

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет» («ПГТУ»)

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры**

424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3, тел. (8362) 45-53-44,
Исх. № 01-2372 от 8.09 2014 г.

В диссертационный Совет Д 212.141.18
Московского государственного технического
университета им. Н.Э. Баумана
Ученому секретарю
д.т.н., профессору Цветкову Ю.Б.

ОТЗЫВ

официального оппонента Сушенцова Н.И. на диссертационную работу Макеева Мстислава Олеговича, выполненную на тему: «Разработка конструкторско-технологических методов и средств повышения надёжности смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов» и представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.11.14 «Технология приборостроения» и 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Актуальность темы диссертационного исследования

Смесители радиосигналов на резонансно-туннельных диодах (РТД), обладающие улучшенными техническими характеристиками, представляются безусловно перспективными для широкого использования в технических системах связи СВЧ диапазона, в особенности в информационных РЭС авиационного и космического базирования. Исходя из

того, что цена отказа для данных систем велика, особое значение приобретает надежность функционирования смесителей радиосигналов на РТД.

Рецензируемая диссертация направлена на решение проблемы повышения надежности смесителей радиосигналов на РТД путем разработки комплекса конструкторско-технологических методов и средств. В связи с этим надо признать, что сфера выполненных автором исследований актуальна для технологии производства информационных РЭС, так как конструкторско-технологическое обеспечение высокой надежности смесителей радиосигналов является ключевой проблемой их эффективного применения в авиационной и космической отраслях промышленности.

Научная новизна полученных результатов диссертационной работы

Основным научным результатом диссертации следует считать разработку комплекса методик технической диагностики РТД. Данный комплекс включает в себя методику диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур с использованием метода ИК-спектральной эллипсометрии и методику оценки изменения вольт-амперных характеристик РТД под действием деградиационных процессов в его структуре, и позволяет оценить качество изготовления РТД на основе AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур.

С использованием данных методик были определены численные характеристики основных деградиационных процессов, происходящих в структуре смесителей на основе РТД, коими являются активационные параметры диффузии Al и Si в резонансно-туннельной структуре и приконтактных областях, а также зависимость контактного сопротивления AuGeNi омических контактов от времени и температуры.

Кроме того, важным научным результатом диссертации является разработка методики прогнозирования надежности смесителей на основе

РТД, в основу которой легла разработанная математическая модель деградационных процессов в РТД, позволяющая проводить оценку влияния дрейфа ВАХ РТД в процессе эксплуатации на выходные электрические параметры смесителя на основе РТД при различных конструкторско-технологических решениях изделия. При этом модель состоит из двух модулей: модуль расчета деградации резонансно-туннельных гетероструктур, которая определяется диффузией Al и Si, и модулем расчета деградации контактного сопротивления омических контактов, которая происходит в результате диффузионного размытия их структуры. В работе показано, что именно эти факторы оказывают доминирующее влияние на показатели надежности РТД и, как следствие, всего смесителя в целом.

Таким образом, научная новизна рецензируемой диссертации сомнений не вызывает и заслуживает положительной оценки.

Практическая ценность работы

Применение на практике разработанных автором научных положений позволило получить следующие результаты, имеющие прикладное производственное значение, полностью отвечающее цели и задачам исследования:

1. С помощью разработанного программно-расчетного комплекса dif2RTD может быть проведена оптимизация параметров резонансно-туннельных гетероструктур (толщин и химического состава) с целью улучшения надежности РТД и смесителей на их основе. Кроме того, dif2RTD позволяет учесть такие технологические особенности изготовления AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур, как температуру МЛЭ и температуру и время термических отжигов после МЛЭ и при изготовлении омических контактов; также он учитывает условия эксплуатации устройства, влияние термического отжига резонансно-туннельных гетероструктуры при ее изготовлении на

концентрацию дефектов, деградацию омических контактов при эксплуатации и деградацию резонансно-туннельной структуры в результате температурной диффузии.

2. Методика диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-спектральной эллипсометрии может применяться на этапе отработки технологии изготовления смесительных РТД для выбора режимов выращивания AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии.
3. Технологическая операция контроля качества изготовления наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-эллипсометрии позволяет обеспечивать требуемый уровень надежности РТД и смесителей на их основе;
4. Рекомендации по изменению параметров конструкции наноразмерной AlAs/GaAs резонансно-туннельной структуры направлены на повышение надёжности и снижение себестоимости смесителей радиосигналов на основе РТД.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что, рецензируемая диссертация обладает несомненной практической ценностью для технологических и конструкторских подразделений профильных приборостроительных предприятий.

Анализ и оценка содержания диссертационной работы

Структура диссертации логично построена, написана ясным, технически грамотным языком, не содержит существенных стилистических недостатков. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации и соответствуют ему. Во введении автор четко обосновывает актуальность проводимых исследований, формулирует цель и ставит

основные задачи исследования, излагает научную новизну, практическую значимость, применяемые методы исследований, а также приводит положения, вынесенные на защиту. Проанализировано современное состояние научной и технологической проработки вопросов обеспечения надежности при производстве смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов, тенденции развития радиоэлектронных средств связи и перспективность применения РТД в нелинейных преобразователях радиосигналов. Раскрыты закономерности формирования постепенных отказов смесителей радиосигналов на основе РТД, в основе которых лежат деградиационные процессы в структуре РТД: диффузия Al и Si в резонансно-туннельных гетероструктурах и диффузионное размытие структуры омических контактов. Определено, что диффузионные процессы в наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных структурах и AuGeNi омических контактах оказывают существенное влияние на изменение формы ВАХ РТД, выходные электрические параметры и, соответственно, надежность смесителей радиосигналов. Проведено исследование влияния технологического процесса изготовления на модификацию свойств резонансно-туннельных гетероструктур и омических контактов смесительных РТД: определены численные характеристики основных деградиационных процессов – активационные параметры диффузии Al и Si в резонансно-туннельных структурах и приконтактных областях, а также зависимость сопротивления AuGeNi омических контактов от времени и температуры. На основе этого были разработаны методики технической диагностики: методика диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-спектральной эллипсометрии и методика оценки изменения ВАХ РТД под действием деградиационных процессов в его структуре, а также методика прогнозирования надежности смесителей радиосигналов на основе РТД. Это позволило разработать конструкторско-технологические методы и средства повышения надежности

смесителей радиосигналов на основе РТД на различных этапах технологического цикла изготовления смесителей радиосигналов.

Апробация результатов диссертационной работы

Содержание работы обсуждалось на одиннадцати научно-технических конференциях, восемь из которых имеют статус международных, а также на научных семинарах кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Работа прошла апробацию как в производственных условиях, так и в учебном процессе. Это подтверждается прилагаемыми к работе актами о внедрении ее результатов в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Наноинженерия» МГТУ им. Н.Э. Баумана и в организациях ФГУП ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, НИИ РЛ и УИЦ НТ НМСТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты могут быть использованы на предприятиях радиоэлектронного и космического профиля, таких как: ОАО "Концерн ПВО "Алмаз-Антей", ОАО «Концерн «Радиотехнические и информационные системы», ОАО "Концерн "Созвездие", ОАО "Ижевский радиозавод", ОАО "Новосибирский электровакуумный завод-Союз" и других.

Замечания по работе

1. Программно-расчетный комплекс dif2RTD рассчитывает ВАХ РТД на основе метода Цу-Есаки, что является приближенным расчетом.
2. Экспериментальные исследования оценки влияния технологического процесса МЛЭ на модификацию свойств резонансно-туннельной гетероструктуры проведены для малого числа (всего 2-х) образцов.

3. Методика диагностики качества резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-спектральной эллипсометрии является разрушающей, что позволяет проводить только выборочный контроль.

Вышеизложенные замечания не влияют на общую положительную оценку достаточно высокого научно-технического уровня рецензируемой диссертации.

Диссертация хорошо оформлена и написана технически грамотным языком. Серьезных претензий к ее оформлению не имеются.

Заключение

Диссертация Макеева Мстислава Олеговича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, позволяющую решить актуальную задачу обеспечения надежности смесителей на основе резонансно-туннельных диодов. Разработанные автором конструкторско-технологические методы и средства для решения этой задачи имеют существенное значение для развития технологии приборостроения, в частности при изготовлении высоконадежных радиоэлектронных средств СВЧ диапазона.

Работа содержит ряд новых научных положений, практически значимые методики оценки качества AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур и РТД на их основе, конструкторско-технологические рекомендации, а также обладает внутренним единством. Автореферат и основные труды Макеева М.О. соответствуют теме диссертации и достаточно полно отражают ее содержание.

На основании вышеизложенного считаю, что работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Макеев М.О. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по

специальностям 05.11.14 – «Технология приборостроения» и 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Официальный оппонент, к.т.н.,
доцент, заведующий кафедрой
конструирования и производства
радиоэлектронной аппаратуры
ФГБОУ ВПО «ПГТУ»

Адрес: 424000, Республика Марий Эл,
г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Тел. (8362) 45-53-44

Email: sushentsovni@volgatech.net



Сушенцов Николай Иванович

Подпись к.т.н., доцента Сушенцова Н.И. заверяю

ЗАВЕРЯЮ:
Начальник управления кадров и
информационной безопасности
Поволжского государственного
технологического университета

специалист по кадрам
Э. А. Моралова Э. Ю.
08.09.2014