



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
и инновациям ТУСУР

Ю.И.н., профессор

Мещеряков Р.В.

12» сентября 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Диссертация «Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе» выполнена на кафедре Физической электроники ТУСУР.

В период подготовки диссертации соискатель Юнусов Игорь Владимирович работал в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» в НИИ систем электросвязи в должности инженера.

В 2010 году окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники с присвоением степени магистра техники и технологии по направлению «Электроника и микроэлектроника».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Кагадей Валерий Алексеевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, профессор; Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», первый заместитель генерального директора по стратегическому развитию и науке.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Юнусова Игоря Владимировича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследования, разработки и создания GaAs низкобарьерных диодов на основе гомо- и гетероэпитаксиальных структур, их нелинейной СВЧ модели, а также технологии изготовления дискретных низкобарьерных диодов и МИС на их основе.

Результаты, полученные в ходе исследования, имеют существенный практический интерес для предприятий, занимающихся разработкой и производством современных СВЧ монолитных интегральных схем.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что развитие техники сверхвысоких и крайне высоких частот (СВЧ и КВЧ) связано с потребностью в обработке постоянно усложняющихся радиосигналов и с расширением рабочего диапазона частот создаваемой аппаратуры. Это приводит к закономерному росту требований, предъявляемых к контрольно-измерительной аппаратуре СВЧ и КВЧ, и, в частности, к измерителям мощности сигналов. Сверхширокополосные быстродействующие СВЧ и КВЧ измерители мощности с широким динамическим диапазоном обычно выполняются с использованием детекторного GaAs низкобарьерного диода на основе полупроводниковых переходов (НДПП). Существующая конструкция GaAs НДПП на основе гомоэпитаксиальной структуры не претерпела принципиальных изменений с 1980-х годов и имеет недостатки, влияющие на эффективность работы НДПП в составе измерителей мощности СВЧ сигнала, в частности, высокий обратный ток. Кроме того, расширение рабочего диапазона частот контрольно-измерительной аппаратуры до 110 ГГц требует реализации измерителей мощности с использованием детекторов мощности СВЧ в виде монолитных интегральных схем (МИС), что обеспечит повышение качества и снижение стоимости изделий, а также, в ряде случаев, саму возможность достижения заданных параметров аппаратуры.

Научная новизна исследований

Предложен способ формирования потенциального барьера в GaAs НДПП, основанный на одновременном использовании свойств *p-n* перехода и гетеропереходов InGaAs/GaAs, при реализации которого высота и ширина встроенного трапециевидного потенциального барьера в меньшей степени зависят от внешнего обратного напряжения по сравнению с потенциальным барьером треугольной формы равной высоты, характерным для НДПП на основе гомоэпитаксиальной структуры n^+ -GaAs/ p^+ -GaAs/*i*-GaAs/ n^+ -GaAs, в

результате чего НДПП характеризуется более низкой плотностью обратного тока во всем диапазоне обратного напряжения.

Предложен и реализован НДПП на основе гетероструктуры n^+ -GaAs/ n^+ -In_{0,25}GaAs/ i -In_{0,25}GaAs/ p^+ -GaAs/ i -GaAs/ n^+ -GaAs, обеспечивающей за счет снижения плотности обратного тока более высокую чувствительность диода, а также более высокую температурную стабильность выходного напряжения детектора при высоких уровнях входной СВЧ мощности по сравнению с НДПП на основе гомоэпитаксиальной структуры n^+ -GaAs/ p^+ -GaAs/ i -GaAs/ n^+ -GaAs при равных величинах высоты потенциального барьера.

Предложена уточненная модель НДПП, обладающая более высокой точностью в диапазоне частот свыше 40 ГГц, в эквивалентной схеме которой линейное сопротивление в ветвях с выпрямляющими диодами, описывающими поведение НДПП при различной полярности включения, рассматривается в виде суммы двух компонент, одна из которых описывает сопротивление i слоя для соответствующей полярности включения НДПП, вторая описывает сумму сопротивлений остальных конструктивных элементов НДПП, а емкость НДПП представляется в виде единого элемента и включена параллельно с ветвями схемы, в которые входят выпрямляющие диоды, описывающие поведение НДПП при различной полярности включения, и соответствующие сопротивления i слоя.

Предложена методика экстракции параметров эквивалентной схемы уточненной нелинейной модели НДПП из экспериментальных низкочастотных и СВЧ характеристик набора специально разработанных тестовых элементов.

Практическая значимость работы

По итогам выполнения работы разработана технология изготовления дискретных GaAs гомо- и гетероструктурных НДПП, а также МИС на их основе, предназначенная для серийного производства МИС детекторов мощности СВЧ сигнала с рабочим диапазоном частот до 110 ГГц. Создана нелинейная СВЧ модель НДПП, предназначенная для проектирования МИС, приборов и устройств в диапазоне от 0,01 до 110 ГГц. Разработаны и освоены в производстве дискретные НДПП «ZB 27» и «ZB 28», а также МИС детекторов поглощаемой и проходящей мощности «MD901»...«MD911», применяемые в серийно выпускаемой АО «НПФ «Микран» СВЧ контрольно-измерительной аппаратуре (скалярные анализаторы цепей «P2M-04», «P2M-18», «P2M-40»; измеритель мощности СВЧ сигнала «M3M-18»; детектор «D42-20»; генераторы СВЧ сигнала «Г7М-20», «Г7М-40»), что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Личное участие соискателя в получении результатов

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в получении основных научных и практических результатов. Диссертация является итогом исследований и работ, проведенных автором лично, а также совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». Исследования, результаты которых представлены в диссертации, выполнены по инициативе автора. Личный вклад автора включает анализ функционирования гомоструктурного НДПП и выявление природы его недостатков, предложение нового способа формирования потенциального барьера НДПП, предложение уточненной эквивалентной схемы НДПП и методики экстракции ее параметров, выбор методов исследования, численное моделирование полупроводниковых структур в САПР, измерение низкочастотных характеристик НДПП, численный расчет топологии МИС детектора поглощаемой мощности диапазона 0,01 до 67 ГГц, обработку и анализ результатов экспериментальных исследований. В ходе совместной деятельности с сотрудниками АО «НПФ «Микран» были выполнены оптимизация топологий МИС детекторов проходящей и поглощаемой мощности диапазона от 0,01 до 50 ГГц, измерение СВЧ параметров и детекторных характеристик МИС, разработка технологического маршрута изготовления НДПП и МИС на их основе.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных экспериментальных методик, сопоставлением результатов эксперимента с литературными данными, теоретическими оценками и результатами численного моделирования, а также практической реализацией научных положений и выводов, достигнутой при разработке конструкций и создании технологии изготовления GaAs низкобарьерных диодов и МИС на их основе.

Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах подтверждается тем, что по результатам научно-исследовательской и деятельности Юнусова И.В. опубликовано 20 научных работ. Из них 6 работ опубликованы в научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых журналов и изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных

результатов диссертаций. Соискатель является автором 1 патента на изобретение и 4-х топологий интегральных микросхем.

Перечень публикаций соискателя по теме диссертации:

1) **Юнусов, И.В.** Сверхвысокочастотные низкобарьерные детекторные диоды на основе *p-n*-перехода / И.В. Юнусов, А.М. Ющенко, А.Ю. Плотникова, В.С. Арыков, А.С. Загородний // Изв. вузов. Физика. – 2012. – №9/2. – С. 294-297.

2) **Юнусов, И.В.** СВЧ детекторные диоды с нулевым смещением / И.В. Юнусов, А.М. Ющенко, В.С. Арыков // X научно-техническая конференция молодых специалистов «Пульсар-2011»: материалы конф. (Дубна, Россия, 12-14 окт. 2011 г.). – 2011. – С. 64-66.

3) Zagorodny, A.S. Modeling and Application of Microwave Detector Diodes / A.S. Zagorodny, A.V. Drozdov, N.N. Voronin, **I.V. Yunusov** // 14th International conference and seminar of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM-2013): Conference Proceedings (Erlagol, Russia, 01-05 July 2013). – 2013. – P. 96-99.

4) **Юнусов, И.В.** Гетеропереходные низкобарьерные GaAs-диоды с улучшенной обратной вольт-амперной характеристикой / И.В. Юнусов, В.А. Кагадей, А.Ю. Фазлеева, В.С. Арыков // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 8. – С. 1123-1127.

5) **Юнусов, И.В.** Нелинейная СВЧ модель низкобарьерного диода на основе полупроводниковых переходов / И.В. Юнусов, В.А. Кагадей, А.Ю. Фазлеева, В.С. Арыков // Микроэлектроника. – 2016. – Т. 45, № 3. – С. 208-216.

6) Доценко, В.В. Разработка и изготовление СВЧ монолитных интегральных схем на основе GaAs / В.В. Доценко, С.В. Ишуткин, Д.С. Хохол, **И.В. Юнусов** // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем «СВЧ-2012»: материалы конф. (Омск, Россия, 10-13 окт. 2012 г.). – 2012. – С. 54-64.

7) Арыков, В.С. Технологии мелкосерийного производства GaAs СВЧ монолитных интегральных схем / В.С. Арыков, Л.Э. Великовский, С.В. Ишуткин, С.В. Романенко, Е.В. Шестериков, **И.В. Юнусов** // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2013. – Том 519, №4. – С. 130–135.

8) **Юнусов, И.В.** МИС детекторов СВЧ мощности на основе GaAs низкобарьерных диодов / И.В. Юнусов, А.С. Загородний, Н.Н. Воронин, В.А. Гушин, А.Ю. Плотникова // Изв. вузов. Физика. – 2013. – №8/3.– С. 102-106.

9) **Юнусов, И.В.** Применение низкобарьерных диодов для создания МИС смесителей СВЧ / И.В. Юнусов, Д.С. Хохол, А.Ю. Плотникова // Изв. вузов. Физика. – 2013. – №8/3.– С. 132-135.

10) Загородний, А.С. Монолитные интегральные схемы детекторов мощности СВЧ сигнала на основе низкобарьерных диодов / А.С. Загородний, **И.В. Юнусов**, Н.Н. Воронин, В.А. Гушин, А.Ю. Плотникова // XII научно-техническая конференция «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», Москва: материалы конф. (Москва, 24-25 окт. 2013 г.). – 2013. – С.127-130.

11) Воронин Н.Н. МИС сверхширокополосных детекторов мощности с динамическим диапазоном 70 дБ / Н.Н. Воронин, А.С. Загородний, Г.Г. Гошин, **И.В. Юнусов**, В.А. Гушин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо' 2014): материалы конф. (Севастополь, 07-13 сент. 2014 г.). – 2014. – С. 77-78.

12) Загородний, А.С. Сверхширокополосные детекторы проходящей мощности / А.С. Загородний, Н.Н. Воронин, Г.Г. Гошин, **И.В. Юнусов**, В.А. Гушин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо' 2014): материалы конф. (Севастополь, 07-13 сент. 2014 г.). – 2014. – С. 87-88.

13) Zagorodny, A.S. Ultrawideband power detector GaAs MMIC's / A.S. Zagorodny, N.N. Voronin, **I.V. Yunusov**, V.A. Gushchin // XV International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014): Conference Proceedings (Erlagol, Russia, 30 June -4 July, 2014). – 2014. – P.164-166.

14) Zagorodny, A.S. Ultra wideband directional and unidirectional power detectors / A.S. Zagorodny, A.V. Drozdov, N.N. Voronin, **I.V. Yunusov** // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2015): Conference Proceedings (Erlagol, Russia, 29 June -3 July, 2015). – 2015. – P. 126-129.

15) Zagorodny, A. 0.01-50 GHz power detector MMICs / A. Zagorodny, **I. Yunusov**, N. Drobotun, A. Drozdov, N. Voronin // 2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS): Conference Proceedings (Lecce, Italy, 30 Nov -2 Dec, 2015). – 2015. – P. 1-4.

16) Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2014630031 «MD902» / Н.Н. Воронин, А.С. Загородний, В.А. Гушин, **И.В. Юнусов**, 2014 г.

17) Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2014630030 «MD903» / Н.Н. Воронин, А. С.Загородний, В.А. Гушин, **И.В. Юнусов**, 2014 г.

18) Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №20146300104 «MD904» / Н.Н. Воронин, А.С. Загородний, В.А. Гушин, **И.В. Юнусов**, 2014 г.

19) Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №20146300105 «MD905» / Н.Н. Воронин, А.С. Загородний, В.А. Гущин, **И.В. Юнусов**, 2014 г.

20) Полупроводниковый диод: пат. 2561779 Рос. Федерация: МПК H01L 29/201 H01L 29/45 H01L 29/861 / **Юнусов И.В.**, Арыков В.С., Ющенко А.М., Плотникова А.Ю.; заявитель и патентообладатель АО «НПФ «Микран». – №2014124774; заявл. 17.06.14; опубл. 05.08.15.

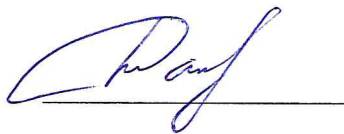
Соответствие диссертации научной специальности

Тема диссертации соответствует области исследований, посвященных разработке физических, технических и технологических основ приборов твердотельной электроники СВЧ. По своему содержанию выполненная работа соответствует специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Диссертационная работа Юнусова Игоря Владимировича «Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании кафедры физической электроники ТУСУР.

Присутствовало на заседании 11 чел., в том числе докторов наук – 3, кандидатов наук – 6. Результаты голосования: «за» – 11 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 17 от 11 сентября 2017 г.



Сахаров Юрий Владимирович
кандидат технических наук, доцент
кафедры физической электроники
ТУСУР

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

АО «НПФ «Микран»

Допенко В.В.

10 сентября 2017 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран»

Диссертация «Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе» выполнена в научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран» (АО «НПФ «Микран»).

В период подготовки диссертации соискатель Юнусов Игорь Владимирович работал в научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» АО «НПФ «Микран» в должности начальника лаборатории диодных МИС, а с 2015 года – в должности начальника конструкторско-технологического отдела СВЧ МИС.

В 2010 году окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники с присвоением степени магистра техники и технологии по направлению «Электроника и микроэлектроника».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Кагадей Валерий Алексеевич, АО «НПФ «Микран», первый заместитель генерального директора по стратегическому развитию и науке, доктор физико-математических наук, профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа Юнусова И.В. «Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе» включает результаты научно-исследовательских работ, направленных на разработку GaAs низкобарьерных диодов нового типа на основе гетероэпитаксиальных структур с улучшенным комплексом параметров, создание их нелинейной СВЧ модели, а также на разработку и внедрение технологии изготовления дискретных диодов и МИС на основе низкобарьерных диодов в производство. Результаты, полученные в ходе исследования, могут использоваться в научно-исследовательских организациях и на промышленных предприятиях, занимающихся разработкой и производством современных СВЧ монолитных интегральных схем на основе соединений АЗВ5.

Научная новизна исследований

Предложен способ формирования потенциального барьера в GaAs НДПП, основанный на одновременном использовании свойств p - n перехода и гетеропереходов InGaAs/GaAs, при реализации которого высота и ширина встроенного трапециевидного потенциального барьера в меньшей степени зависят от внешнего обратного напряжения по сравнению с потенциальным барьером треугольной формы равной высоты, характерным для НДПП на основе гомоэпитаксиальной структуры n^+ -GaAs/ p^+ -GaAs/ i -GaAs/ n^+ -GaAs, в результате чего НДПП характеризуется более низкой плотностью обратного тока во всем диапазоне обратного напряжения.

Предложен и реализован НДПП на основе гетероструктуры n^+ -GaAs/ n^+ -In_{0,25}GaAs/ i -In_{0,25}GaAs/ p^+ -GaAs/ i -GaAs/ n^+ -GaAs, обеспечивающей за счет снижения плотности обратного тока более высокую чувствительность диода, а также более высокую температурную стабильность выходного напряжения детектора при высоких уровнях входной СВЧ мощности по сравнению с НДПП на основе гомоэпитаксиальной структуры n^+ -GaAs/ p^+ -GaAs/ i -GaAs/ n^+ -

GaAs при равных величинах высоты потенциального барьера.

Предложена уточненная модель НДПП, обладающая более высокой точностью в диапазоне частот свыше 40 ГГц, в эквивалентной схеме которой линейное сопротивление в ветвях с выпрямляющими диодами, описывающими поведение НДПП при различной полярности включения, рассматривается в виде суммы двух компонент, одна из которых описывает сопротивление i слоя для соответствующей полярности включения НДПП, вторая описывает сумму сопротивлений остальных конструктивных элементов НДПП, а емкость НДПП представляется в виде единого элемента и включена параллельно с ветвями схемы, в которые входят выпрямляющие диоды, описывающие поведение НДПП при различной полярности включения, и соответствующие сопротивления i слоя.

Предложена методика экстракции параметров эквивалентной схемы уточненной нелинейной модели НДПП из экспериментальных низкочастотных и СВЧ характеристик набора специально разработанных тестовых элементов.

Практическая значимость работы

По итогам выполнения работы разработана технология изготовления дискретных GaAs гомо- и гетероструктурных НДПП, а также МИС на их основе, предназначенная для серийного производства МИС детекторов мощности СВЧ сигнала с рабочим диапазоном частот до 110 ГГц. Создана нелинейная СВЧ модель НДПП, предназначенная для проектирования МИС, приборов и устройств в диапазоне от 0,01 до 110 ГГц. Разработаны и освоены в производстве дискретные НДПП «ZB 27» и «ZB 28», а также МИС детекторов поглощаемой и проходящей мощности «MD901»...«MD911», применяемые в серийно выпускаемой АО «НПФ «Микран» СВЧ контрольно-измерительной аппаратуре (скалярные анализаторы цепей «P2M-04», «P2M-18», «P2M-40»; измеритель мощности СВЧ сигнала «M3M-18»; детектор

«Д42-20»; генераторы СВЧ сигнала «Г7М-20», «Г7М-40»), что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Личное участие соискателя в получении результатов

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в получении основных научных и практических результатов. Диссертация является итогом исследований и работ, проведенных автором лично, а также совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран». Исследования, результаты которых представлены в диссертации, выполнены по инициативе автора. Личный вклад автора включает анализ функционирования гомоструктурного НДПП и выявление природы его недостатков, предложение нового способа формирования потенциального барьера НДПП, предложение уточненной эквивалентной схемы НДПП и методики экстракции ее параметров, выбор методов исследования, численное моделирование полупроводниковых структур в САПР, измерение низкочастотных характеристик НДПП, численный расчет топологии МИС детектора поглощаемой мощности диапазона 0,01 до 67 ГГц, обработку и анализ результатов экспериментальных исследований. В ходе совместной деятельности с сотрудниками АО «НПФ «Микран» были выполнены оптимизация топологий МИС детекторов проходящей и поглощаемой мощности диапазона от 0,01 до 50 ГГц, измерение СВЧ параметров и детекторных характеристик МИС, разработка технологического маршрута изготовления НДПП и МИС на их основе.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных экспериментальных методик, сопоставлением результатов эксперимента с литературными данными, теоретическими оценками и результатами численного моделирования, а также практической реализацией научных положений и выводов, достигнутой при разработке конструкций и создании

технологии изготовления GaAs низкобарьерных диодов и МИС на их основе.

Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах подтверждается тем, что по результатам научно-исследовательской и деятельности Юнусова И.В. опубликовано 20 научных работ. Из них 6 работ опубликованы в научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых журналов и изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций. Соискатель является автором 1 патента на изобретение и 4-х топологий интегральных микросхем.

Диссертация соответствует специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Пометка «Для служебного пользования» не требуется.

Диссертационная работа Юнусова И.В. «Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании научно-технического совета АО «НПФ «Микран» с привлечением научных сотрудников научно-производственного комплекса «Микроэлектроника», департамента СВЧ электроники, департамента информационно-измерительных систем и департамента телекоммуникаций.

Присутствовало на заседании 23 чел., в том числе докторов наук – 2, кандидатов наук – 4. Результаты голосования: «за» – 23 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 9 от 7 сентября 2017 г.

Арыков Вадим Станиславович

кандидат технических наук,

главный конструктор НПК «Микроэлектроника» АО «НПФ «Микран»