлении основных закономерностей деградации СВЧ диодов из арсенида галлия; в разработке оригинальной модели сдвигового тензотуннельного эффекта и оригинальной модели расчета флюктуаций плотности легирующих атомов в вырожденных p-n переходах; в разработке тензопреобразователей давления с объемночувствительными элементами.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором, а также сотрудниками сектора тензоэлектрических явлений СФТИ и лаборатории надежности ФГУП «НИИПП» под научным руководством автора. Лично автором определена цель работы; разработаны лабораторные установки для исследования полупроводниковых приборов под внешними механическими воздействиями; предложены оригинальные физические модели к объяснению экспериментов; разработаны оригинальные методики испытания СВЧ диодов на надежность и распознавания ненадежных диодов; найдены оригинальные технические решения по тензопреобразователям давления с объемночувствительными элементами.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на следующих конференциях: Всесоюзные совещания по исследованию арсенида галлия, 1974 г., 1978 г., 1982 г., 1987 г. (г. Томск); Всесоюзное совещание по физике соединений A^3B^5 , 1981 г. (г. Новосибирск); Всесоюзная конференция по физическим основам надежности и деградации полупроводниковых приборов, 1982 г. (г. Кишинев); Всесоюзный симпозиум по импульсным давлениям, 1983 г. (Москва); Всесоюзная конференция по детонации, 1985 г. (г. Таллин); Всесоюзная конференция по датчикам на основе технологии микроэлектроники, 1986 г. (Москва); XII-я Всесоюзная конференция по физике полупроводников, 1990 г. (г. Киев); Международная

конференция по датчикам электрических и неэлектрических величин, 1995 г. (г. Барнаул); Международная конференция по актуальным проблемам электронного приборостроения, 1998 г. (г. Новосибирск); Международный симпозиум по конверсии научных результатов в международной кооперации, 1999 г. (г. Томск); Российская конференция по исследованию арсенида галлия, 1999 г. (г. Томск).

Результаты работы докладывались также на совещаниях Научно-координационного Совета АН СССР и Министерства приборостроения СССР по полупроводниковым первичным преобразователям, 1983 г. (Москва); на заседаниях НТС ФГУП «НИИПП» и семинарах отдела физики полупроводников СФТИ, 1976-1998 г.г. (г. Томск).

Результаты диссертации опубликованы в 50-ти работах. Из них - 30 статей в центральных российских и зарубежных рецензируемых научных журналах и сборниках, 12 тезисов докладов на конференциях, 6 авторских свидетельств СССР и 2 патента Российской Федерации.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти оригинальных глав, заключения и приложения. Диссертация содержит 321 страницу машинописного текста, включая 81 рисунок, 7 таблиц, 517 ссылок на литературу.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, цель и задачи диссертационной работы; научная новизна; научные положения, выносимые на защиту; практическая значимость работы; приоритет работы; личный вклад автора.

В главе 1 изложены результаты исследований комплексного воздействия температуры, всестороннего и анизотропного давлений на междузонный туннельный ток в туннельных диодах (ТД) из GaAs и GaSb. Представлен расчет сдвиговой тензочувствительности междузонного туннельного тока в арсениде галлия.

Изложению оригинальных результатов предшествует обзор известных исследований p^+-n^+ переходов. В обзоре отмечается, что высокая чувствительность туннельного тока p^+-n^+ переходов к всестороннему сжатию в сочетании с его высокой температурной стабильностью открывает перспективу создания безмембранных тензопреобразователей давления. Реализация такой перспективы требует знания тензоэлектрических свойств ТД. Численное описание тензотуннельных явлений оказывается непростой задачей из-за ряда проблем. Экспериментальные

проблемы связаны с неточностью и неоднозначностью вольтфарадных измерений в вырожденных p-n переходах. Расчетные проблемы состоят в том, что классические теории междузонного туннелирования [1-3] построены для слишком упрощенных моделей p-n перехода в вырожденном полупроводнике. Прежде всего, в этих теориях не учтены естественные для узких p-n переходов флюктуации легирования. Кроме того, в расчетах [1-3] используется приближение постоянного электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ), под которым обычно понимается среднее поле перехода. Между тем реальное поле вырожденного p-n перехода изменяется от нуля на краях ОПЗ до $\approx 10^6$ В/см на металлургической границе. Ряд исследователей считает, что неоднородность поля существенна для туннельной прозрачности p^+-n^+ перехода. Так, авторы [4] вычислили интегральный туннельный ток методом усреднения классической вероятности междузонного туннелирования по неоднородному полю ОПЗ. Расчетная плотность туннельного тока, согласно [4], оказывается намного выше и ближе к эксперименту, чем дают теории [1-3]. Тем не менее, с позиций полуклассического приближения процедура расчета плотности тока [4] вызывает обоснованные сомнения.

Таким образом, исследования туннельных диодов при всестороннем и анизотропном давлении, кроме чисто практической значимости, представляются интересными для уточнения механизма междузонного туннелирования, поскольку всестороннее сжатие позволяет значительно изменять параметры зонного спектра полупроводника, а анизотропное – изменять симметрию зонного спектра.

Оригинальные экспериментальные исследования по влиянию всестороннего давления (P) и температуры (T) на междузонный туннельный ток (I) выполнены на p^+-n^+ переходах, изготовленных сплавлением Sn с $p^+-GaAs<Zn>$ и Sn+0,5 % Zn с $n^+-GaSb<Te>$. Измерялись зависимости тока от напряжения смещения на p^+-n^+ переходе (V) в диапазоне давлений (0÷140) МПа при комнатной температуре и в диапазоне давлений (0÷30) МПа при температурах (223÷383) К. Измерения давали массивы экспериментальных точек $I(V, P, T)$.

Междузонный туннельный ток уменьшается с ростом давления, что качественно объясняется барическим увеличением ширины запрещенной зоны. Наблюдается также постепенное насыщение барической зависимости контактной разности потенциалов арсенид-галлиевых p^+-n^+ переходов, обусловленное насыщением барической зависимости уровня Ферми в n^+ - арсениде галлия [1*-3*].

Для установления количественных закономерностей, связывающих параметры зонного спектра GaAs и GaSb с баро- и термочувствительностью туннельного тока, выполнена вариационная подгонка расчетных и экспериментальных массивов $I(V, P, T)$. Вариационными величинами подгонки выступали не точно известные параметры p^+-n^+ перехода – концентрации акцепторов (N_A) и доноров

(N_D) – и не точно известные параметры зонного спектра n^+ -GaAs и n^+ -GaSb – энергетический зазор между минимумами зоны проводимости Γ и L ($E_{\Gamma L}$), энергетический зазор между L -минимумами и резонансными донорными состояниями (E_{LR}), линейный температурный коэффициент зазора $E_{\Gamma L}$ ($\alpha_{\Gamma L}$). Конечные расчетные выражения для плотности междузонного туннельного тока, даваемые теорией [2] и [4], выступали при вариационной подгонке в качестве формул-гипотез.

В пределах 3 %-го среднеквадратического расхождения расчета с экспериментом массивы $I(V, P, T)$ удовлетворительно описываются теорией туннелирования [4] при однозначном наборе подгоночных параметров. Оптимальные подгоночные параметры зонного спектра n^+ -GaAs составляют: $E_{\Gamma L} = (0,335 \pm 0,035)$ эВ; $E_{LR} = (0,08 \pm 0,01)$ эВ; $\alpha_{\Gamma L} = (7,3 \pm 0,08) 10^{-5}$ эВ/К. Отмечается, что эти значения следует понимать лишь как параметры, не слишком противоречащие сложившимся представлениям о зонной структуре n^+ -арсенида галлия в приближении параболического закона дисперсии для минимумов Γ и L . Для точных количественных заключений о значениях $E_{\Gamma L}$, E_{LR} и количественной интерпретации эффекта насыщения барической зависимости уровня Ферми в n^+ -арсениде галлия требуется решение задачи о плотности состояний края зоны проводимости сильно легированного полупроводника, содержащего близкие к дну зоны побочные минимумы. В отсутствие такого решения правомочно только заключение самого общего характера: насыщение барической зависимости уровня Ферми в n^+ -арсениде галлия обусловлено захватом электронов минимума Γ на энергетические состояния, индуцированные в зоне проводимости донорной примесью.

В рамках теории [2] массивы $I(V, P, T)$ либо не поддаются вариационной подгонке, либо отвечают ей при подгоночных параметрах, не приемлемых для реальных p^+ - n^+ переходов из арсенида и антимонида галлия [4*, 5*].

Эксперименты по одноосному сжатию p^+ - n^+ переходов из арсенида галлия выполнены по методике, описанной ранее [6*]. Интерпретация экспериментальных данных ведется в рамках оригинальной модели сдвигового тензотуннельного эффекта, впервые построенной в корректном для вырожденных полупроводников приближении больших энергий дырок. Согласно данной модели, основной вклад в сдвиговую тензочувствительность вносит деформационное изменение плотности состояний, разрешенных для междузонного туннелирования (изменение статистического фактора - F), а не туннельной прозрачности p - n перехода, как это считалось ранее [5, 6]:

$$F = F_0 + \Delta_c F = \frac{1}{2} \int_0^{\mu_n + \mu_p - qV} [f_n - f_p] dE \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{p_{\perp \max}^2 + \Delta_c p_{\perp}^2(\varphi)} \exp\left(-\frac{p_{\perp}^2}{p_0^2}\right) d(p_{\perp}^2), \quad (1)$$

где f_n, f_p, μ_n, μ_p - функции распределения электронов и глубины залегания уровней Ферми в разрешенных зонах n- и p-областей перехода, соответственно; E и p_{\perp} - энергия и перпендикулярная электрическому полю составляющая квазиимпульса туннелирующего электрона; φ - направление p_{\perp} ; p_0 - нормировочный импульс, задаваемый шириной запрещенной зоны и средней напряженностью электрического поля p-n перехода [1-3]; $\Delta_c F, \Delta_c p_{\perp}^2$ - соответственно, прибавки к статистическому фактору F_0 и к p_{\perp}^2 , вызванные сдвиговой деформацией кристалла.

Последовательными преобразованиями соотношения (1) в рамках теории деформированных полупроводников Бира и Пикуса [7] получено выражение для сдвиговой тензочувствительности туннельного тока самого общего вида, действительное для любых направлений туннелирования и произвольных деформаций кристалла. Для главных кристаллографических направлений это выражение удастся записать в численном виде. Так, коэффициенты сдвиговой тензочувствительности пикового туннельного тока (ξ) для четырех направлений одноосного сжатия (нижний индекс) и двух направлений туннелирования (верхний индекс) имеют вид

$$\xi \begin{bmatrix} [111] \\ [111] \end{bmatrix} = \beta \left[\frac{dD}{2E_g \sqrt{B^2 + D^2}} + \frac{1}{3} \right] S_{44}, \quad \xi \begin{bmatrix} [111] \\ [1\bar{1}0] \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \xi \begin{bmatrix} [111] \\ [111] \end{bmatrix}, \quad (2.a, б)$$

$$\xi \begin{bmatrix} [100] \\ [100] \end{bmatrix} = \beta \left[\frac{6bBK \left(\frac{C^2}{B^2 + D^2} \right)}{E_g \pi \sqrt{B^2 + D^2}} + \frac{2}{3} \right] (S_{11} - S_{12}), \quad \xi \begin{bmatrix} [100] \\ [010] \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \xi \begin{bmatrix} [100] \\ [100] \end{bmatrix}, \quad (2.в, г)$$

где β - показатель экспоненты, определяющей туннельную прозрачность $p^+ - n^+$ перехода; A, B, C - параметры энергетического спектра потолка валентной зоны; b, d - константы деформационного потенциала; S_{11}, S_{12}, S_{44} - модули податливости кристалла арсенида галлия; K - полный эллиптический интеграл первого рода.

Простота оригинальной модели сдвигового тензотуннельного эффекта и её согласие с экспериментами по зависимости междузонного туннельного тока от анизотропных деформаций $p^+ - n^+$ перехода и по зависимости коэффициентов сдвиговой тензочувствительности тока от напряжения смещения V [6*] рассматриваются автором как первое прямое доказательство того факта, что междузонное туннелирование в арсениде галлия происходит с сохранением перпендикулярной направлению электрического поля составляющей квазиимпульса электрона, или, другими словами, без рассеяния туннелирующего электрона на заряженных примесях или фононах.

Экспериментальные данные и расчеты главы 1 позволяют прогнозировать зависимости туннельного тока от температуры, всесторонних и анизотропных деформаций кристалла по исходным электрическим характеристикам $p^+ - n^+$ перехода.

В главе 2 представлены расчеты влияния флуктуаций плотности атомов легирующих примесей на междузонный и избыточный туннельные токи в сравнении с данными экспериментальных исследований ТД и излучающих диодов (ИД).

Исследования главы 1 показывают, что зависимости междузонного туннельного тока от давления и температуры могут быть непротиворечиво описаны теорией туннелирования Бонч-Бруевича и Серебренникова [4], но не поддаются описанию в рамках классических теорий [1-3]. Согласно известным экспериментальным исследованиям, реальные плотности междузонных туннельных токов, текущих через вырожденные p - n переходы, также не описываются классическими теориями, но, как правило, оказываются близкими к расчетам в рамках теории [4]. Между тем, идеология теории [4] вызывает сомнения, а приближения классических теорий кажутся, на первый взгляд, вполне приемлемыми. Данный парадокс, на самом деле, может состоять в том, что классические теории не учитывают пространственные флуктуации плотности легирующих атомов, способные вызывать заметные флуктуации ширины ОПЗ узких p - n переходов, а теория [4] неким эффективным образом учитывает.

Нами выполнены оригинальные расчеты по влиянию естественных флуктуаций плотности легирующих атомов на междузонный и избыточный туннельные токи. В отличие от известного метода оптимальной флуктуации [8] рассчитаны вероятности реализации всех возможных ширин области пространственного заряда сильнолегированного p - n перехода.

Расчеты по междузонному туннелированию привязаны к экспериментальным данным по ТД с $p^+ - n^+$ переходами, сформированными низкотемпературным ($+400$ °C) сплавлением олова с подложками $p^+ - \text{GaAs} < \text{Zn} >$ разного уровня легирования (измерялись емкости переходов и плотности пиковых токов j_p). Согласно емкостным измерениям, растворимость доноров (Sn) в n^+ -области таких переходов растет с ростом концентрации акцепторов (Zn) в p^+ -подложке, что, скорее всего, обусловлено донорно-акцепторным взаимодействием легирующих атомов в процессе формирования $p^+ - n^+$ переходов. Эмпирическая связь между средними концентрациями доноров (\bar{N}_D) и акцепторов (\bar{N}_A) удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью

$$\bar{N}_D = 0,4 \bar{N}_A . \quad (3)$$

Расчеты по $p^+ - n^+$ переходам выполнены в рамках пяти приближений.

1. Считается, что если донор (акцептор) находится в ОПЗ, то его заряд полностью экранирован неподвижными зарядами противоположного знака, а если вне ОПЗ, то – свободными электронами (дырками).

2. В качестве минимальной площадки флюктуации (S_{min}) выбирается величина $\bar{N}_D^{-2/3}$. Данный выбор исходит из тех соображений, что S_{min} не должна быть слишком большой, чтобы не пропустить сужения ОПЗ на малых площадях, и слишком малой, чтобы не нарушить электронейтральность полупроводника за внешними границами ОПЗ.

3. Принимается, что соотношение между средними плотностями доноров и акцепторов (3) действует в каждом объеме флюктуации (приближение флюктуационно-коррелированного распределения доноров и акцепторов в p^+-n^+ переходе).

4. Исходный p^+-n^+ переход разбивается на искусственные p^+-n^+ переходы разной ширины. Разбиение начинается с вырезания из кристалла микропризм с площадью основания $\bar{N}_D^{-2/3}$, оси которых ориентированы перпендикулярно металлургической границе перехода, а ширина акцепторной части ОПЗ внутри микропризм минимальна – L_p^0 . Вырезанные микропризмы сдвигаются так, чтобы образовалась единая металлургическая граница и сформировался искусственный переход с шириной акцепторной части ОПЗ $\approx L_p^0$ (нулевой искусственный переход). Оставшийся p^+-n^+ переход залечивается микропризмами с площадью основания $\bar{N}_D^{-2/3}$, вырезанными на его окраинных участках и вставленными на места микропризм, ушедших на формирование нулевого искусственного перехода. Из залеченного таким образом p^+-n^+ перехода оказываются удаленными участки с высокой плотностью акцепторов и доноров, что влечет сглаживание флюктуационных сужений ширины ОПЗ и понуждает увеличивать площадку флюктуации при формировании следующих искусственных переходов. Выбирается малая длина $\delta L \ll \bar{L}_p$, где \bar{L}_p – средняя в исходном переходе ширина акцепторной части ОПЗ. Из залеченного перехода вырезаются и сдвигаются микропризмы с шириной акцепторной части ОПЗ $L_p^0 + \delta L$ и с площадью основания $(\bar{N}_D^{-1/3} + 2,5\delta L)^2$, что дает образование следующего (первого) искусственного перехода. В оставшемся p^+-n^+ переходе залечиваются пустоты, оставшиеся от повторного вырезания микропризм. Формирование i -того искусственного перехода состоит в вырезании и сдвиге микропризм с $S^i = (\bar{N}_D^{-1/3} + i \cdot 2,5\delta L)^2$ и $L_p^i = L_p^0 + i \cdot \delta L$, в залечивании p^+-n^+ перехода после i -того вырезания. Процедура завершается разбиением исходного p^+-n^+ перехода на искусственные переходы с разными, но уже слабо флюктуирующими ширинами ОПЗ.

Отмечается, что в искусственных p^+-n^+ переходах силовые линии электрического поля менее отклонены от перпендикуляра к металлургической границе по сравнению с исходным p^+-n^+ переходом. Вследствие этого приближение 4 ведет к усилению фактора влияния флуктуаций плотности легирующих атомов на флуктуации ширины ОПЗ и превращает дальнейший расчет плотности туннельного тока в мажорантную оценку.

5. Положительные и отрицательные заряды искусственных переходов равномерно «размазываются» по своим половинам ОПЗ, что превращает их в плоские и резкие в смысле легирования p - n переходы.

Предлагается понимать предельно возможную растворимость акцепторов в GaAs ($N_{A \text{ lim}}$) как невозможность попадания двух и более акцепторных атомов в объем $\delta V = N_{A \text{ lim}}^{-1}$, а i -тый флуктуационный объем ($V^i = L_p^i \cdot S^i$) представлять состоящим из $n^i = V^i / \delta V$ объемов (ящиков) δV . В этом понимании вероятность попадания m^i акцепторов (шаров) в n^i ящиков ($m^i \leq n^i$) становится биномиальной (W_B^i), а вероятность организации i -того искусственного перехода (W^i), в котором m^i задается потенциалом ОПЗ резкого p - n перехода i -той ширины, становится условной:

$$W^i = \left(1 - \sum_{j=0}^{i-1} W^j \right) W_B^i. \quad (4)$$

Вероятность W^i отвечает площади i -того искусственного перехода при таком выборе шага δL , когда сумма зарядов всех искусственных переходов становится равной заряду исходного p^+-n^+ перехода единичной площади – $\bar{N}_A \cdot \bar{L}_p$.

Плотность пикового туннельного тока, текущего через флуктуирующий p^+-n^+ переход ($j_{p\phi}$), определяется выражением

$$j_{p\phi} = \sum_i W^i \cdot j_p \left[\bar{E} (L_p^0 + i \cdot \delta L) \right], \quad (5)$$

где \bar{E} – среднее поле искусственного перехода i -той ширины, а зависимость $j_p(\bar{E})$ задается теорией междузонного туннелирования Кейна [2].

Плотности пикового туннельного тока, рассчитанные по (5), оказываются значительно выше плотностей, рассчитанных по Кейну [2], но всё же заметно ниже экспериментальных плотностей j_p [8*]. Ввиду мажорантности принятой флуктуационной модели такое отличие расчета от эксперимента признается значимым.

Основываясь на измерениях вольтфарадных характеристик p^+-n^+ переходов, напряжения отсечки которых оказываются меньшими контактной разности потенциалов на (0,2 ÷ 0,4) В, делается вывод о существовании слоя повышенной плотно-

сти доноров у металлургической границы p^+-n^+ перехода. Наличие такого слоя увеличивает вероятность организации узких участков ОПЗ, следствием чего может стать существенное повышение интегральной плотности туннельного тока. Подобное повышение плотности демонстрирует расчет туннельного тока в рамках упрощенной флюктуационной модели p^+-n^+ перехода, в которой принята равновесной реализация любой из ширин акцепторной и донорной частей ОПЗ в интервалах от минимально до максимально возможных значений. Аналитическое выражение для плотности туннельного тока, рассчитанное по такой модели, оказывается отличным от соответствующего выражения теории [4] всего лишь несущественным предэкспоненциальным множителем. На основании этого предлагается понимать расчет Бонч-Бруевича [4] не как процедуру усреднения вероятностей туннелирования по неоднородному полю плоского $p-n$ перехода, а как процедуру суммирования туннельных токов по площади $p-n$ перехода с флюктуирующей шириной ОПЗ.

Итак, корреляция концентраций доноров и акцепторов в ОПЗ (1), вольтфарадные измерения и выполненные статистические оценки позволяют заключить: высокая плотность междузонного туннельного тока и малость напряжения отсечки вольтфарадной характеристики туннельных диодов могут быть обусловлены флюктуационно-коррелированным распределением доноров и акцепторов в области пространственного заряда, вызванным донорно-акцепторным взаимодействием легирующих примесей в процессе формирования вырожденного $p-n$ перехода.

Флюктуационные расчеты избыточных туннельных токов (I_x) привязаны к экспериментальным данным по излучающим диодам с p^+-n переходами из GaAs и с гетеро- $p^+(AlGaAs)-n(GaAs)$ переходами, изготовленными жидкофазной эпитаксией (измерялись статические вольтамперные характеристики (ВАХ) и их вторые производные в диапазоне напряжений смещения $+(0,3 \div 1,4)$ В при температурах $(4,2 \div 77)$ К). ВАХ ИД в интервале прямых смещений $+(0,7 \div 1,3)$ В хорошо аппроксимируются одиночными прямыми линиями в масштабе $\ln I_x - V$, наклоны которых слабо зависят от температуры, что указывает на туннельный характер переноса заряда. Но значения экспериментальных наклонов $\alpha = d \ln I_x / d V$ оказываются значительно меньшими предсказываемых известными теориями избыточного туннелирования. Предполагается, что одной из причин уменьшения α могут быть флюктуации ширины ОПЗ.

Статистический расчет избыточных туннельных токов проведен в рамках изложенных выше пяти приближений с двумя отличиями:

1) игнорируется роль донорно-акцепторного взаимодействия при формировании p^+-n перехода, анализируются флюктуации заряда только в n -области, по-

сколькx $\bar{L}_n \gg \bar{L}_p$, принимается $\bar{N}_A = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\bar{N}_D = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_{D \max} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, где $N_{D \max}$ - максимальная растворимость доноров в n-области перехода;

2) поскольку $\bar{N}_D \ll N_{D \max} \ll N_{D \lim}$, где $N_{D \lim}$ - предельно возможная растворимость доноров в GaAs, то вероятность попадания N^m доноров в объем V^m (при среднем числе доноров в этом объеме $\bar{N}_D V^m$) близка к пуассоновой (W_{Π}).

Анализируется легирование n-области без компенсации и с частичной компенсацией акцепторами. Плотность избыточного туннельного ток (j_x) вычисляется по формуле, подобной (5). Функциональная зависимость $j_x \left[E^{\nu} (L_n^i) \right]$ задается теорией туннелирования Классена [9] в предположении о том, что глубокие уровни (ГУ) дефектов, определяющих ток I_x , расположены в середине запрещенной зоны GaAs.

Вероятность реализации m -того искусственного p^+ - n перехода (W^m) при легировании n-области без компенсации определяется выражением

$$W^m = \left(1 - \sum_{i=0}^{m-1} W^i \right) W_{\Pi}^m (N^m; \bar{N}_D V^m), \quad (6)$$

а при легировании с частичной компенсацией акцепторами – выражением

$$W^m = \left[1 - \sum_{i=0}^{m-1} W^i \right] * \sum_{N^j = N^{+m}}^{\lfloor N_{D \max} V^m \rfloor} W_{\Pi} [N^j; \bar{N}_D V^m] * W_{\Pi} [N^j - N^{+m}; K \bar{N}_D V^m], \quad (7)$$

где N^{+m} - число заряженных доноров в объеме V^m ; N^j - общее число доноров в том же объеме; K - коэффициент компенсации легирования.

Плотности избыточных туннельных токов, рассчитанные по распределениям вероятностей (6) и (7), превосходят соответствующие плотности, рассчитанные по Классену [9], в $10^3 \div 10^4$ раз. Наклоны α , рассчитанные по распределениям (5), (6), (7), оказываются близкими к большинству экспериментальных данных. Флюктуационные увеличения плотности избыточного тока и уменьшения наклона α тем более существенны, чем выше компенсация легирования n-области перехода.

Оказывается, что флюктуации плотности атомов основной легирующей и компенсирующей примесей ведут к сосредоточению «гладкого» туннельного тока в локальных сужениях p^+ - n перехода, а «горбового» туннельного тока – в предельных локальных сужениях p^+ - n перехода. Такая разница в распределениях «гладкого» и «горбового» токов предполагает возможным применение методов туннельной спектроскопии к ИД с достаточно широкими p - n переходами [9*, 10*].

Сужения ОПЗ могут быть обусловлены не только естественными флюктуациями плотностей легирующих атомов в малых объемах, но и крупномасштабными технологическими «пятнами» высокой плотности атомов лигатуры или дефек-

тов с ГУ. Такие «пятна» могут приводить к возникновению на второй производной ВАХ бессистемных по напряжению смещения трапецевидных выбросов, наблюдаемых в эксперименте наряду с систематическими двойными всплесками. В целом туннельные спектры ИД отражают не только энергетику глубоких уровней, но также структурные и зарядовые неоднородности светодиодного p-n перехода.

Экспериментально замечено, что в процессе деградации ИД туннельные спектры обедняются. Процесс обеднения совпадает по времени с ростом в зоне излучения так называемых «дефектов темных пятен». Скорее всего, обеднение спектров обусловлено уходом из p-n перехода в зону излучения дефектов, порождающих в GaAs центры безызлучательной рекомбинации. Данное предположение подтверждается тем, что излучающие диоды с «богатými» туннельными спектрами склонны к ускоренной деградации по интегральной мощности излучения [8*].

Таким образом, междузонное и избыточное туннелирование в сильнолегированных p-n переходах может быть описано классическими теориями при корректном учете флюктуаций легирования. Расчеты и эксперименты главы 2 позволяют дать ясное физическое толкование эвристической теории туннелирования [4] и понять её успех в описании тензотуннельных явлений. Эти расчеты и эксперименты могут служить также основой для практического применения методов туннельной спектроскопии к излучающим диодам, дальнейшее развитие которых перспективно для прогнозирования надежности данных диодов.

В главе 3 представлены исследования аномальных тензоэлектрических свойств приборных структур на основе арсенида галлия и их взаимосвязи с надежностью.

В обзорном разделе отмечается, что в приборах на основе арсенида галлия при анизотропных механических нагрузках, меньших предела прочности кристалла, и даже при всестороннем сжатии часто возникают аномальные тензоэлектрические эффекты (АТЭ) в виде гистерезисных, аномальных обратимых и аномальных необратимых по давлению изменений электрических характеристик приборов. С аномалиями приходится бороться при создании тензопреобразователей давления с целью повышения их стабильности. По аномальным тензоэффектам возможно также распознавание потенциально ненадежных приборов.

Среди разного типа механических воздействий, способных вызывать АТЭ, нами отдано предпочтение всестороннему сжатию по трем причинам:

- всестороннее сжатие не создает сдвиговых механических напряжений в однородном твердом теле и не может генерировать в нем дополнительные дефекты;

- всестороннее сжатие может трансформироваться на структурных неоднородностях твердого тела в анизотропные механические напряжения, способные вызывать локальные микропластические деформации и аномальные тензоэффекты;
- всестороннее сжатие является производительным и легко воспроизводимым технологическим приемом, обработке давлением могут подвергаться большие партии полупроводниковых приборов на любом этапе технологического процесса.

Гистерезисные зависимости электрических характеристик приборов от давления чаще всего вызываются пластическими деформациями металлов на контакте с полупроводником, что доказывает решение статически-неопределимой задачи для всесторонне сжатого меза-контакта металл/полупроводник [11*]. На примере контакта Al/Si показана возможность значительного снижения контактных механических напряжений обработкой высоким давлением. Показано, что таким путем могут быть выявлены приборы с ненадежными контактами и с дефектами кристалла около контакта. В частности, обработка циклами давления эмпирически выбранной амплитуды и длительности позволяет эффективно отбраковывать излучающие диоды с некачественным контактом Pb <Zn(1%)+Au(1%)> / GaAs и с приконтактными микротрещинами кристалла. В результате дополнительной отбраковки циклами давления удастся в несколько раз повысить 95 %-й гамма-ресурс излучающих диодов [17*, 19*].

Наряду с гистерезисными явлениями в приборах из арсенида галлия часто возникают АТЭ в виде аномальных обратимых и необратимых по механическому воздействию изменений электрических параметров приборов. В туннельных и излучающих диодах это выражается в обратимом и необратимом росте избыточного туннельного тока [13*], в диодах с барьером Шоттки и лавинных S-диодах – в необратимом уменьшении напряжения пробоя [16*], в эпитаксиальных пленках из арсенида галлия и алюминия-галлия-мышьяка – в необратимом изменении электросопротивления и коэффициента барочувствительности электросопротивления [14*]. Данные аномалии связаны со структурными дефектами кристалла, что подтверждается многочисленными примерами закономерного снижения вероятности и интенсивности проявления аномалий при повышении структурного совершенства кристалла в активной зоне прибора и её ближайшей окрестности. В туннельных диодах это имеет место при переходе от сплавной технологии их изготовления к более совершенной технологии жидкофазной эпитаксии, в пленках GaAs, изготовленных методом газофазной эпитаксии, - при уменьшении концентрации ростовых дефектов упаковки и мелких ямок роста, в эпитаксиальных пленках n^+ -AlGaAs - при введении буферного высокоомного эпитаксиального n-слоя между n^+ -пленкой и полуизолирующей подложкой арсенида галлия [36*].

Слабые проявления АТЭ в структурно-совершенных приборах могут быть практически полностью устранены путем бароциклических тренировок приборов при повышенных температурах. В частности, эмпирически подобранным режимом таких тренировок удается снизить необратимость в зависимости электросопротивления n^+ -пленок AlGaAs с буферным n-слоем AlGaAs от давления вплоть до предельно достигаемой точности измерения 0,001 %, что позволяет использовать такие пленки в технологии изготовления объемночувствительных элементов (ОЧЭ) измерительных преобразователей давления.

Механизм обратимых и необратимых АТЭ состоит в обратимом и необратимом по давлению распространении дефектов микропластической деформации кристалла от структурных неоднородностей, играющих роль локальных концентраторов механических напряжений, в активную зону прибора. Это положение подтверждается явно выраженной скачкообразностью кинетик АТЭ, присущей пластической деформации, и почти полной аналогией АТЭ, возникающих при всестороннем сжатии и при сферическом индентировании р-n переходов [13*, 15*].

Нам впервые удалось реализовать условия индентирования р-n перехода, при которых возникает интереснейшее явление – пульсация избыточного тока перехода при постоянном усилии индентирования [18*]. Одинаковые импульсы тока числом до 50 шт. следуют друг за другом через равные промежутки времени. Пульсацию тока можно объяснить только прохождением через р-n переход одиночных дефектов пластической деформации кристалла. Пульсацию можно ускорять и замедлять незначительным, соответственно, увеличением и уменьшением усилия индентирования, а также останавливать как на вершине импульса, так и в межимпульсном интервале. В режиме остановленной пульсации возможно измерение электрических характеристик р-n перехода, что открывает уникальные перспективы для изучения электронных свойств одиночных дефектов и детальной кинетики низкотемпературной микропластической деформации в полупроводниках.

Структурные неоднородности, вызывающие АТЭ и провоцирующие ранние отказы, могут не присутствовать в приборе исходно, а развиться в процессе его наработки. Такому развитию способствуют электрические неоднородности активной зоны прибора, локализирующие рассеиваемую электрическую мощность. Подобный пример возникновения АТЭ рассмотрен на примере лавинных S-диодов из арсенида галлия, содержащих электрически неоднородный, сильнокомпенсированный π -v переход [16*]. Всестороннее давление не вызывает заметных необратимых АТЭ в S-диодах, не прошедших наработку. Однако после токовой тренировки в режиме переключения из высокоомного в низкоомное состояние часть диодов демонстрирует необратимый АТЭ в виде катастрофического уменьшения напряжения переключения после воздействия цикла высокого давления. Элементарные

оценки показывают, что локализация лавины в узком канале пробоя π - ν перехода достаточна для инициирования процессов локального электропереноса электродного металла в полупроводник или локальной электропластической деформации кристалла. В результате таких процессов узкий канал пробоя теряет структурную однородность и может провоцировать ранний отказ или АТЭ. Определен режим обработки S-диодов циклами всестороннего давления (бароциклами), позволяющий эффективно выявлять потенциально ненадежные образцы. Бароциклирование переводит в брак около 50 % диодов по признаку возникновения АТЭ. Зато в оставшихся годными диодах 95 %-й гамма-ресурс увеличивается почти в 5 раз по сравнению с диодами, не прошедшими обработку давлением [19*].

Делается вывод о том, что приборы на основе арсенида галлия, склонные к проявлению аномальных тензоэлектрических эффектов, склонны также к ранним отказам [12*]. Обработка приборов циклами всестороннего давления может быть использована в качестве эффективной технологической операции отбраковки потенциально ненадежных образцов по признаку наличия-отсутствия АТЭ.

На основании результатов исследований нормальных и аномальных тензоэлектрических явлений разработаны технология и конструкции ОЧЭ статических и ударных давлений. ОЧЭ статических давлений содержат полуизолирующую подложку арсенида галлия с двумя изолированными резисторами из эпитаксиальной пленки $n^+ - Al_x Ga_{1-x} As$ ($x = (0,17 \div 0,22)$). Состав пленки выбран по результатам исследований пленок разного состава в широком диапазоне давлений и температур как оптимальный по барочувствительности и температурной зависимости барочувствительности электросопротивления. ОЧЭ ударных давлений содержат полуизолирующую подложку арсенида галлия с $p^+ - n^+$ переходом, образованным контактом гомоэпитаксиальных пленок p^+ - и n^+ -типов проводимости. С целью борьбы с гистерезисами омические контакты к p^+ - и n^+ -пленкам удалены от $p^+ - n^+$ перехода. ОЧЭ статических давлений сохраняют метрологические параметры неизменными после многократных и длительных воздействий высоких давлений (до 200 МПа). ОЧЭ ударных давлений устойчивы к неоднократным воздействиям давлений ударных волн амплитудой до 100 МПа.

Исследования главы 3 показывают, что внешние механические воздействия, в целом, ведут к снижению надежности полупроводниковых приборов. В следующей главе, посвященной исследованию надежности СВЧ диодов на арсениде галлия, рассмотрено влияние собственных механических напряжений диодных кристаллов на надежность.

В главе 4 представлены физико-статистические исследования надежности СВЧ диодов из арсенида галлия. Проанализированы механизмы и статистика отказов, изучено влияние на скорость деградации диодов механических напряжений. Исследования выполнены на представительных выборках диодов, разработанных ФГУП «НИИПП».

Установлено, что деградация СВЧ диодов из арсенида галлия является термоактивационным процессом. Это позволяет рассматривать температуру активной зоны диодов в качестве основного фактора, задающего темп их деградации. Накопленные отказы представительных выборок диодов подчиняются логарифмически-нормальному распределению по времени наработки, что обусловлено исходной дисперсией распределения дефектов, ответственных за деградацию, а также дисперсиями распределения температур и механических напряжений в активных зонах диодов испытываемых выборок. Показано, что логарифмически-нормальное распределение не является достаточным основанием для вывода о единственности термоактивационной реакции, лимитирующей скорость деградации. Все признаки единственности [10] могут выполняться только потому, что ускоренные испытания на долговечность реально проводятся в узком интервале повышенных температур $\Delta T \approx (50 \div 80) ^\circ\text{C}$, ограниченном сверху предельно допустимыми режимами и условиями ускоренных испытаний, а снизу – предельным временем, реально отводимым на такие испытания. Показано, что только параллельные, или только последовательные ускоренные испытания недостаточны для достоверного установления коэффициентов форсирования (K_ϕ), а следовательно, для прогноза гамма-процентного ресурса диодов на нормальные условия эксплуатации. Показано, что для повышения достоверности такого прогноза необходимо сочетание параллельных и последовательных ускоренных испытаний [24*].

Впервые систематически исследована надежность арсенид-галлиевых контактов с барьером Шоттки (КБШ) на технологических пластинах и диодов с барьером Шоттки (ДБШ) в металлокерамических корпусах различного конструктивного и технологического исполнения при воздействии повышенных температур, стационарных и импульсных электрических нагрузок, механических напряжений растяжения и сжатия контактной поверхности, при разном качестве защиты периферии контакта (открытая, химически окисленная и защищенная пленкой SiO_2 поверхность арсенида галлия).

В процессе изотермических отжигов КБШ деградируют монотонно. Монотонная деградация выражается в росте коэффициента идеальности ВАХ, увеличении обратного тока и уменьшении напряжения пробоя. Деградация КБШ, защищенных диэлектрическими пленками, лимитируется диффузионно-межфазными реакциями на границе металл/полупроводник и характеризуется энергиями акти-

вации $E_a = (1,7 \div 1,8)$ эВ для контактов Au/Ti/GaAs и $E_a = 1,4$ эВ для контактов Au/Ti/WRe/GaAs. Первая из них отвечает энергии активации реакций образования соединений титана с мышьяком, вторая близка к значению энергии активации диффузии атомов галлия по границам зерен пленки тугоплавкого металла [11]. Дегра- дация периферии КБШ опережает деградацию его центральных участков, что вы- ражается в опережающем изменении предпробойных участков ВАХ, отражающих проводимость КБШ по периферийным микроплазменным пробоям. Дегра- дация контактов Au/Ti/WRe/GaAs идет намного медленнее, чем контактов Au/Ti/GaAs, что объясняется лучшей термостойкостью первых по сравнению со вторыми.

Некачественная защита периферии КБШ ведет к снижению энергии актива- ции реакции деградации вплоть до 0,5 эВ и к резкому увеличению скорости дегра- дации, что обусловлено низкотемпературной диссоциацией открытой поверхности арсенида галлия.

Механические напряжения сжатия контактной поверхности не влияют сколь- либо заметно на деградацию КБШ, напряжения же растяжения ускоряют послед- нюю и могут вызвать смену механизма деградации от диффузионно-межфазного к микропластическому. О пластическом механизме старения говорит возникновение большого активационного объема реакции деградации $V_a = (8 \pm 2) \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$, сни- жающего энергию активации вплоть до 0,6 эВ. Сильная анизотропия влияния ме- ханических напряжений сжатия и растяжения на скорость деградации объясняется тем, что на периферии КБШ уже действуют большие собственные механические напряжения растяжения, так что малая добавка внешних напряжений растяжения к собственным оказывается достаточной для инициирования на периферии контакта микропластических деформаций.

Квазистатические электровоздействия (обратные смещения меньше напря- жения пробоя, плотности прямых токов меньше 10^4 А/см^2 , частотный спектр элек- тровоздействий меньше 1 МГц) не изменяют термический характер монотонной деградации ДБШ. Этот результат согласуется с известными экспериментальными данными о том, что электровоздействия малого и среднего уровня мощности не влияют на термический характер деградации ДБШ (ускорение деградации вызыва- ется только дополнительным разогревом КБШ рассеиваемой электрической мощ- ностью). Напротив, в процессе мощных импульсных электровоздействий (при т. н. испытаниях ДБШ на «выгорание») предпробойный участок ВАХ почти не изменя- ется вплоть до отказа КБШ, что говорит о слабой деградации периферии контакта. Решение нестационарного уравнения теплопроводности показывает, что вследст- вие неоднородного импульсного разогрева приборного кристалла температура центра контакта оказывается на сотни градусов Цельсия выше температуры его периферии. При этом весь контакт попадает в зону действия термомеханических

напряжений сжатия, не влияющих на скорость деградации КБШ. В итоге причиной «выгорания» ДБШ становится тепловая деградация центра КБШ, перерастающая в развитие электротепловой неустойчивости. Этот вывод подтверждается известными исследованиями по деструкции центральных участков КБШ, отказавших при испытаниях на «выгорание» [12].

Ступенчатые испытания на «выгорание» двух типов ДБШ – с контактами Au/Ti/WRe/GaAs и с контактами Au/Ti/GaAs – показывают, что в отличие от данных [13] (согласно которым стойкость к электроимпульсным воздействиям не зависит от типа барьерной металлизации) стойкость к «выгоранию» первых намного больше вторых, что объясняется естественной причиной, а именно более высокой термостойкостью контактов WRe/GaAs по сравнению с контактами Ti/GaAs [26*].

Дисперсия распределения отказов ДБШ по времени наработки связана с разбросами среди диодов выборки собственных механических напряжений, а также с различиями в плотности барьерообразующей металлизации и в пористости периферийной пленки диэлектрика. Соответственно, снижение дисперсии отказов возможно за счет повышения однородности и плотности пленок металла и диэлектрика, а также за счет конструктивных и технологических исполнений ДБШ, направленных на снижение собственных механических напряжений в КБШ.

Отмечается, что, начиная с пионерской работы Ганна [14], проблема обеспечения надежности диодов Ганна (ДГ) не теряет актуальности до сего времени. Неоднозначность известных данных по механизмам деградации ДГ обусловлена многообразием технологических и конструктивных исполнений диодов разных фирм. Нами исследована надежность ДГ из GaAs миллиметрового диапазона длин волн, разработанных и освоенных промышленно ФГУП «НИИПП». Анализ деградации проведен с учетом технологии изготовления и конструкции диодов, режима их наработки, кинетики деградации, статистики и видов отказов. Исследованные диоды содержат приборный кристалл арсенида галлия n^+ -типа проводимости с меза-структурой, присоединенной торцом к медному баллону корпуса посредством ультразвуковой эвтектической пайки через золотую шайбу (т. н. «обратный» монтаж кристалла, преследующий целью повышение эффективности отвода тепла от активной зоны диода). Меза-структура содержит последовательные эпитаксиальные слои арсенида галлия $n^+ - n - n^+$ -типов проводимости, среди которых n -слой является активным (активная зона диода).

Деградация ДГ в режиме СВЧ генерации проявляется в двух видах [25*]:

1) монотонное старение рабочих параметров – рост низкополевого сопротивления (r_0); уменьшение рабочего тока ($I_{раб}$); увеличение теплового сопротивления (R_T); уменьшение мощности СВЧ генерации ($P_{Г}$); снижение к. п. д. генерации;

2) катастрофические отказы – прекращение СВЧ генерации в некоторый момент наработки из-за трансформации ВАХ ДГ к режиму короткого замыкания, либо к разрыву электрической цепи.

Микроструктурный анализ отказавших диодов демонстрирует локальное проплавление активного n-слоя, либо разрушение кристалла трещинами, распространяющимися чаще от периферии контакта меза-структуры с корпусным баллоном и реже – от микротрещин скрайбирования на поверхности подложки. Берега трещин, разрушающих приборный кристалл, содержат участки с низкой эффективностью катодолюминесценции, что говорит о наличии вязкой компоненты разрушения.

Монотонное старение и катастрофические отказы термоактивационны. Энергия активации монотонного старения, определенная по уровню условного отказа любого из параметров r_0 , $I_{раб}$, R_T , P_T , составляет $(1,45 \pm 0,05)$ эВ. Энергия активации катастрофических отказов имеет значения $(1,5 \pm 0,2)$ эВ.

Последовательный анализ процессов монотонной деградации и катастрофических отказов показывает, что увеличение сопротивлений r_0 и R_T при наработке ДГ обусловлено ростом электрической неоднородности n-слоя из-за проникновения в него дефектов извне. Высказывается предположение, что такими дефектами являются дислокации. Это предположение согласуется со многими известными экспериментальными исследованиями по деградации ДГ и подтверждается расчетами тепловых полей и термоупругих напряжений в кристалле генерирующего ДГ, аналогией отказов при токовых тренировках и наработке ДГ, близостью энергий активации монотонной деградации и катастрофических отказов друг к другу и к энергии активации скольжения дислокаций в арсениде галлия.

Источниками испускания дислокаций являются зародышевые микротрещины и скопления поверхностных дислокаций, внесенные в приборный кристалл при его скрайбировании и при сборке диода. Высокая подвижность дислокаций в кристалле генерирующего ДГ (температура которого ниже температуры хрупко-пластического перехода, а механические напряжения ниже предела прочности арсенида галлия) обеспечивается, по-видимому, известным для ряда полупроводников электропластическим эффектом.

Делается вывод о том, что движущей силой деградации диодов Ганна являются контактные и термоупругие механические напряжения приборных кристаллов, а в основе монотонной деградации и катастрофических отказов лежит единый механизм – распространение дислокаций и вязких микротрещин от зародышевых дефектов (концентраторов механических напряжений), локализованных на периферии кристаллов, в активную n-область диодов.

Дисперсия отказов ДГ обусловлена разбросами размеров зародышевых дефектов, тепловых сопротивлений и механических напряжений. Соответственно, снижение дисперсии отказов возможно за счет оптимизации технологии сборки диодов, а также за счет снижения тепловых сопротивлений, контактных и термоупругих напряжений в приборном кристалле.

Исследования надежности ИД, ДБШ и ДГ говорят о существенном влиянии механических напряжений на скорость деградации. Если механические напряжения зависят ещё и от температуры корпуса прибора, то возникает проблема корректности оценки коэффициентов K_ϕ при испытаниях на долговечность. Эта проблема рассмотрена количественно на примере СВЧ диода, ресурс которого ограничен отказами в виде разъединения микропроволочного электровывода с приборным кристаллом [23*]. Процесс разъединения контакта термоактивен, что допускает оценку времени наработки прибора до отказа по критерию длительной прочности Журкова [15]. Показано, что если выполняется условие $\sigma_p \ll \sigma_{вр}$, где σ_p – механическое напряжение разрыва контакта; $\sigma_{вр}$ - временное сопротивление разрыву, то коэффициент K_ϕ одинаков для всех приборов. В противном случае, K_ϕ индивидуален для каждого прибора. На конкретном примере конструктивного исполнения СВЧ диода показан способ расчета K_ϕ , привязанный к тестовым технологическим испытаниям на усилие отрыва электровывода от кристалла.

На базе проведенных физико-статистических исследований надежности разработан оригинальный метод ускоренных параллельно-последовательных испытаний СВЧ диодов из арсенида галлия на долговечность, отличающийся высокой достоверностью оценки их гамма-процентного ресурса. Формально метод ведет к использованию в известном выражении для коэффициента форсирования K_ϕ статистически обоснованного минимального значения энергии активации $E_{a\ min}$ [24*]. С применением этого метода разработаны и внесены в Технические Условия основной номенклатуры СВЧ диодов ФГУП «НИИПП» режимы и условия ускоренных испытаний на долговечность.

В главе 5 представлены оригинальные разработки интегральных тензопреобразователей статических, импульсных и ударных давлений, содержащих в качестве чувствительных к давлению элементов эпитаксиальные p^+-n^+ переходы из арсенида галлия и эпитаксиальные пленки из твердого раствора $n^+-Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ на полуизолирующих подложках арсенида галлия [29*-37*].

В обзорном разделе отмечается, что наибольшее распространение в современной технике измерения давлений получили интегральные тензопреобразователи давления (ИТД), содержащие кремниевую профилированную мембрану с тен-

зорезистивным мостом (КТМ), что обусловлено уникальными возможностями миниатюризации КТМ, высокой механической добротностью кремния, возможностью изготовления мембран с тензорезисторами групповыми методами микроэлектроники [16]. К недостаткам ИТД с КТМ отнесены: узкий диапазон измерения, большой разброс по тензочувствительности, трудности при измерении высоких давлений. Делается вывод о том, что в области измерения высоких давлений данные недостатки можно преодолеть за счет применения ОЧЭ. Среди последних перспективны резисторы из AlGaAs n-типа проводимости и $p^+ - n^+$ переходы из GaAs, сочетающие в себе высокую барочувствительность с высокой температурной стабильностью электрических характеристик. Отмечается, что известные попытки практического применения таких ОЧЭ не достигли ожидаемых успехов из-за недостаточных технологических проработок, направленных на устранение АТЭ, и конструктивных решений, обеспечивающих всесторонность сжатия ОЧЭ и приемлемую стойкость ИТД к вибрациям и ударам.

Разработанный ОЧЭ для ИТД статического давления содержит: полуизолирующий кристалл GaAs с двумя пленочными барорезисторами из $n\text{-Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$, снабженными омическими контактами; керамическую пластинку, в центре которой выполнена выемка, а у выемки и на периферии сформированы контактные площадки, причем площадки у выемки и на периферии соединены четырьмя тонкопленочными резистивными металлическими дорожками. Кристаллы размещены в выемках с узкими зазорами, а омические контакты барорезисторов соединены микропроводами с контактными площадками у выемки. Каждая пара дорожек, соединяющих барорезистор с периферийными контактными площадками, содержит три последовательных участка, первый из которых обладает квадратичной зависимостью сопротивления от температуры, второй имеет линейную зависимость сопротивления от температуры, сопротивление третьего термостабильно. Сопротивления всех участков выбраны из условий минимизации разбаланса моста, формируемого из четырех барорезисторов (на двух ОЧЭ), и максимизации термостабильности разбаланса моста [35*].

При таком исполнении кристалл оказывается погруженным в компрессионную жидкость, что исключает развитие в нем анизотропных механических напряжений. В то же время жесткие микропровода и тонкий слой компрессионной жидкости в зазорах препятствуют перемещениям кристалла, что обеспечивает высокую стойкость ИТД к вибрациям и ударам. Все технологические операции по изготовлению ОЧЭ являются групповыми и поддаются полной автоматизации.

Описан вариант исполнения ИТД, содержащего корпус с двумя полостями, разделенными жесткой перегородкой, и двумя ОЧЭ, закрепленными на противоположных стенках перегородки. В одной из полостей действует измеряемое дав-

ление, в другой – атмосферное. Четыре барорезистора на двух ОЧЭ соединены посредством металлокерамических электрогермовводов высокого давления в мост Уитстона так, что барорезисторы, воспринимающие давление, оказываются включенными в противоположные плечи моста. В итоге изменение давления вызывает разбаланс моста [36*].

Разбросы барочувствительности, нелинейности и температурной зависимости барочувствительности мостов, задаваемые технологической неоднородностью состава AlGaAs в барорезисторах, не превышают 10 % и могут быть уменьшены до 1 % и менее лазерной подгонкой термостабильных резисторов на керамической пластине. Возможность получения малых разбросов по чувствительности облегчает взаимозамену ИТД при эксплуатации.

Разработанные ИТД с ОЧЭ не уступают по метрологическим характеристикам ИТД с КТМ среднего класса точности. В то же время однотипным ИТД с ОЧЭ могут быть перекрыты 11 стандартных диапазонов измерения – от 4 МПа до 400 МПа, что недоступно для ИТД с КТМ.

Разработаны технология и конструкции интегральных тензопреобразователей ударных давлений с эпитаксиальными p^+-n^+ переходами из арсенида галлия в качестве объемночувствительных элементов. Вариант исполнения ИТД, предназначенный для измерения давлений ударных волн в жидкостях, содержит кристалл с эпитаксиальным p^+-n^+ переходом в центре каплевидной капсулы, выполненной из многослойного полимера и смонтированной на конце коаксиального антивибрационного кабеля. В режиме измерения давлений p^+-n^+ переход смещается обратным током, величина которого выбирается из условия равенства сопротивления перехода волновому сопротивлению кабеля. Вариант исполнения ИТД, предназначенный для измерения давлений ударных волн в газах, содержит кристалл с p^+-n^+ переходом, размещенный в углублении боковой поверхности иглы-рассекателя, заполненном эластичным кремнийорганическим гелем. В развитие идеи повышения барочувствительности Сикорского [17] предложено облучение p^+-n^+ переходов быстрыми электронами с последующим термическим отжигом [31*-33*].

В качестве примера измерений приведены осциллограммы давления ударной волны в ближней, средней и дальней зонах взрыва в морской воде и скачка давления в аэродинамической ударной трубе, зарегистрированные с помощью ИТД с эпитаксиальными p^+-n^+ переходами. Длительность фронта нарастания ударного давления, характеризующая быстродействие ИТД, не превышает 2 мкс.

Миниатюрные размеры ИТД обеспечивают достоверное измерение амплитуды и профиля ударной волны. Всесторонность сжатия ОЧЭ сразу же за фронтом ударной волны допускает калибровку ИТД статическим давлением, что много проще и точнее калибровки импульсным давлением. Суммарная погрешность не-

линейности и гистерезиса ИТД не выше 3 % в диапазоне (0÷100) МПа, что удовлетворяет современным требованиям к точности измерения давлений ударных волн. ИТД ударных волн, содержащие ОЧЭ с эпитаксиальными p⁺-n⁺ переходами, по совокупности параметров – миниатюрность, амплитудный и частотный диапазон измерения, низкая стоимость, удобство и точность калибровки – превосходят известные аналоги [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертации впервые систематически исследованы нормальные и аномальные тензоэлектрические свойства приборов на основе арсенида галлия в их взаимосвязи с надежностью и с возможностью создания интегральных тензопреобразователей давления с объемночувствительными элементами.

Основные выводы работы формулируются в виде следующих пунктов.

1. Установлено, что изменения электрофизических характеристик приборов на основе арсенида галлия при всестороннем сжатии и при действии анизотропных механических напряжений, меньших предела прочности кристалла, могут быть нормальными и аномальными. Нормальные изменения обусловлены упругими деформациями кристалла, деформационной зависимостью электронного энергетического спектра арсенида галлия и преобладающим механизмом переноса заряда. Аномальные изменения могут вызываться пластическими деформациями металла на контакте с полупроводником и (или) микропластическими деформациями полупроводника на структурных неоднородностях кристалла. Приборы, склонные к проявлению аномальных тензоэлектрических эффектов, склонны также к ранним отказам в процессе наработки. Разработана, защищена патентом России и внедрена на опытном заводе ФГУП «НИИПП» методика распознавания потенциально ненадежных приборов воздействием циклов всестороннего давления.

2. Установлено, что статистика отказов СВЧ диодов из арсенида галлия описывается логарифмически-нормальным распределением по времени наработки, а дисперсия отказов определяется дисперсиями распределений в представительных выборках диодов дефектов, ответственных за деградацию, тепловых сопротивлений и механических напряжений. Разработан метод параллельно-последовательных ускоренных испытаний на долговечность, отличающийся повышенной достоверностью оценки ресурса СВЧ диодов.

3. Установлено, что вплоть до предельно допустимых температур и электрических нагрузок деградация контактов с барьером Шоттки на арсениде галлия является термоактивационным процессом, энергия активации которого зависит от

типа барьерообразующего металла, качества защиты периферии контакта диэлектрическими пленками и от величины механических напряжений растяжения контактной поверхности кристалла.

4. Показано, что арсенид-галлиевым диодам Ганна миллиметрового диапазона длин волн присущи два вида деградации: монотонное ухудшение электрических параметров и катастрофические отказы. В основе обоих видов лежит единый механизм – термоактивационное распространение в зону генерации домена дислокаций и микротрещин от концентраторов механических напряжений, локализованных на периферии диодного кристалла.

5. Предложена оригинальная статистическая модель учета флюктуаций плотности легирующих атомов в вырожденных р-п переходах. Показано, что флюктуации ведут к сосредоточению туннельного тока в локальных сужениях р-п перехода; к повышению плотности туннельного тока; к уменьшению наклона в зависимости логарифма избыточного туннельного тока от напряжения смещения. Показано, что парадокс малости напряжений отсечки вольтфарадных характеристик туннельных диодов может быть обусловлен флюктуационно-коррелированным распределением доноров и акцепторов в р-п переходе. Установлено, что зависимости междузонного туннельного тока в вырожденных р-п переходах из GaAs от температуры и всестороннего давления определяются исходными уровнями легирования переходов, барической и термической зависимостями ширины запрещенной зоны, энергии побочных минимумов зоны проводимости и энергий состояний, индуцированных в зоне проводимости GaAs донорной примесью.

6. Впервые в корректном для вырожденных полупроводников приближении больших энергий дырок рассчитана сдвиговая тензочувствительность туннельного тока. Показано, что междузонный туннельный ток в вырожденном арсениде галлия определяется вероятностью прямозонного туннелирования без рассеяния туннелирующего электрона на заряженных примесях или фонах.

7. Разработаны, апробированы и защищены авторскими свидетельствами СССР и патентом России технология и конструкции интегральных тензопреобразователей статических, импульсных и ударных давлений с эпитаксиальными резисторами из алюминия-галлия-мышьяка и эпитаксиальными туннельными р-п переходами из арсенида галлия в качестве чувствительных элементов. Разработанные тензопреобразователи отличаются от известных аналогов широким диапазоном измерения давлений. Тензопреобразователи импульсных и ударных давлений по совокупности параметров – миниатюрность, амплитудный и частотный диапазон измерения, низкая стоимость, удобство и точность калибровки – превосходят известные аналоги.

В целом совокупность результатов диссертации может рассматриваться как дальнейшее развитие тензоэлектрических методов исследования полупроводников и полупроводниковых приборов. Наряду с решением традиционных для данных методов задач – изучением электронного энергетического спектра и механизмов переноса заряда в полупроводниках, показаны новые возможности тензоэлектрических методов в исследовании надежности полупроводниковых приборов и в разработке тензопреобразователей давления с рекордно широкими амплитудным и частотным диапазонами измерения.

В приложении к диссертации приведены документы о внедрении результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1*. Алексеева З.М., Вяткин А.П., Криворотов Н.П. О чувствительности пикового тока туннельных диодов из арсенида галлия к давлению // Изв. ВУЗов. Физика. - 1976. - № 9. - С. 74-77.

2*. Алексеева З.М., Вяткин А.П., Криворотов Н.П. Влияние давления на межзонный ток в арсениде галлия // ФТП. - 1977. - Т. 11, № 2. - С. 222-225.

3*. Alekseeva Z.M., Vyatkin A.P., Krivorotov N.P., Karavaev G.F. Effect of pressure on hole effective masses in GaAs // Phys. stat. sol.(B).-1978 -V.88. - P. 321-326.

4*. Вяткин А.П., Калинин Ю.М., Криворотов Н.П. Исследование влияния температуры и гидростатического давления на междузонный ток туннельных диодов // ФТП. - 1986. - Т. 20, № 3. - С. 564-566.

5*. Калинин Ю.М., Криворотов Н.П. Влияние температуры и гидростатического давления на междузонный ток туннельных диодов из GaAs // ФТП. - 1988. - Т. 22, № 2. - С. 219-222.

6*. Вяткин А.П., Криворотов Н.П. Пьезотуннельный ток в GaAs p-n переходах // Изв. ВУЗов. Физика. - 1977. - № 7. - С. 134-139.

7*. Алексеева З.М., Вяткин А.П., Криворотов Н.П. Влияние давления на резонансные состояния ДХ-центров в арсениде галлия / Тез. докл. XII Всесоюз. конф. по физике полупроводников. – Ч. 1. – Киев, 23-25 окт. 1990 г. - С. 221-222.

8*. Калинин Ю.М., Криворотов Н.П. Плотность туннельного тока в вырожденных p-n переходах на арсениде галлия / Сб. трудов «VI Всесоюз. совещание по исследованию арсенида галлия». Т. 2. – Томск. – 1987. – С. 124-125.

9*. Вяткин А.П., Иноземцев К.И., Калинин Ю.М., Криворотов Н.П., Ломако В.М., Новоселов А.М. Исследование глубоких уровней гомо- и гетеропереходов на арсениде галлия методом туннельной спектроскопии // ФТП. - 1984.- Т. 18, № 1. - С. 76-78.

10*. Вяткин А.П., Калинин Ю.М., Криворотов Н.П. Исследование избыточных токов p^+ -n-GaAs переходов методом туннельной спектроскопии // Изв. ВУЗов. Физика. – 1985. - № 8. – С. 21-22.

11*. Вяткин А.П., Криворотов Н.П., Мисик А.М. Избыточные механические напряжения в меза-p-n переходах, индуцированные гидростатическим давлением // Изв. ВУЗов. Физика. - 1976. - № 4. - С. 60-63.

12*. Вяткин А.П., Криворотов Н.П., Хан А.В. Исследование деградации GaAs - приборов при термоэлектрических и барических воздействиях / Сб. трудов «VI Всесоюз. совещание по исследованию арсенида галлия». Т. 1. - Томск. - 1987.- С. 38-39.

13*. Алексеева З.М., Вяткин А.П., Криворотов Н.П., Щеголь С.С. Аномальные тензоэлектрические эффекты в туннельных диодах из арсенида галлия // Изв. ВУЗов. Физика. - 1987. - № 8. - С. 84-88.

14*. Алексеева З.М., Диамант В.М., Красильникова В.М., Криворотов Н.П., Пороховниченко Л.П. Эффекты анизотропии сжатия в эпитаксиальных слоях GaAs, легированных серой, при всестороннем давлении //ФТП. -1988.- Т. 22, № 10. - С. 1743-1746.

15*. Алексеева З.М., Диамант В.М., Криворотов Н.П., Мисик А.М. Аномальные тензоэлектрические явления в полупроводниковых приборах / Сб. «Полупроводниковая тензометрия». - Новосибирск. - 1988. - С. 30-42.

16*. Белобородов П.Ю., Диамант В.М., Каримбаев Д.Д., Криворотов Н.П. Исследование механизма отказов лавинных S-диодов на арсениде галлия // Электронная техника. Сер 2. Полупр. приборы. - 1990. - Вып. 2(205). - С. 75-81.

17*. Патент РФ № 2034305 МКИ G 01R 31/26. Способ отбраковки полупроводниковых приборов с определенным типом дефекта / П.Ю. Белобородов, Ю.М. Калинин, Н.П. Криворотов, П.Ю. Семин. – Опубл. 30.04.95. Бюл. № 12.

18*. Криворотов Н.П., Щеголь С.С. Исследование микропластической деформации в GaAs / Сб. «Application of the conversion research results for international cooperation: SIBCONVERS' 99». Proc. of the third international symposium. V. 2, 18-20 may 1999. - Tomsk. - P. 515-518.

19*. Криворотов Н.П., Хан А.В., Щеголь С.С. Аномальные тензоэффекты и катастрофические отказы в приборах на арсениде галлия / Сб. Мат. седьмой российской конф. «Арсенид галлия - 99» 21-23 окт. 1999 г. – г. Томск. - 1999. - С. 178-180.

20*. Диамант В.М., Толбанов О.П., Криворотов Н.П., Хлудков С.С. Пороговый датчик давления на основе GaAs-лавинного S-диода / Сб. «Труды Всесоюз. конф. по детонации», Таллин. – 1985. – С. 132-133.

21*. А.С. СССР № 1075085 МКИ G 01 K 5/20. Датчик экстремальных температур / Ю.М. Калинин, А.А. Вилисов, А.П. Вяткин, Н.П. Криворотов. – Оpubл. 23.02.84. Бюл. № 7.

22*. Гермогенов В.П., Диамант В.М., Коротченко З.В., Криворотов Н.П., Позолотин В.А. Влияние гидростатического давления на удельное сопротивление твердого раствора $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ // ФТП. - 1988. - Т. 22. - № 4. - С. 623-627.

23*. Криворотов Н.П., Усольцев А.А. Расчет коэффициентов форсирования для ускоренных испытаний полупроводниковых приборов на долговечность // Электронная техника. Сер. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. - 1990. - Вып. 2(139). - С. 13-16.

24*. Криворотов Н.П., Усольцев А.А., Хан А.В. Оценка ресурса ИЭТ методом ступенчатого увеличения нагрузки на этапе ОКР // Электронная техника. Сер. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. - 1990. - Вып. 2(139). - С. 29-32.

25*. Калинин Ю.М., Криворотов Н.П., Попов А.И., Усольцев А.А., Хан А.В. Надежность арсенид-галлиевых полупроводниковых приборов // Электронная промышленность. - 1993. - № 9. - С. 74-78.

26*. Божков В.Г., Криворотов Н.П., Куркан К.И., Усольцев А.А., Щеголь С.С. Влияние отжига и импульсного электровоздействия на надежность GaAs-контактов с барьером Шоттки // Электронная промышленность. - 1998. - № 1-2. - С. 196-199.

27*. Криворотов Н.П., Вяткин А.П., Брудный В.Н., Кривов М.А. Датчик давления на основе арсенид-галлиевых туннельных диодов, облученных электронами // ПТЭ. - 1974. - № 6. - С. 168-170.

28*. Алексеева З.М., Брудный В.Н., Кривов М.А., Криворотов Н.П. Влияние собственных дефектов решетки на избыточные токи туннельных диодов из арсенида галлия // Изв. ВУЗов. Физика. - 1976. - № 9. - С. 88-92.

29*. Криворотов Н.П., Вяткин А.П., Щеголь С.С. Туннельные диоды для измерения давлений // ПТЭ. - 1977. - № 2. - С. 226-227.

30*. АС СССР № 640615 МКИ H01L 21/56; H 01L 23/28. Способ герметизации полупроводниковых элементов, чувствительных к давлению / И.М. Винокурцева, Н.П. Криворотов. – Оpubл. 7.09.78.

31*. АС СССР № 786708 МКИ H01L 21/263. Способ изготовления полупроводниковых тензочувствительных элементов / В.Н. Брудный, А.А. Вилисов, В.М. Диамант, Н.П. Криворотов. – Оpubл. 24.07.1979.

32*. АС СССР № 789004 МКИ H01L 21/263. Способ изготовления полупроводниковых тензочувствительных элементов / З.М. Алексеева, В.Н. Брудный, А.А. Вилисов, А.П. Вяткин, М.А. Кривов, Н.П. Криворотов. – Оpubл. 14.08.80.

33*. Вилисов А.А., Брудный В.Н., Диамант В.М., Криворотов Н.П. Исследование радиационных дефектов в арсениде галлия при гидростатическом давлении // ФТП. - 1980. - Т. 14, № 1. - С. 13-16.

34*. Вяткин А.П., Калинин Ю.М., Криворотов Н.П., Рябцев А.П., Щеголь С.С. Преобразователь давления с термостатированным р-п переходом // Приборы и системы управления. - 1985. - № 8. - С. 21-22.

35*. Патент РФ № 2141103 МКИ G 01 L 9/00. Чувствительный элемент датчика давления / Н.П. Криворотов, Ю.Г. Свинолупов, А.В. Хан, С.С. Щеголь. – Оpubл. 10.11.99.

36*. Krivorotov N.P., Svinolupov Yu.G., Chan A.V., Schegol S.S. The integrated pressure sensor with AlGaAs-baroresistor / Mat. 4 th international conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. «APEIE-98», 23-26 sept. 1998 v.1. -Novosibirsk. - IEEE 0-7803-4938-5/981998. - P. 153-155.

37*. АС СССР № 1381350 МКИ G01L 9/06. Полупроводниковый датчик давления / А.А. Афоничев, А.П. Вяткин, Н.П. Криворотов, С.С. Щеголь. – Оpubл. 15.03.88.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Келдыш Л.В. О поведении неметаллических кристаллов в сильных электрических полях // ЖЭТФ.- 1957. - Т. 33, № 4. - С. 994-1003.

2. Kane E.O. Zener tunneling in semiconductors // J. Phys. Chem. Solids. - 1960. -V. 12, № 2. - P. 181-189; Theory of tunneling // J. Appl. Phys. - 1961. - V. 32, № 1. - p. 83-91.

3. Fredkin D.R., Wannier C.H. Theory of electron tunneling in semiconductor junction // Phys. Rev. - 1962. - V. 128, № 5. - P. 2654-2661.

4. Бонч-Бруевич В.Л., Серебренников П.С. О вольтамперной характеристике туннельного диода // Радиотехника и электроника. - 1961. - Т. 6. - С. 2041-2053.

5. Fischer C.W., Heasell E.A. Effect of uniaxial stress on InSb-tunnel junction // J. Phys. and Chem. Solids. - 1974. - V. 35. - P. 807-810.

6. Long A.M., Hulme K.F. The effect of uniaxial stress on interband tunneling in arsenic-doped germanium // Brit. J. Appl. Phys. - 1965. - V. 6, № 2. - P. 147-153.

7. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. - М.: Наука. - 1972. - 584 с.

8. Райх М.Э. Рузин И.М. Флюктуационный механизм избыточных туннельных токов в р-п-переходах // ФТП. - 1985. - Т. 19, № 7. - С. 1217-1225.
9. Classen R.S. Excess and hump currents in Esaki diodes // J. Appl. Phys. - 1961. - V. 32, № 11. - P. 2372-2378.
10. Рейнольдс Ф.Г. Тепловое старение полупроводниковых компонентов // ТИИЭР. - 1974. - Т. 62, № 2. - С. 105-115.
11. Lee Jong-Lam, Mun Jae Kyoung, Lee Byung-Teak. Thermal degradation mechanism of Ti/Pt/Au Schottky contact to n-type GaAs // J. Appl. Phys. - 1997. -V. 82, № 10.- P. 5011-5016.
12. Christou A., Anand Y. GaAs mixer diode burn out mechanism / International Failure Physics Simp., April 8-10 1980, Las Vegas, 1980. - IEEE Digest. - P. 140-144.
13. Swallow G.H., Oxley T.H., Hanson A.M. Recent advantages in the burn-out properties of low noise gallium arsenide Schottky barrier mixer diodes / European microwave Conf. Proc. Brussel. - 1973. - V. 1. - P. 143-145.
14. Gunn J.B. Microwave oscillation of current in III-V semiconductors // Sol. St. Comm. - 1963. - V. 1, № 9. - P. 88-91.
15. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // ФТТ.- 1980. - Т. 22, № 11. - С. 3344-3349.
16. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. - М.: Энергоиздат. - 1983. - 137 с.
17. Сикорский М. Применение полупроводниковых преобразователей на р-п переходах для измерения давлений и деформаций / Сб. «Физическая акустика». Ч. Б / Под. ред. У. Мэзона. - М.: Мир. - 1967. - С. 210-301.
18. Каталоги фирм «PCB Piesotronic INC» (США) и «Kistler» (Швейцария) за 1994÷1995 гг.