

На правах рукописи

**МАРТЫНОВ Ярослав Борисович**

**УДК 621.382.323.**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАВИННО – ИНЖЕКЦИОННОЙ  
НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ  
ТРАНЗИСТОРАХ СВЧ ДИАПАЗОНА С ЦЕЛЬЮ  
ПОВЫШЕНИЯ ИХ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ**

**Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро - и нанозлек-  
троника, приборы на квантовых эффектах»**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Фрязино 2014 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Исток», г. Фрязино Московской обл.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Пашковский Андрей Борисович.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, ведущий научный сотрудник Журавлев Константин Сергеевич,

кандидат физико-математических наук, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, заведующий лабораторией Борисов Виталий Иванович.

Ведущая организация ОАО «НПП «Пульсар».

Защита состоится 18 февраля 2014 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д409.001.01 при ФГУП «НПП «Исток» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная, д. 2а, Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток».

Автореферат разослан      января 2014г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



Погорелова Э.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Твердотельная сверхвысокочастотная (СВЧ) электронная компонентная база, одним из важнейших элементов которой остаются усилители мощности на полевых транзисторах, активно востребована для разработки и производства систем беспроводной связи, включающей широкий спектр аппаратуры, в том числе для стационарной и мобильной телекоммуникационной аппаратуры, для высокоскоростной оптоволоконной связи, спутникового и кабельного телевидения, в том числе телевидения высокой четкости, устройств радиолокации на основе активных фазированных антенных решеток, радиоастрономии, телеметрии, контрольно-измерительной аппаратуры и много другого.

Несмотря на огромный прогресс в развитии элементной базы за последние годы, основными активными элементами в диапазоне частот от единиц до сотен ГГц остаются полевые транзисторы с барьером Шотки (ПТШ) на арсениде галлия, других соединениях  $A_3B_5$ , и различных гетероструктурах на их основе. Полевые транзисторы (ПТ) термостабильны, а также имеют высокие характеристики в СВЧ диапазоне и более универсальны в части их применения по сравнению с гетеробиполярными транзисторами или различными типами диодов в ряде частотных диапазонов. Кроме того технология ПТ позволяет формировать их одновременно с другими элементами в едином цикле изготовления монолитных интегральных схем СВЧ.

В последние годы наблюдается бурный всплеск активности в области разработки мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, особенно на гетероструктурах на основе нитрида галлия и их использования в различных типах усилителей мощности.

Выходные характеристики полевых транзисторов определяются многими факторами: электрофизическими параметрами структуры, размерной обработкой, топологией, особенностями вольт – амперных характеристик в режимах близких к предельно допустимым для этих приборов. Поэтому понимание физики процессов непосредственно предшествующих разрушению транзисторов и оптимизация их структуры является актуальной задачей и влечет за собой фундаментальные исследования электронных транспортных свойств.

Вопросы проектирования и изготовления ПТ отражены во множестве статей и научных работ, однако, расчет режимов близких к разрушению транзисторов до сих пор оставался открытым. Такой расчет дает возможность оценить влияние топологических и электрофизических параметров на границы допустимых режимов работы прибора, а также оценивать перспективность с этой точки зрения новых конструкций ПТШ.

**Цель работы.** Исследование физики процессов, происходящих в мощных высокочастотных полевых транзисторах в областях токов и напряжений, близких к предельно допустимым для этих приборов.

#### **Основные задачи исследований:**

- разработка математических моделей, алгоритмов и программ, позволяющих анализировать физические процессы в наноразмерных полупроводниковых многослойных структурах с граничными условиями, моделирующими как источники напряжения, так и источники тока;
- исследование с помощью этих моделей статических и высокочастотных характеристик ПТШ и ПТ на гетероструктурах, а также определяющих эти характеристики физических процессов, связанных с неоднородным распределением электрического поля, растеканием тока из канала транзистора в подложку и нелокальностью дрейфа горячих электронов и дырок, развитием лавинно – инжекционной неустойчивости;
- выработка практических рекомендаций по совершенствованию структур и оценки перспективности новых конструкций полевых транзисторов.

**Объектом исследования** служат – мощные полевые транзисторы и разностные схемы для двумерных уравнений токопереноса.

**Предметом исследования** служат – многослойные полупроводниковые гетероструктуры.

**Научная новизна** работы состоит в разработке оригинальных математических моделей, позволяющих проводить исследование режимов работы наноразмерных полевых транзисторов, непосредственно предшествующих их разрушению. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Предложены полностью консервативные абсолютно устойчивые полуневяные монотонные разностные схемы 1-го порядка аппроксимации по времени и 2-го — по пространственным переменным для решения численными методами нестационарных двумерных уравнений как локально – полевой так и квазигидродинамической моделей. Благодаря своим свойствам схемы позволяют получать достаточно точные решения на грубых пространственных и временных сетках даже для гетероструктур описываемых уравнениями с резко меняющимися коэффициентами.

2. Предложен метод, модифицирующий граничные условия, применяемые при численном решении уравнений полупроводниковой плазмы в многомерном случае. Обычные граничные условия соответствует использованию в качестве источников питания и сигнала источников напряжения. Предложен новый безытерационный метод задания смешанных граничных условий, соответствующих использованию в качестве источников питания источников тока или источников тока и источников напряжения одновременно и позволяющий рассчитывать S – образные характеристики полупроводниковых приборов, а также включать многомерные модели в расчет внешних электрических схем, содержащих как сосредоточенные, так и распределенные элементы.

3. Показано, что в мощных полевых транзисторах с затвором на барьере Шотки максимум коэффициента полезного действия (КПД) определяется напряжением лавинного пробоя затвора в отличие от максимума мощности, который определяется напряжением срыва лавинно-инжекционной неустойчивости.

4. Исследован механизм внезапного выгорания GaAs ПТШ при напряжениях меньших напряжения пробоя затвор-сток. Механизм объяснен быстрым (менее 1 нс) установлением вольт-амперных характеристик (ВАХ) с областью отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), последующим, управляемым стоковой нагрузкой, переключением транзистора в состояние с высокой проводимостью. В этом состоянии в полуизолирующей подложке транзистора образуются токовые шнуры шириной порядка 10 мкм и высокой плотностью тока, в которых благодаря джоулеву разогреву и происходит локальное проплавление структуры ПТШ.

5. Показано, что напряжение пробоя открытого канала ПТШ, определяемое напряжением срыва лавинно – инжекционной неустойчивости

может быть увеличено за счет введения слоя узкозонного материала между активным и буферным слоем.

6. Предложено использовать в качестве канала гетероструктурного транзистора прямоугольную квантовую яму, содержащую тонкий квантоворазмерный слой узкозонного полупроводника с высокой подвижностью InAs. Показано, что максимальный ток в такой структуре увеличивается на 50-85 %, а мощность – на 40-70 %.

7. Показано, что дополнительное введение поглотителя дырок, увеличивающего напряжение срыва лавинно – инжекционной неустойчивости, увеличивает предельную отдаваемую транзистором мощность примерно в 2 раза.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенная для решения численными методами нестационарных двумерных уравнений квазигидродинамической модели полностью консервативная абсолютно устойчивая полунеевная монотонная разностная схема 1-го порядка аппроксимации по времени и 2-го — по пространственным переменным в совокупности с новым безытерационным методом задания смешанных граничных условий, позволяет моделировать полупроводниковые приборы с S – образными характеристиками.

2. Механизм внезапного выгорания GaAs ПТШ при напряжениях меньших напряжения пробоя затвор-сток объясняется быстрым (менее 1 нс) установлением ВАХ с областью ОДП, последующим, управляемым стоковой нагрузкой, переключением транзистора в состояние с высокой проводимостью. В этом состоянии в полуизолирующей подложке транзистора образуются токовые шнуры шириной порядка 10 мкм и высокой плотностью тока, в которых благодаря джоулеву разогреву и происходит локальное проплавление структуры ПТШ.

3. В мощных полевых транзисторах с затвором на барьере Шотки максимум КПД определяется напряжением лавинного пробоя затвора в отличие от максимума мощности, который определяется напряжением срыва лавинно-инжекционной неустойчивости.

4. Напряжение пробоя открытого канала ПТШ, определяемое напряжением срыва лавинно – инжекционной неустойчивости, может быть

увеличено за счет введения слоя узкозонного материала между активным и буферным слоем.

5. При использовании в качестве канала гетероструктурного транзистора прямоугольной квантовой ямы, содержащей тонкий квантово-размерный слой узкозонного полупроводника с высокой подвижностью InAs, максимальный ток в транзисторе увеличивается на 50-85 % за счет эффекта всплеска дрейфовой скорости, а мощность – на 40-70 % за счет того, что эффективная ширина запрещенной зоны тонкого слоя узкозонного полупроводника расширяется из-за эффектов размерного квантования. Введение поглотителя дырок, увеличивающего напряжение срыва лавинно – инжекционной неустойчивости, приводит к двукратному увеличению теоретической предельной отдаваемой транзистором мощности.

**Практическая ценность работы** состоит в разработке математических моделей и программ, позволяющих проводить исследование режимов работы наноразмерных полевых транзисторов, непосредственно предшествующих их разрушению, оценке влияния топологических и электрофизических параметров на границы допустимых режимов работы прибора, а также оценке перспективности новых конструкций ПТШ.

Разработанные методы использованы при разработке параметрического ряда транзисторов (ЗП612 А, Б, В ЗП976 А, Б, В, Г, Д, «Плафон»), выпускаемых серийно.

#### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы опубликованы в материалах международных и российских конференций: X Всесоюзной научной конференции «Электроника СВЧ», Минск, 1983; II Республиканской конференции «Математическое моделирование элементов и фрагментов БИС», Рига, стр. 31, 5-7 марта 1990; 19<sup>th</sup> Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Stockholm, Sweden, May 21-24, 1995; 25-th European Microwave Conference, Bologna, Italy, September 4-7 1995; International Conference on Compound Semiconductors, Sankt-Petersburg, 1996; 21st International Conference on Microelectronics, 1997; 27th European Solid-State Device Research Conference Stuttgart, Gemany, 22 -24 September, 1997; 1997 Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium; Международной Крымской конференции «СВЧ-

техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, (КрыМиКо'2003), 8-12 сентября 2003 года; (КрыМиКо'2004), 13-17 сентября 2004 года; (КрыМиКо'2005), 12-16 сентября 2005 года; (КрыМиКо'2006), 11-15 сентября 2006; (КрыМиКо'2007), 10-14 сентября 2007 года; (КрыМиКо'2009), 14-18 сентября 2009 года; (КрыМиКо'2013), 8-13 сентября 2013г.; XII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 24-25 октября 2013, Москва.

### **Публикации.**

По материалам диссертации автором опубликовано 25 печатных работ: из них 15 статей в журналах из перечня ВАК РФ, 1 авторское свидетельство СССР, сделано 19 докладов на 16-ти международных и российских конференциях.

**Объём работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Материал изложен на 132 страницах машинописного текста, содержит 84 рисунка и 2 таблицы, список литературы из 129 наименований.

### **Содержание и результаты работы.**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы работы, определены цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы и рекомендации, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы.

**В главе 1** приведены описания разработанных новых моделей планарных полупроводниковых приборов различной степени строгости.

**В разделе 1.1** приведена постановка задачи.

**В разделе 1.2** дана классификация существующих моделей токопереноса в наноразмерных полупроводниковых структурах, применимых для материалов группы  $A_{III}B_V$  или тройных соединений типа  $Al_xGa_{1-x}As$ . Приведена оценка характерных размеров структур, в которых необходимо применять ту или иную систему уравнений токопереноса.

**В разделе 1.3** дано описание новой экономичной монотонной полностью консервативной разностной схемы для двумерных неста-



ционарных задач в рамках диффузионно - дрейфовой модели. Схема полунеевая, построена по принципу предиктор – корректор и имеет 1-ый порядок аппроксимации по времени и 2-ой по пространственным переменным. Для этой схемы на разностной сетке выполняются все те же законы сохранения и следствия из них, что и для исходной системы дифференциальных уравнений. Такая схема качественно верно передает характер решения даже на очень разреженных сетках: отсутствие дисбалансных членов не приводит к накоплению ошибки. Монотонность схемы достигается определенным способом выбора разностного аналога потоков. Этот способ является обобщением для многомерного случая способа, ранее применявшегося для одномерных уравнений, и не требует вычисления экспонент как имеющиеся аналоги. Перечисленные свойства схемы позволяют получать достаточно точные решения на разреженных пространственных сетках.

**В разделе 1.4** дано описание новой экономичной разностной схемы для двумерных нестационарных задач в рамках квазигидродинамической модели. Схема имеет все те же свойства, что и описанная в разделе 1.3 разностная схема для уравнений диффузионно – дрейфовой модели. В дополнение к которым для этой схемы на сетке точно выполняется закон сохранения энергии. Благодаря своим свойствам схема позволяет получать достаточно точные решения на грубых пространственных и временных сетках даже для гетероструктур описываемых уравнениями с резко меняющимися коэффициентами.

**В разделе 1.5** дано описание специального вида граничных условий для систем уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы в многомерном случае. Обычные граничные условия соответствуют использованию в качестве источников питания и сигнала источников напряжения. Новые граничные условия соответствуют источникам тока или источникам тока и источникам напряжения одновременно. Предложен новый безытерационный метод задания таких смешанных граничных условий. Метод позволяет легко рассчитывать  $S$  – образные характеристики полупроводниковых приборов, а также включать многомерные модели в расчет внешних электрических схем, содержащих как сосредоточенные, так и распределенные элементы.

**В разделе 1.6** приведена модель лавинного пробоя, применяемая в сильно неоднородных электрических полях. Идея, использованная при создании этой модели аналогична той, что применялась для

учета всплеска дрейфовой скорости в однодолинной квазигидродинамической модели. Находится связь между энергией газа носителей и электрическим полем в стационарном однородном случае. Эта связь используется в коэффициентах ионизации и для нестационарного неоднородного случая, когда энергия найдена из общих уравнений с учетом различных нелокальных эффектов. Коэффициенты ионизации в новой модели зависят от энергии газа носителей.

**В разделе 1.7** дано описание новой аналитической модели для расчета вольт-амперных и малосигнальных высокочастотных характеристик полевого транзистора с затвором Шотки по его геометрическим размерам и электрофизическим параметрам структуры. Новая модель учитывает падения напряжения на паразитных сопротивлениях истока и стока и принимает во внимание, что длина области пространственного заряда под затвором больше длины затвора транзистора; а также аккуратно учитывает эффект края контакта Шотки, ошибка от пренебрежения которым растет с уменьшением размеров прибора. Имеется возможность восстановления некоторых параметров структуры ПТШ по его измеренным статическим характеристикам.

**В разделе 1.8** дано описание новой аналитической модели для расчета и анализа амплитудных и фазовых характеристик двухзатворного полевого транзистора с затвором Шотки (ДПТШ) по его геометрическим размерам и электрофизическим параметрам структуры. Используемый в программе метод позволяет существенно упростить расчет фазовращателей и усилителей с управляемым усилением на ДПТШ.

**В главе 2** проведено исследование физики процессов, происходящих в мощных высокочастотных полевых транзисторах в областях токов и напряжений, близких к предельно допустимым для этих приборов.

**В разделе 2.1.** приведена постановка задачи.

**В разделе 2.2.** проведено исследование особенностей лавинного пробоя затвора планарного полевого транзистора с затвором Шотки. Найдены зависимости напряжения пробоя от концентрации доноров и толщины эпитаксиальной пленки. Показано, что в ПТШ с незаглубленным затвором отрицательные заряды на ловушках могут

заметно увеличивать пробивное напряжение, однако максимальная полезная мощность транзистора при этом уменьшается.

**В разделе 2.3.** показано, что в  $n-i-n$  структуре лавинно-пролетная неустойчивость приводит к снижению пробивного напряжения слоистых полупроводниковых структур.

**В разделе 2.4.** исследован механизм отрицательной дифференциальной проводимости и изотермического пробоя стока арсенидгаллиевых полевых транзисторов с барьером Шотки. Показано, что механизм образования ОДП на ВАХ GaAs ПТШ имеет лавинно-инжекционную природу, которая проявляется в модуляции проводимости, перестройке электрического поля транзистора и взаимном усилении потоков дырок, инжектированных из области ударной ионизации у стока, и электронов, инжектированных из истокового  $n+$  контакта. Механизм внезапного выгорания GaAs ПТШ при некотором критическом значении напряжения исток—сток объяснён быстрым (менее 1 нс) установлением ВАХ с областью ОДП, последующим, управляемым стоковой нагрузкой, переключением транзистора в состояние с высокой проводимостью. В этом состоянии в полуизолирующей подложке транзистора образуются токовые шнуры шириной порядка 10 мкм и высокой плотностью тока. В этих шнурах благодаря джоулеву разогреву и происходит локальное проплавление структуры ПТШ (рис.1).

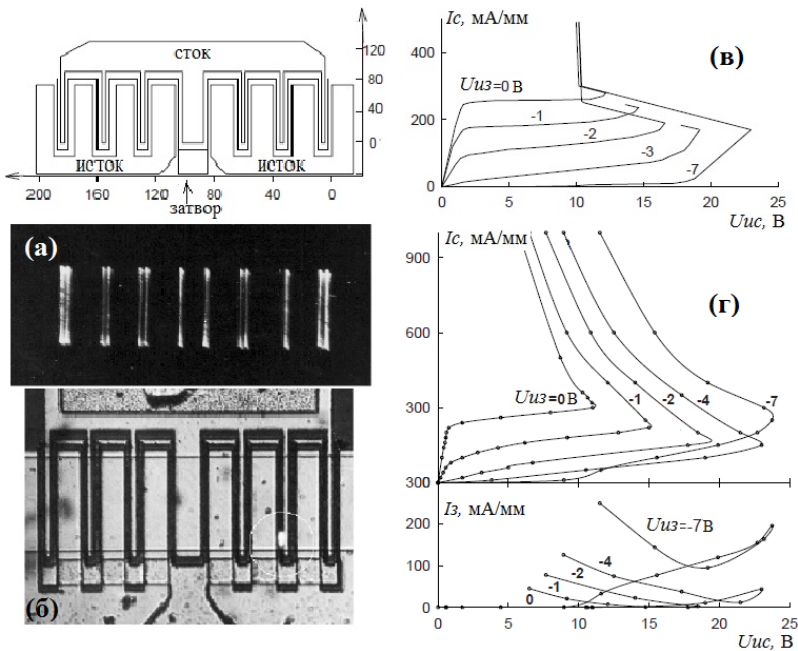


Рис.1. Свечение испускаемое активной областью транзистора до перехода (а) и после перехода (б) в состояние со шнуром, а также измеренные (в) и рассчитанные с учетом лавинно – инжекционной неустойчивости (г) ВАХ ПТШ АР640. Все измерения сделаны с помощью 20-нс импульсов.

**В разделе 2.5.** объяснена аномальная зависимость напряжения пробоя затвор-сток от потенциала затвора в субмикронных полевых транзисторах с затвором Шотки. Показано, что за резкое увеличение тока затвора, принимаемое за лавинный пробой, отвечает лавинная инжекция, зависимость напряжения срыва которой от потенциала затвора соответствует экспериментальной.

**В разделе 2.6.** исследованы физические механизмы, ограничивающих максимальную мощность и эффективность полевых транзисторов с барьером Шотки. Показано, что в ПТШ максимум КПД достигается сразу после начала лавинного пробоя затвора в отличие от максимума мощности. Последний достигается после возникновения лавинно-инжекционной неустойчивости. Варьируя величинами активной выходной нагрузки и напряжений питания, можно настроить

транзистор, как на максимум выходной мощности, так и на максимум КПД.

**В главе 3** проведена оптимизация характеристик и оценка перспективности новых конструкций мощных высокочастотных полевых транзисторов.

**В разделе 3.1.** дано описание методики проектирования полевых транзисторов для усилителей мощности. Методика позволяет по заданной рабочей частоте и СВЧ мощности найти близкие к оптимальным концентрацию доноров и толщину активного слоя транзистора, длины электродов истока, затвора, стока и межэлектродных промежутков, ширину и количество единичных транзисторов в усилительной ячейке, количество ячеек, а также толщину подложки для обеспечения достаточного отвода тепла.

**В разделе 3.2.** дана оценка перспективности полевого транзистора с комбинированной структурой (ПТШ КС). Показано, что рост максимальной частоты генерации  $f_{\max}$  может быть достигнут путем создания ПТШ КС с длиной истока меньшей длины затвора, либо работой в режиме когда обедненный слой затвора не касается противоположащего ему истока, где  $f_{\max}$  в ПТШ КС в среднем в 1,5 раза выше, чем в ПТШ с планарной структурой, однако велик и шум, связанный с доменом сильного поля. Показано, что при длине истока равной половине длины затвора можно получить от ПТШ КС примерно в два раза большую мощность, чем от обычного ПТШ. При сопоставимых длинах затвора и истока выходная, мощность резко падает из-за быстрого роста напряжения перекрытия.

**В разделе 3.3.** исследовано влияние качества подложки на характеристики субмикронных полевых транзисторов. Показано, что уменьшение проводимости подложки ПТШ за счет введения компенсирующих друг друга донорной и акцепторной примесей приводит к ухудшению высокочастотных характеристик транзистора, т. к. при этом увеличивается среднее пролетное время. Уменьшать ток утечки можно увеличивая барьер пленка – подложка с помощью гетероструктурных материалов.

**В разделе 3.4.** предложена конструкция подложки гетероструктурных полевых транзисторов, увеличивающая напряжение пробоя открытого канала. Показано, что введение слоя узкозонного материа-

ла на границу между активным слоем и подложкой ПТШ создает потенциальную яму на дне зоны проводимости, увеличивающую в ней скорость рекомбинации носителей и, тем самым, увеличивающие напряжение срыва лавинно – инжекционной неустойчивости, определяющей напряжение пробоя открытого канала.

**В разделе 3.5.** проанализированы возможные пути увеличения мощности гетероструктурного полевого транзистора с высокой подвижностью. Показано, что из-за особенностей лавинной инжекции в полевых транзисторах с высокой подвижностью (НЕМТ) лавинно – инжекционная неустойчивость подавлена и не приводит к появлению S – образных ВАХ.

Показано, что лавинная инжекция в НЕМТ приводит к появлению избыточного тока затвора, но не к потере затвором управляемости как при лавинном пробое. Найдены границы области токов и напряжений, где эти токи имеют заметную величину. Избыточный ток затвора обычно приводит к появлению нежелательного автосмещения в цепи питания и плохо контролируемому изменению класса работы усилителя, поэтому на практике стараются подобрать такие выходные нагрузки и положение рабочей точки, чтобы избежать области токов и напряжений транзистора, где эти токи возникают.

Предложено использовать в качестве канала транзистора с высокой подвижностью составную квантовую яму, содержащую тонкий квантоворазмерный слой узкозонного полупроводника с очень высокой подвижностью InAs. Показано, что максимальный ток в такой структуре увеличивается на 50-85 % за счет эффекта всплеска дрейфовой скорости, а мощность – на 40-70 % за счет того, что эффективная ширина запрещенной зоны тонкого слоя узкозонного полупроводника расширится из-за эффектов размерного квантования.

Показано, что дополнительное введение в транзистор с составной квантовой ямой слоя, поглощающего дырки и уменьшающего избыточный ток затвора, приводит к тому, что отдаваемая транзистором мощность вырастает в 3 раза.

**В заключении** сформулированы основные полученные результаты:

1. Предложена полностью консервативная монотонная разностная схема 1-го порядка аппроксимации по времени и 2-го — по простран-

ственным переменным для решения численными методами нестационарных двумерных уравнений локальной полевой модели. Впервые для получения монотонной схемы в двумерном случае применен алгоритм, ранее использовавшийся лишь для одномерных задач, не требующий многократного вычисления экспонент и экономящий вычислительные ресурсы. Перечисленные свойства схемы позволяют получать достаточно точные решения на разреженных пространственных сетках.

Обнаружено, что обычно используемая эквивалентная схема ПТШ дает в области низких (по сравнению с максимальной частотой генерации) частот неверное значение реальной части переходной проводимости  $Re(y_{12})$ .

3. Для решения численными методами нестационарных двумерных уравнений квазигидродинамической модели предложена полностью консервативная абсолютно устойчивая полуневьяная монотонная разностная схема 1-го порядка аппроксимации по времени и 2-го — по пространственным переменным. Благодаря своим свойствам схема позволяет получать достаточно точные решения на грубых пространственных и временных сетках даже для гетероструктур описываемых уравнениями с резко меняющимися коэффициентами.

4. Предложен метод, модифицирующий граничные условия, применяемые при численном решении уравнений полупроводниковой плазмы в многомерном случае. Обычные граничные условия соответствует использованию в качестве источников питания и сигнала источников напряжения. На практике часто приходится использовать источники тока или источники тока и источники напряжения одновременно. Предложен новый безытерационный метод задания таких смешанных граничных условий. Метод позволяет легко рассчитывать S – образные характеристики полупроводниковых приборов, а также включать многомерные модели в расчет внешних электрических схем, содержащих как сосредоточенные, так и распределенные элементы.

5. Создана модель лавинного пробоя, применимая в полевых транзисторах с субмикронной длиной затвора, в особенности в НЕМТ транзисторах. Показано, что верные результаты можно получить лишь заменой обычно используемой зависимости коэффициентов ударной ионизации от амплитуды электрического поля аналогичными зависимостями от температур электронного и дырочного газов.

6. Исследовано влияние различных факторов на напряжение лавинного пробоя затвора перекрытого симметричного полевого транзистора с затвором Шотки (типа FinFET) ( $U_{пр}$ ). Показано, что в ПТШ с незаглубленным затвором отрицательные заряды на ловушках могут заметно увеличивать  $U_{пр}$ , однако максимальная полезная мощность транзистора при этом уменьшается.
7. Показано, что в n-i-n структуре напряжение срыва лавинно – инжекционной неустойчивости может быть значительно ниже напряжения лавинного пробоя.
8. Показано, что после достижения некоторого критического напряжения исток—сток дифференциальная проводимость ПТШ становится отрицательной при любых потенциалах затвора. Механизм образования ОДП на ВАХ GaAs ПТШ имеет лавинно-инжекционную природу, которая проявляется в модуляции проводимости, перестройке электрического поля транзистора и взаимном усилении потоков дырок, инжектированных из области ударной ионизации у стока, и электронов, инжектированных из истокового p+ контакта.
9. Механизм внезапного выгорания GaAs ПТШ при некотором критическом значении напряжения исток—сток объяснён быстрым (менее 1 нс) установлением ВАХ с областью ОДП, последующим, управляемым стоковой нагрузкой, переключением транзистора в состояние с высокой проводимостью. В этом состоянии в полуизолирующей подложке транзистора образуются токовые шнуры шириной порядка 10 мкм и высокой плотностью тока. В этих шнурах благодаря джоулеву разогреву и происходит локальное проплавление структуры ПТШ.
10. Необычная зависимость напряжения пробоя (резкое увеличение тока затвора) затвор – сток от потенциала затвора является потому, что за это резкое увеличение тока затвора отвечает лавинная инжекция, зависимость напряжения срыва которой от потенциала затвора соответствует экспериментальной.
11. Показано, что в ПТШ максимум КПД достигается сразу после начала лавинного пробоя затвора в отличие от максимума мощности. Последний достигается после возникновения лавинно-инжекционной неустойчивости. Таким образом, варьируя величинами активной выходной нагрузки и напряжений питания, можно настроить транзистор как на максимум выходной мощности, так и на максимум КПД.



12. Создана методика проектирования мощных ПТШ, позволяющая по заданной рабочей частоте и СВЧ мощности найти близкие к оптимальным концентрацию доноров и толщину активного слоя транзистора, длины электродов истока, затвора, стока и межэлектродных промежутков, ширину и количество единичных транзисторов в усилительной ячейке, количество ячеек, а также толщину подложки для обеспечения достаточного отвода тепла.

13. Рост максимальной частоты генерации ( $f_{\max}$ ) в ПТШ с комбинированной структурой (ПТШ КС) (с противолежащим истоку затвором) может быть достигнут либо путем создания транзистора с длиной истока меньшей длины затвора, либо работой в режиме когда обедненный слой затвора не касается противолежащего ему истока, где  $f_{\max}$  в ПТШ КС в среднем в 1,5 раза выше, чем в ПТШ с планарной структурой, однако велик и шум, связанный с доменом сильного поля.

14. Показано, что выходная мощность ПТШ КС растет с уменьшением длины истока и при длине истока равной половине длины затвора можно получить от ПТШ КС примерно в два раза большую мощность, чем от обычного ПТШ. При сопоставимых длинах истока и затвора выходная, мощность резко падает из-за быстрого роста напряжения перекрытия.

15. Предложена конструкция подложки ПТШ, увеличивающая напряжение пробоя открытого канала. Показано, что введение слоя узкозонного материала в подложку ПТШ создает потенциальную яму на дне зоны проводимости, увеличивающую в ней скорость рекомбинации носителей и, тем самым, увеличивающие напряжение срыва лавинно – инжекционной неустойчивости, определяющей напряжение пробоя открытого канала.

16. Показано, что лавинная инжекция в полевых транзисторах с высокой подвижностью (НЕМТ) не приводит к появлению S – образных ВАХ, т.е. лавинно – инжекционная неустойчивость в них подавлена.

17. Показано, что лавинная инжекция в НЕМТ приводит к появлению избыточного тока затвора, но не к потере затвором управляемости как при лавинном пробое. Найдены границы области токов и напряжений, где эти токи имеют заметную величину. Избыточный ток затвора обычно приводит к появлению нежелательного автосмещения в цепи питания и плохо контролируемому изменению класса работы усилите-

ля, поэтому на практике стараются подобрать такие выходные нагрузки и положение рабочей точки, чтобы избежать области токов и напряжений транзистора, где эти токи возникают.

18. Предложено использовать в качестве канала транзистора с высокой подвижностью составную квантовую яму, содержащую тонкий квантоворазмерный слой узкозонного полупроводника с очень высокой подвижностью InAs. Показано, что максимальный ток в такой структуре увеличивается на 50-85 % за счет эффекта всплеска дрейфовой скорости, а мощность – на 40-70 % за счет того, что эффективная ширина запрещенной зоны тонкого слоя узкозонного полупроводника расширяется из-за эффектов размерного квантования.

19. Показано, что совместное использование составной квантовой ямы и слоя, поглощающего дырки приводит к трехкратному увеличению теоретической предельной отдаваемой транзистором мощности.

### **Публикации по теме диссертации Статьи в журналах из перечня ВАК РФ**

1. Я.Б. Мартынов «Двумерная численная модель для расчета статических и высокочастотных характеристик полевого транзистора с затвором Шотки», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 4, стр. 30-36, 1984.

2. Я.Б. Мартынов, А.С. Тагер «Численный анализ характеристик полевого транзистора с комбинированной структурой», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 7, стр. 17-23, 1984.

3. Я.Б. Мартынов «Программа расчета характеристик полевого транзистора с затвором Шотки, основанная на двумерной численной модели», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 9, стр. 70-72, 1985.

4. Я.Б. Мартынов «Экспрессная программа расчета вольт-амперных и малосигнальных высокочастотных характеристик полевого транзистора с затвором Шотки», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 8, стр. 58-61, 1987.

5. Я.Б. Мартынов «Программа расчета и анализа амплитудных и фазовых характеристик двухзатворного полевого транзистора с затвором Шотки», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 10, стр. 58-59, 1987.

6. Я.Б. Мартынов, А.С. Тагер «Особенности лавинного пробоя планарного полевого транзистора с затвором Шотки», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 7, стр. 15-21, 1988.
7. А.К. Балыко, Я.Б. Мартынов, А.С. Тагер «Проектирование автогенераторов на полевых транзисторах. Ч.I. Модель автогенератора и методика его проектирования», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 1, стр. 20-27, 1988.
8. Я.Б. Мартынов, Е.И. Голант «Полностью консервативная, абсолютно устойчивая разностная схема для решения нестационарных задач теории полупроводниковых приборов», Электронная техника, Сер. 1, Электроника СВЧ, вып. 2, 1992.
9. А.С. Тагер, В.А. Ващенко, Н.А. Козлов, Я.Б. Мартынов, В.Ф. Синкевич «Отрицательная дифференциальная проводимость и изотермический пробой стока арсенидгаллиевых полевых транзисторов с барьером Шотки», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 2(468), стр. 13-18, 1996.
10. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Исследование физических механизмов, ограничивающих максимальную мощность и эффективность полевых транзисторов с барьером Шотки», Радиотехника, №2, 2004.
11. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Модель лавинного пробоя, применимая в сильно неоднородных электрических полях», Радиотехника, 2006, №3.
12. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Объяснение аномальной зависимости напряжения пробоя затвор-сток от потенциала затвора в субмикронных полевых транзисторах с затвором Шотки», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 2(488), стр. 35-44, 2006.
13. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Аномальная зависимость напряжения пробоя затвор-сток от потенциала затвора в субмикронных полевых транзисторах», Радиотехника, №3, р.63-68, 2007.
14. Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Влияние качества подложки на характеристики субмикронных полевых транзисторов», Электронная техника, Вып.5(492), стр. 3-10, 2007.

15. Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Исследование механизмов ограничения выходной мощности полевого транзистора пробойными явлениями», Электронная техника, Сер. СВЧ техника, Вып. 3(518), стр. 92-98, 2013.

### Патенты и свидетельства

1. Авторское свидетельство 1074346 СССР Лавинно-пролетный диод / А.С. Тагер, В.П. Снегирев, Я.Б. Мартынов. Приоритет от 15.07.1982.

### Публикации в других изданиях

1. Я.Б. Мартынов, А.С. Тагер «Анализ частотных свойств полевого транзистора с противоположным затвору истоком с помощью двумерной численной модели», Тезисы докладов X Всесоюзной научной конференции «Электроника СВЧ», Минск, стр. 386, т. 2 «Твердотельная электроника СВЧ», 1983.

2. Е.И. Голант, Я.Б. Мартынов «Консервативная, абсолютно устойчивая разностная схема для двумерного нестационарного моделирования полупроводниковых приборов», Тезисы докладов, II Республиканская конференция «Математическое моделирование элементов и фрагментов БИС», Рига, стр. 31, 5-7 марта 1990.

2. Y. B. Martynov, A. S. Tager «Isothermal electric breakdown in MESFET's and MODFET's», 19'th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Stockholm, Sweden, May 21-24, 1995.

3. N. A. Kozlov, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, A. S. Tager, V. A. Vashchenko, «Simulation of the GaAs MESFET burnout», Proceedings of the 25-th European Microwave Conference, Bologna, Italy, p. 229-233, September 4-7 1995.

4. N. A. Kozlov, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, A. S. Tager, V. A. Vashchenko «Negative differential conductivity and isothermal drain breakdown of GaAs MESFET's», IEEE Transactions on Electron Devices, v. ED-43, no. 4, p. 513-518, 1996.

5. Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, A. S. Tager, V. A. Vashchenko «Current instability in GaAs n+-i-n+ structures as a limitation of the maximum drain voltage of power MESFET's», Solid State Electronics, v. 39, no. 7, p. 1027-1031, 1996.

6. Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, A. S. Tager, V. A. Vashchenko «Simulation of the gate burnout of the GaAs MESFET», *Microelectronics Reliability*, v. 36, no. 11/12, p. 1887-1890, 1996.
7. Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, A. S. Tager, V. A. Vashchenko «Electrical current instability at gate breakdown in GaAs MESFET», *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. ED-43, no. 12, p. 2080-2084, 1996.
8. V.A. Vashchenko, Y.B. Martynov, V.F. Sinkevitch «Simulation of current filaments in GaAs structures», *Proc. Int. Conf. on Compound Semiconductors*, Sankt-Petersburg, 1996.
9. V.A. Vashchenko, Y.B. Martynov and V.F. Sinkevitch « Simulation of electrical burnout of MOSFET structures», *Proceedings, 1997 21st International Conference on Microelectronics*, v.2, DOI: 10.1109/ICMEL.1997.632870, p. 467-470.
10. V.A. Vashchenko, Y.B. Martynov and V.F. Sinkevitch « Microplasma and uniform MESFET gate breakdown», *Proceedings, 1997 21st International Conference on Microelectronics*, v.2, DOI: 10.1109/ICMEL.1997.632887, p. 497-500.
11. Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, V. A. Vashchenko «Physical limitation on drain voltage of power PM HEMT», *Microelectronics Reliability*, v. 37, no. 7, p. 1137-1141, 1997.
12. Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, V. A. Vashchenko «Simulation of multiple filaments in GaAs structures», *Solid State Electronics*, v. 41, no. 1, p. 75-80, 1997.
13. V. A. Vashchenko, V. F. Sinkevitch, Y. B. Martynov «Electrical instability and filamentation in GG MOS protection structures», *Solid State Electronics*, v. 41, no. 11, p. 1761-1767, 1997.
14. V. A. Vashchenko, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch «Simulation of avalanche injection filamentation in MOSFET's and IGBT's», *Proceedings of the 27th European Solid-State Device Research Conference Stuttgart, Germany, 22 -24 September, 1997*, (<http://www.thierry-lequeu.fr/data/ESSDERC/1997/default.htm>).
15. V. A. Vashchenko, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch « Microplasma and Uniform Gate Breakdown in MESFETs», *Proceedings of the 27th Eu-*

ropean Solid-State Device Research Conference Stuttgart, Gemany, 22 -24 September, 1997,  
(<http://www.thierry-lequeu.fr/data/ESSDERC/1997/default.htm>).

16. V. A. Vashchenko, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch « Gate burnout of small signal MODFET'S at TLP stress», В сборнике: 1997 Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, sponsors: IEEE; editors: Anon. Santa Clara, CA, USA, p. 13-17, 1997.

17. V. A. Vashchenko, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch «Electrical filamentation in GGMOS protection structures», В сборнике: 1997 Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium, sponsors: IEEE; editors: Anon. Santa Clara, CA, USA, p. 330-336, 1997.

18. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Исследование физических механизмов, ограничивающих максимальную мощность и эффективность полевых транзисторов с барьером Шотки», Материалы 13-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2003), 8-12 сентября 2003 года, Севастополь, Крым, Украина. стр.212-213.

19. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова. «Лавинно-инжекционная неустойчивость и малые пробивные напряжения слоистых полупроводниковых структур», Материалы 14-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2004), 13-17 сентября 2004 года, Севастополь, Крым, Украина. стр.166-167.

20. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Новая модель лавинного пробоя, применимая в сильно неоднородных электрических полях», Материалы 15-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005), 12-16 сентября 2005 года, Севастополь, Крым, Украина, т. 2, стр.478-479.

21. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Объяснение аномальной зависимости напряжения пробоя затвор-сток от потенциала затвора в субмикронных полевых транзисторах с затвором Шотки», Материалы 16-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006), 11-15 сентября 2006 года, Севастополь, Крым, Украина. т. 2, стр.224-225.

22. Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Влияние качества подложки на характеристики субмикронных транзисторов», Материалы 17й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007), 10-14 сентября 2007 года, Севастополь, Крым, Украина, стр.121-122.
23. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Модель лавинного пробоя, применимая в сильно неоднородных электрических полях» // «Электронные устройства СВЧ» И.В. Лебедев (ред.), т. 1, стр.664-670, Радиотехника, Москва 2008.
24. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Физические механизмы, ограничивающие максимальную мощность и эффективность полевых транзисторов с затвором Шотки» // «Электронные устройства СВЧ» И.В. Лебедев (ред.), т. 2, стр.687-692, Радиотехника, Москва 2008.
25. Е.В. Бувайлик, Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Аномальная зависимость напряжения пробоя затвор-сток от потенциала затвора в субмикронных полевых транзисторах» // «Электронные устройства СВЧ» И.В. Лебедев (ред.), т. 2, стр.693-702, Радиотехника, Москва 2008.
26. Я.Б. Мартынов, Э.В. Погорелова «Конструкция подложки гетероструктурных полевых транзисторов, увеличивающая напряженность пробоя открытого канала», Материалы 19-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009), 14-18 сентября 2009 года, Севастополь, Крым, Украина, т. 1, стр.127-128.
27. Я.Б. Мартынов, А.Б. Пашковский, Э.В. Погорелова «Лавинная инжекция в мощных полевых транзисторах», Материалы XII научнотехнической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 24-25 октября 2013, Москва, стр.182-184.
28. Я.Б. Мартынов, А.Б. Пашковский, Э.В. Погорелова, «Особенности вольт-амперной характеристики гетероструктурного полевого транзистора с тонким InAs слоем», 23-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013), Севастополь, 8—13 сентября 2013г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 118-119, 2013.

Подписано в печать 28.12.13  
Формат 60x80/16. Объём 1 усл.- печ. лист.  
Тираж 100 экз. ризограф ОАО «Исток Аудио Интернэшнл»