

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Савинова Сергея Александровича «Резонансное туннелирование и процессы усиления и выпрямления терагерцевых волн в наноструктурах с квантовыми ямами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа С. А. Савинова посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию высокочастотных свойств резонансно-туннельных диодных (РТД) структур с квантовыми ямами. Благодаря чрезвычайно малой инерционности внутренних переходных процессов и существенно нелинейной вольтамперной характеристики (ВАХ), данные объекты рассматриваются в качестве перспективных твердотельных элементов микро- и оптоэлектроники сверхвысокого быстродействия. Особое внимание уделяется гетероструктурам типа InGaAs/AlAs, выращиваемым на подложке InP, характеризующимся большей по сравнению с GaAs/AlAs подвижностью носителей заряда, подавлением процессов рассеяния в барьерах и, соответственно, более высоким соотношением «пик-долина» в ВАХ. К настоящему времени лучшие генераторы на основе РТД дают излучение в области 1-1.5 ТГц с выходной мощностью порядка 1-10 мкВт. С точки зрения детектирования вызывают интерес асимметричные РТД структуры, в том числе с несколькими квантовыми ямами, потенциально обладающие существенно нелинейной ВАХ при нулевом смещении. Однако, обнаруживаемая в экспериментах низкая эффективность активных РТД-элементов обусловлена как целым рядом фундаментальных трудностей, связанных с уменьшением длины волны излучения, так и отсутствием физико-математической модели, удовлетворительно описывающей динамические свойства РТД структур и позволяющей определять оптимальную конфигурацию и электрофизические параметры выращиваемых РТД, эффективных в диапазоне суб-ТГц и ТГц частот. Поставленные в работе задачи по выявлению закономерностей токового отклика резонансно-туннельных структур различной конфигурации на внешнее СВЧ поле, решаемые как методами численного моделирования, так и с помощью экспериментального изучения процессов выпрямления, определяют актуальность темы диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертации. Обсуждаются экспериментальные работы по изучению быстродействия РТД структур, определяемого инерционностью внутренних переходных процессов, процессов генерации излучения в суб-ТГц и ТГц диапазоне частот, процессов детектирования и смещения СВЧ волн в таких структурах. Рассмотрены теоретические работы, посвященные приближенному аналитическому описанию когерентного туннелирования в модельных РТД в присутствии внешнего высокочастотного поля, в том числе с участием возбужденных электронных уровней в квантовой яме.

Во второй главе описаны технологические методы выращивания РТД гетероструктур и изготовления экспериментальных образцов (включая *in situ* измерения спектров анизотропного отражения), а также методики и результаты проводимой соискателем послеростовой диагностики качества тестовых гетероструктур на основе измерений спектров низкотемпературной фотолюминесценции и поперечного транспорта, что в итоге позволило получить РТД с резкими гетерограницами. Дана информация о структурных параметрах

исследуемых GaAs/AlAs и InGaAs/AlAs/InP РТД и топологии измерительных образцов. Приведено описание разработанной соискателем экспериментальной установки для исследования процессов выпрямления суб-ТГц излучения в изготовленных РТД.

В третьей главе представлены результаты выполненного соискателем анализа высокочастотных свойств РТД структур с использованием приближенной аналитической теории резонансного туннелирования электронов, взаимодействующих с высокочастотным полем, развитой в работах В.Ф.Елесина. Анализ проводился в модели дельта-образных барьеров, моноэнергетической инжекции носителей в яму и нулевого постоянного поля. Показано, что одной из причин низкой эффективности РТД является антисимметрия высокочастотного отклика как функции энергии инжектируемых электронов относительно положения резонансного уровня. Показано, что в двухъямных РТД со сдвинутыми друг относительно друга квантовыми ямами при энергии квантов внешнего поля, равной расстоянию между уровнями, антисимметрия нарушается. Кроме того, в двухъямных РТД при такой конфигурации обнаружен эффект энергетической фильтрации туннелирующих электронов, который приводит к принципиальной возможности узкополосного усиления/генерации электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне.

В четвертой главе представлены оригинальные результаты теоретического исследования особенностей резонансного туннелирования и высокочастотных свойств одноямных и двухъямных РТД структур с конечной шириной и высотой барьеров, выполненного в рамках более строгой теории с учетом фермиевского распределения электронов в эмиттере и коллекторе и приложенного к структуре постоянного напряжения. Исследования проведены на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера. Показано, что высокочастотный отклик в оптимальных одноямных РТД с предельно узкими барьерами во всем частотном диапазоне определяется классическим механизмом. Показано, что в случае двухъямных РТД возникает возможность реализации узкополосного усиления с плавной перестройкой резонансной частоты в широком диапазоне ТГц частот посредством варьирования постоянного напряжения.

Пятая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов выпрямления суб-ТГц и ТГц волн в одноямных и двухъямных РТД структурах. Показано, что величина изменения стационарного тока в РТД под воздействием слабого СВЧ (111 ГГц и 222 ГГц) излучения пропорциональна второй производной тока по напряжению. В более интенсивных СВЧ полях возникает «эффект насыщения», обусловленный вкладом в процессы выпрямления области ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью. По данным измерений оценено быстроедействие изготовленных РТД и показано, что времена переходных процессов не превышают 1 пс. Теоретически показана возможность эффективного детектирования суб-ТГц и ТГц излучения в асимметричных двухъямных РТД при нулевом смещении, в оптимальном случае превосходящего по чувствительности детектирование в асимметричных одноямных РТД.

К содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. В главе 2 при описании методик диагностики качества эпитаксиальных слоёв обсуждается спектр фотолюминесценции, измеренный для гетероструктуры с толщиной барьеров 200 и 1000 Å, тогда как толщина барьеров исследуемых РТД составляет ~20Å. Автору следовало бы пояснить отсутствие результатов подобных измерений для исследуемых структур.

2. В главе 3 при проведении исследований высокочастотного отклика (1) как функции параметров модели автор применяет метод построения большого числа графиков. Возможно, вместо графического анализа автору следовало бы применить более точные аналитические методы анализа функции многих переменных.
3. В главе 4 отсутствует обоснование применимости стационарных граничных условий (8) и (9) для решения нестационарной задачи.
4. Рассматриваемая в главе 4 модель РТД структур не учитывает эффект накопления пространственного заряда в квантовой(ый) яме(ах). Было бы полезно привести оценку его влияния на распределение электрического поля в структуре.

Сделанные замечания не снижают научной ценности и общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертация С.А. Савинова является законченным научным трудом, выполненным на высоком научном уровне. Результаты проведенных автором исследований являются новыми и представляют значительный интерес как в научном отношении, так и с практической точки зрения. Основные результаты работы своевременно опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, и неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Диссертационная работа С.А. Савинова полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
Доцент кафедры квантовой физики и наноэлектроники
факультета электроники и компьютерных технологий МИЭТ,
кандидат физ.-мат. наук,

/ М. Н. Журавлев /

12.03.2015

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, дом 5.

Тел.: (499) 710-86-65

E-mail: maxim@org.miet.ru

Подпись М.Н. Журавлева удостоверяю.

Начальник ОК МИЭТ



/ С.В. Заболотный /

Список публикаций официального оппонента Максима Николаевича Журавлева за последние 5 лет по теме диссертации С.А. Савинова «Резонансное туннелирование и процессы усиления и выпрямления терагерцевых волн в наноструктурах с квантовыми ямами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

1. А.Ф. Попков, М.Н. Журавлёв, Физические основы магнетизма и спинowego транспорта в устройствах магнитной электроники / – М.: МИЭТ, 2014 – 260 с.
2. В.И. Егоркин, Э.А. Ильичёв, М.Н. Журавлёв, С.Б. Бурзин, С.С. Шмелёв, Туннелирование через двухбарьерную туннельно-резонансную гетероструктуру на основе GaN/AlN / Известия вузов. Электроника – 2013 – № 5 (103) – с. 65-69.
3. В.И. Егоркин, М.Н. Журавлев, В.В. Капаев, К.А. Царик, С.Б. Бурзин, Д.М. Красовицкий, Э.А.Ильичев, Особенности туннельно-резонансных диодов на основе гетероструктур нитрида галлия / Сборник тезисов докладов 8-ой всероссийской конференции «Нитриды галлия, алюминия, индия – структуры и приборы», Санкт-Петербург, 2011 – 26–28 мая – с. 139-140.
4. В.И. Егоркин, М.Н. Журавлёв, В.В. Капаев, Моделирование электронного транспорта в туннельно-резонансных гетероструктурах GaN/AlGaN / Известия вузов. Электроника – 2011 – № 2 (88) – с. 3-8.
5. Егоркин В.И., Капаев В.В., Царик К.А., Шмелёв С.С., Журавлёв М.Н., Моделирование электронного транспорта в туннельно-резонансных гетероструктурах на основе широкозонных соединений нитрида галлия / Сборник материалов 20-ой международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2010 – 13–17 сентября – т. 2 – с 861-862.