


УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

АО НПФ «Микран»

 Парамонова В.Ю.

«16» декабря 2019 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран»

Диссертация «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями» выполнена в научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» АО НПФ «Микран».

В период подготовки диссертации соискатель Великовский Леонид Эдуардович работал в акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» в должности главного специалиста.

В 2008 году был принят на работу в НПК «Микроэлектроника» на должность главного технолога. В 1995 году окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) с присвоением квалификации инженера электронной техники по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы». В 1998 году окончил аспирантуру МИРЭА.

Научный руководитель – Сахаров Юрий Владимирович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, доктор технических наук, доцент.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### Оценка выполненной соискателем работы:

Диссертация Великовского Леонида Эдуардовича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследования и разработки СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями.

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

Актуальность диссертационной работы обусловлена существующими тенденциями

развития техники сверхвысоких частот в части разработки все более мощных и высокочастотных СВЧ транзисторов на основе нитрид галлия, что, в случае СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона, ведёт к необходимости решения проблем увеличения напряжения пробоя, подавления короткоканальных эффектов и токов утечек в буферных слоях. Для решение этих проблем используются различные технологические и конструктивные методы, связанные с формированием буферных и пассивирующих слоев в транзисторах, а также внедрением новых конструкций транзисторов и эпитаксиальных гетероструктур.

#### **Практическая значимость работы**

Показана возможность создания буферных и пассивирующих слоев для СВЧ транзисторов на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN, обеспечивающих значительное повышение напряжения пробоя и подавление короткоканальных эффектов. Транзисторы демонстрируют высокое выходное сопротивление и высокий коэффициент усиления в мм-диапазоне, что делает их пригодными для разработки СВЧ усилителей мощности.

#### **Научная новизна исследований:**

1. Предложены конструкции буферного слоя транзисторной гетероструктуры, включающие легированные железом и углеродом слои GaN, а также слои AlGaN переменного состава, позволяющие изготавливать мощные СВЧ транзисторы с затворами длиной менее 0,15 мкм и напряжением пробоя более 100 В.

2. Исследовано влияние конструкции буферного слоя транзисторной гетероструктуры на основные паразитные эффекты, возникающие в СВЧ транзисторах на основе GaN: коллапс тока, «kink» эффект и короткоканальный эффект.

3. Предложены конструкции транзисторных гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN HEMT для мм-диапазона частот.

4. Исследовано влияние влажности и температуры на основные диэлектрические покрытия СВЧ транзисторов, предложен состав пассивирующих покрытий, обеспечивающий устойчивость СВЧ транзистора к таким воздействиям внешней среды.

#### **Личное участие соискателя в получении результатов**

Автором совместно с научным руководителем и научным консультантом формулировались цели работы, обсуждались пути их достижения, а также анализировались полученные результаты. Основные экспериментальные исследования проведены непосредственно диссертантом. Работа была выполнена в рамках ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического

применения». Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 г.

### **Апробация, достоверность и обоснованность**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик и воспроизводимостью полученных результатов. Полученные результаты согласуются с опубликованными экспериментальными данными в тех областях, где таковые имеются. Результаты исследований изложены в 13 работах: в 5 статьях, входящих в Перечень ВАК РФ, в 5 публикациях в сборниках трудов Международных конференций, в 2 публикациях в сборниках трудов Российских научных конференций, в 1 свидетельстве о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 7 научных конференциях: Международной конференции IFOST 2019 (2019 г., Томск), 10-й Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» (2019 г., Москва), 10-й и 11-й всероссийских конференциях «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (2015, 2017 г., Санкт-Петербург, Москва); International Siberian Conference on Control and Communications (2017 г., Астана, Казахстан); Тринадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (2017 г., Томск); 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (2018 г., Минск, р. Беларусь).

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

1. **Velikovskii L.E.** / Ultrathin barrier InAlN/GaN heterostructures for HEMTs / A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A.Zakheim, S.O. Usov, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, P.E. Sim, O.I. Demchenko, N.Y. Kurbanova and L.E. Velikovskiy // Semiconductors, December 2018, Volume 52, Issue 14, pp 1843–1845.

2. **Великовский Л.Э.** / Особенности радиационных изменений электрических свойств InAlN/GaN HEMT / А.Г. Афонин, В.Н. Брудный, П.А. Брудный, Л.Э. Великовский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019 – Т.62, №9. – С. 106-111.

3. **Великовский Л.Э.** / Твердые растворы  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ : проблемы стабильности состава / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. // Физика и техника полупроводников, 2019, том 53, вып. 12, – С. 1733-1739.

4. **Великовский Л.Э.** / Физические свойства твердых растворов  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т.61, №6. – С. 142-147

5. **Великовский Л.Э.** / Stress-dislocation management in MOVPE of GaN on SiC

wafers / M. E. Rudinsky, E. V. Yakovlev, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, E. E. Zavarin, A. F. Tsatsulnikov // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* Volume 213, Issue 10, October 2016, Pages 2759-2763

6. **Великовский Л.Э.** / Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2019630196. Микросхема для проведения TCV тестов при производстве InAlN/GaN HEMT / Великовский Л.Э. (РФ), Сим П.Е. (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). - №2019630200; поступл.: 16.10.2019; регистр.: 24.10.2019.

7. **L.E. Velikovskiy et al.** / InAlN/GaN and AlGaIn/GaN HEMT Technologies Comparison for Microwave Applications / L.E. Velikovskiy, P.E. Sim, O.I. Demchenko, N.E. Kurbanova, I.A. Filippov, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, D.S. Arteev, M.A. Yagovkina, A.F. Tsatsulnikov // Тезисы докладов международной конференции IFOST 2019, October 14-17, 2019, Tomsk

8. **Великовский Л.Э.** / Разработки и исследования СВЧ транзисторов на основе AlGaIn/GaN и InAlN/GaN гетероструктур / Л.Э. Великовский, П.Е. Сим, О.И. Демченко, Н.Е. Курбанова, А.В. Сахаров, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, Д.А. Закгейм, А.Ф. Цацульников, Д.С. Артеев, М.А. Яговкина, А.А. Аксенов, В.В. Курикалов // 10-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ», 15 мая 2019 года, Москва

9. **Velikovskii L.E.** / Ultrathin barrier InAlN/GaN heterostructures for HEMT / A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, S.O. Usov, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, O.I. Demchenko, N.Y. Kurbanova, L.E. Velikovskiy // 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology», 18-22 June 2018. – Minsk, Belarus.

10. **Великовский Л.Э.** / Влияние конструкции полевого электрода на распределение электрического поля в СВЧ GaN HEMT / Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Тринадцатая международная научно-практическая конференция “Электронные средства и системы управления”, 29 ноября – 1 декабря 2017, Томск, ТУСУР, Ч. 1. С. 119-122.

11. **L. E. Velikovskiy** / Field-plate design optimization for high-power GaN high electron mobility transistors / N. E. Kurbanova, O. I. Demchenko, L. E. Velikovskiy, P. E. Sim // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, 29-30 June 2017

12. **Великовский Л.Э.** / Разработка мощных GaN транзисторов L,S и X диапазона / Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Тезисы докладов 11-й всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Москва. –

2017 – С. 114-115.

13. **Великовский Л.Э.** / Разработка мощных GaN транзисторов L-S-C диапазона / Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н., Шишкин Д.А., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф. // Тезисы докладов 10-й всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Санкт-Петербург: СПбПУ. – 2015 – С. 131-132.

**Соответствие диссертации научной специальности**

Диссертационная работа Великовского Леонид Эдуардовича «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

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

Присутствовало на заседании 20 чел., в том числе докторов наук – 3, кандидатов наук – 5. Результаты голосования: «за» - 17 чел., «против» - 2. чел., «воздержалось» - 1. чел., протокол № 14 от 13 декабря 2019 г.

Заместитель генерального директора по НИОКР

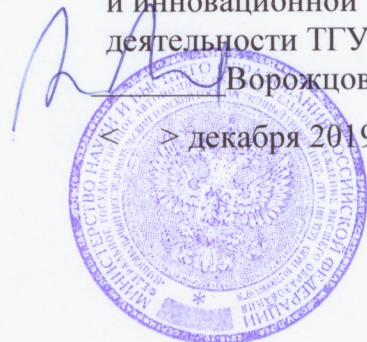
АО НПФ «Микран»

Меньшиков А.А.



УТВЕРЖДАЮ  
проректор по научной  
и инновационной  
деятельности ТГУ  
Ворожцов А.Б.

20 декабря 2019 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Диссертация Великовского Леонида Эдуардовича «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктур с легированными буферными слоями» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника» выполнялась в НОЦ «Нанoeлектроника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет» в рамках ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктуры InAlN/GaN для изделий космического применения» ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 г. Научный руководитель ПНИЭР доктор физ.-мат. наук, профессор Брудный В.Н.

По итогам обсуждения результатов работы принято следующее заключение.

### **Оценка выполненной соискателем работы**

Диссертация Л.Э. Великовского является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по разработке транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на базе полупроводниковых соединений AlN, GaN, InN предназначенной для развития СВЧ техники гигагерцового диапазона длин волн.

### **Актуальность темы и направленность исследования**

HEMT транзисторы в настоящее время широко используются в мобильной телефонии, высокоскоростной телекоммуникации, в том числе, в системах спутниковой связи поскольку такие транзисторы являются основными активными компонентами современных СВЧ устройств, в которых необходимо обеспечить усиление сигнала. Особый интерес представляют HEMT на базе соединений III-N как следствие их высоких пробивных напряжений, способности работы при высоких температурах, а также в

условиях космической среды. При этом следует отметить, что НЕМТ на базе гексагональных нитридных соединений по сравнению с кубическими полупроводниками GaAs, InAs и др., широко используемыми в настоящее время для производства НЕМТ, позволяют примерно на порядок повысить выходную удельную мощность транзистора.

Основным направлением диссертационной работы является разработка технологии создания НЕМТ на основе гетероструктур (InAlGa)N/AlN/GaN с буферными слоями, легированными примесями углерода или железа для создания высокоомной области, изолирующей двумерные электроны проводящего канала со стороны подложки.

### **Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации**

Основные результаты экспериментальных исследований, вошедшие в диссертацию, получены преимущественно автором в индивидуальных и коллективных исследованиях. Соискателем проведен анализ результатов экспериментальных исследований и выявлены основные закономерности влияния дизайна и технологии выращивания гетероструктур (InAlGa)N/AlN/GaN на параметры НЕМТ транзисторов и их эксплуатационные свойства.

### **Степень достоверности результатов проведённых исследований**

Результаты исследований получены с применением апробированных современных методов технологии и метрологии. Полученные результаты находятся в согласии с данными других авторов в тех областях, где таковые данные имеются. Сформулированные выводы являются взаимно согласованными и не содержат противоречий.

### **Новизна результатов проведённых исследований**

Работа посвящена решению проблем создания мощных СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN и GaAlN/AlN/GaN путем усовершенствования технологических и конструктивных решений.

### **Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов**

Разработана технология изготовления НЕМТ транзисторов (InAlGa)N/Al/GaN гигагерцового диапазона с высокими выходными характеристиками, выращенных на подложках сапфира и карбида кремния большого диаметра, до 100 мм. Результаты выполненных исследований будут использованы при разработке проекта технического задания на опытно-конструкторскую работу.

### **Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.**

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 5 публикаций в сборниках трудов Международных конференций, 2 публикации в сборниках трудов Российских научных конференций, 1 свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. В

опубликованных работах достаточно полно отражены основные результаты диссертационного исследования.

**Соответствие содержания диссертации избранной специальности.**

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 01.04.04 – физическая электроника, технические науки по следующим пунктам, перечисленным в структуре области исследования в паспорте специальности:

твердотельная электроника, в том числе СВЧ – электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника;

физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах, проводящих полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках, и покрытиях.

Заключение принято на заседании кафедры физики полупроводников Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Присутствовали на заседании: дфмн. Эрвье Ю.Ю., кфмн. Бобровникова И.А., проф. Брудный В.Н., дфмн. Гриняев С.Н., дфмн. Ивонин И.В., кфмн. Новиков Вад.А., кфмн. Новиков Вл.А., инж. Серикова А.К., всего 8 чел. Результаты голосования: «за» - 8, «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 5 от 19.12.2019 г.



---

Эрвье Юрий Юрьевич,  
доктор физико-математических наук,  
заведующий кафедрой физики полупроводников  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский  
государственный университет»



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ**

**УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**

**(ТУСУР)**



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе

А.Г. Лошилов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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

**Присутствовали:**

Председатель заседания – заведующий кафедрой «Физическая электроника», д.т.н.,  
профессор Троян П.Е.

Секретарь заседания – старший преподаватель кафедры «Физическая электроника»  
Каранский В.В.

Смирнов С.В., д.т.н., профессор кафедры «Физическая электроника»;

Сим П.Е., к.т.н., инженер-технолог АО «НПФ «Микран»;

Сахаров Ю.В., д.т.н., доцент кафедры «Физическая электроника»;

Демченко О.И., инженер-технолог АО «НПФ «Микран»;

Курбанова Н.Е., инженер-технолог АО «НПФ «Микран»;

Аргунов Д.П., инженер-программист, АО «НИИПП»;

Брудный В.Н., д.ф.-м.н., профессор;

Жидик Ю.С., старший преподаватель кафедры «Физическая электроника»;

Кулинич И.В., инженер-технолог АО «НПФ «Микран»;

Федин И.В., инженер-технолог АО «НПФ «Микран»;

Давыдов В.Н. д.ф.-м.н., профессор кафедры «Электронные приборы»;

Аксенов А.И., к.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы»;

Всего присутствовало 14 человек, из них по специальности рассматриваемой диссертации докторов наук - 4.

Диссертация «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями» выполнена на кафедре Физической электроники ТУСУР. В период подготовки диссертации соискатель Великовский Леонид Эдуардович работал в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» в НИИ систем электросвязи.

В 1995 году окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) с присвоением квалификации инженера электронной техники по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы». В 1998 году окончил аспирантуру МИРЭА.

Научный руководитель – Сахаров Юрий Владимирович. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, доктор технических наук, доцент.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Оценка выполненной соискателем работы:**

Диссертация Великовского Леонида Эдуардовича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследования и разработки СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями.

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

Актуальность диссертационной работы обусловлена тенденцией в развитии техники сверхвысоких частот, заключающейся в расширении частотных и мощностных диапазонов работы СВЧ транзисторов. Использование гетероструктур на основе GaN позволяет значительно увеличить мощность СВЧ транзисторов, однако для повышения рабочей частоты необходимо решать комплекс проблем связанных с увеличением электрических полей и повышением требований к пространственной локализации носителей заряда в короткоканальных приборах.

**Научная повита исследований:**

1. Выявлено влияние толщины нелегированных слоев в конструкции буферного слоя транзисторной гетероструктуры, включающей легированные железом и углеродом слои

GaN, а также слои AlGaN переменного состава, на напряжение пробоя мощных СВЧ транзисторов.

2. Показано, что приближение легированного углеродом буферного слоя GaN к двумерному электронному газу в канале AlGaN/AlN/GaN транзистора на расстояние 0,2 и менее микрон приводит созданию под каналом транзистора содержащего глубокие центры слоя, захват электронов в котором приводит к увеличению коллапса тока до 45-70% вне зависимости от толщины легированного слоя и наличия под каналом барьерного слоя AlGaN;

3. Обнаружено, что применение *in situ* пассивации нитридом кремния толщиной 5 нм позволяет снизить на порядок ток утечки затвор-сток в транзисторе на основе In-Al<sub>0,86</sub>N/AlN/GaN гетероструктур и сформировать устойчивое к воздействию температуры и влажности защитное покрытие для рабочей области транзистора. Исследовано влияние влажности и температуры на основные диэлектрические покрытия СВЧ транзисторов.

#### **Практическая значимость работы**

1. Разработаны конструкции буферных и пассивирующих слоев СВЧ НЕМТ транзисторов на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN, обеспечивающие сочетание высокого напряжения пробоя, низкого коллапса тока и плотности токов утечки.

2. Показано влияние конструктивных параметров буферного слоя на напряжение пробоя и утечку в буферных слоях, а также на коллапс тока, «kink» эффект и напряжение пробоя в транзисторе.

3. Для гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN проведен сравнительный анализ ВАХ и СВЧ характеристик, показаны зависимости СВЧ характеристик транзисторов от ключевых параметров конструкции – длины затвора и расстояния исток-сток.

4. Предложены конструкции эпитаксиальных гетероструктур In<sub>0,14</sub>Al<sub>0,86</sub>In/AlN/GaN и Al<sub>0,24</sub>Ga<sub>0,76</sub>N/AlN/GaN, включающие расположенный на расстоянии 0,5 мкм от канала легированный железом буферный слой GaN, и позволяющие получить в СВЧ НЕМТ с длиной затвора 0,15 мкм в режиме усиления класса В максимально стабильный коэффициент усиления более 10 дБ в диапазоне до 40 ГГц.

5. Исследован состав и устойчивость к температуре и влажности основных покрытий для пассивации рабочей области транзистора, предложены варианты пассивирующих слоев, обеспечивающих максимальную защиту транзисторов.

#### **Личное участие соискателя в получении результатов**

Автором совместно с научным руководителем и научным консультантом

формулировались цели работы, обсуждались пути их достижения, а также анализировались полученные результаты. Основные экспериментальные исследования проведены непосредственно диссертантом. Работа была выполнена в рамках ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения». Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 г.

**Степень достоверности полученных результатов, ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик и воспроизводимостью полученных результатов. Полученные результаты согласуются с опубликованными экспериментальными данными в тех областях, где таковые имеются. Результаты исследований изложены в 13 работах: в 5 статьях, входящих в Перечень ВАК РФ, в 5 публикациях в сборниках трудов Международных конференций, в 2 публикациях в сборниках трудов Российских научных конференций, в 1 свидетельстве о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 8 научных конференциях: Международной конференции IFOST 2019 (2019 г., Томск), 10-й Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» (2019 г., Москва), 10-й и 11-й всероссийских конференциях «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (2015, 2017 г., Санкт-Петербург, Москва); International Siberian Conference on Control and Communications (2017 г., Астана, Казахстан); Тринадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (2017 г., Томск); 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (2018 г., Минск, р. Беларусь).

**Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

1. **Velikovskii L.E.** / Ultrathin barrier InAlN/GaN heterostructures for HEMTs / A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A.Zakheim, S.O. Usov, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, P.E. Sim, O.I. Demchenko, N.Y. Kurbanova and L.E. Velikovskiy // Semiconductors, December 2018, Volume 52, Issue 14, pp 1843–1845.

2. **Великовский Л.Э.** / Особенности радиационных изменений электрических свойств InAlN/GaN HEMT / А.Г. Афонин, В.Н. Брудный, П.А. Брудный, Л.Э. Великовский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019 – Т.62, №9. – С. 106-111.

3. **Великовский Л.Э.** / Твердые растворы  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ : проблемы стабильности состава / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. // Физика и техника полупроводников, 2019, том 53, вып. 12, – С. 1733-1739.

4. **Великовский Л.Э.** / Физические свойства твердых растворов  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т.61, №6. – С. 142-147

5. **Великовский Л.Э.** / Stress-dislocation management in MOVPE of GaN on SiC wafers / M. E. Rudinsky, E. V. Yakovlev, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, E. E. Zavarin, A. F. Tsatsulnikov // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science Volume 213, Issue 10, October 2016, Pages 2759-2763

6. **Великовский Л.Э.** / Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2019630196. Микросхема для проведения TCV тестов при производстве InAlN/GaN HEMT / Великовский Л.Э. (РФ), Сим П.Е. (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). - №2019630200; поступл.: 16.10.2019; регистр.: 24.10.2019.

7. **L.E. Velikovskiy et al.** / InAlN/GaN and AlGaIn/GaN HEMT Technologies Comparison for Microwave Applications / L.E. Velikovskiy, P.E. Sim, O.I. Demchenko, N.E. Kurbanova, I.A. Filippov, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, D.S. Arteev, M.A. Yagovkina, A.F. Tsatsulnikov // Тезисы докладов международной конференции IFOST 2019, October 14-17, 2019, Tomsk

8. **Великовский Л.Э.** / Разработки и исследования СВЧ транзисторов на основе AlGaIn/GaN и InAlN/GaN гетероструктур / Л.Э. Великовский, П.Е. Сим, О.И. Демченко, Н.Е. Курбанова, А.В. Сахаров, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, Д.А. Закгейм, А.Ф. Цацульников, Д.С. Артеев, М.А. Яговкина, А.А. Аксенов, В.В. Курикалов // 10-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ», 15 мая 2019 года, Москва

9. **Velikovskii L.E.** / Ultrathin barrier InAlN/GaN heterostructures for HEMT / A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, S.O. Usov, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, O.I. Demchenko, N.Y. Kurbanova, L.E. Velikovskiy // 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology», 18-22 June 2018. – Minsk, Belarus.

10. **Великовский Л.Э.** / Влияние конструкции полевого электрода на распределение электрического поля в СВЧ GaN HEMT / Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Тринадцатая международная научно-практическая конференция “Электронные средства и системы управления”, 29 ноября – 1 декабря 2017, Томск, ТУСУР, ч. 1. С. 119-122.

11. **L. E. Velikovskiy** / Field-plate design optimization for high-power GaN high electron mobility transistors / N. E. Kurbanova, O. I. Demchenko, L. E. Velikovskiy, P. E. Sim // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana,

Kazakhstan, 29-30 June 2017

12. **Великовский Л.Э.** / Разработка мощных GaN транзисторов L,S и X диапазона / Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Тезисы докладов 11-й всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы". – Москва. – 2017 – С. 114-115.

13. **Великовский Л.Э.** / Разработка мощных GaN транзисторов L-S-C диапазона / Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н., Шишкин Д.А., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф. // Тезисы докладов 10-й всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы". – Санкт-Петербург: СПбПУ. – 2015 – С. 131-132.

### **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 Великовского Леонид Эдуардовича «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара кафедры физической электроники, с привлечением сотрудников кафедры электронных приборов ТУСУР.

Присутствовало на заседании чел., в том числе докторов наук – 5, кандидатов наук – 2. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 30 от 19 декабря 2019 г.

Председатель семинара



Троян Павел Ефимович  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой физической  
электроники ТУСУР

Секретарь семинара



Каранский Виталий  
Владиславович  
старший преподаватель кафедры физической  
электроники