

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.268.04 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» МИНОБРНАУКИ РФ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.02.2019 г, № 195

О присуждении Великовскому Леониду Эдуардовичу, гражданину РФ ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями» по специальности 01.04.04 – физическая электроника принята к защите 25 декабря 2019 г., протокол № 191, диссертационным советом Д 212.268.04, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (634050, Томск, пр. Ленина 40, приказ Минобрнауки России о создании совета № 1030/нк от 30.12.2013 г.).

Соискатель Великовский Леонид Эдуардович 1971 года рождения, в 1995 году окончил МИРЭА по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника». Обучался в аспирантуре МИРЭА с 1995 по 1998 год.

Работает ведущим инженером НИИ систем электросвязи ТУСУР.

Диссертация выполнена на кафедре физической электроники ТУСУР, НОЦ «Материалы и технологии космического применения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» (АО НПФ «Микран»).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Сахаров Юрий Владимирович.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Журавлёв Константин Сергеевич,

федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук» г. Новосибирск), лаборатория молекулярно-лучевой эпитаксии соединений A^3B^5 , заведующий лабораторией:

кандидат технических наук Егоркин Владимир Ильич, ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (г. Москва), ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанном проректором по научной работе Новосибирского государственного технического университета доктором технических наук, профессором Алексеем Геннадьевичем Вострецовым, заведующим кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники, кандидатом технических наук, доцентом Дмитрием Ивановичем Остертаком и профессором кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, доктором технических наук Александром Андреевичем Величко, указала, что диссертация Великовского Леонида Эдуардовича «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе $(InAlGa)N/AlN/GaN$ гетероструктуры с легированными буферными слоями» представляет завершенную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задач по технологии изготовления НЕМТ на базе полупроводниковых соединений группы III-N для СВЧ усилителей мощности мм-диапазона частот. Это позволяет квалифицировать представленную работу как решение задачи, имеющей существенное значение для полупроводниковой СВЧ электроники. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.04 - физическая электроника, технические науки. Работа отвечает требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ с соавторами по теме диссертации, из них 5 работы входят в перечень ВАК. Результаты исследования защищены

1 свидетельством о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов, все положительные:

1) от кандидата физико-математических наук, ведущего специалиста Карпова Сергея Юрьевича, ООО «Софт-Импакт», г. Санкт-Петербург, **замечания:** к недостаткам работы можно отнести несколько небрежное её оформление, текст содержит много технического жаргона, а подписи к рисункам не всегда полностью объясняют их содержание. Важным вопросом, который остался также вне обсуждения в диссертации – влияние легирования GaN буфера железом и углеродом на теплопроводность материала, определяющую эффективность отвода тепла от канала транзистора;

2) от кандидата химических наук, ведущего инженера Красовицкого Дмитрия Михайловича, АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург, **без замечаний;**

3) от кандидата физико-математических наук, начальника прикладной лаборатории Петрова Станислава Игоревича, ЗАО «Научное и технологическое оборудование», г. Санкт-Петербург, **замечания:** хотелось бы видеть больше результатов о влиянии буферных слоев AlGaIn различной конструкции на приборные свойства структур;

4) от кандидата технических наук, старшего научного сотрудника Щаврука Николая Васильевича, федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук, г. Москва, **замечания:**

1. В автореферате на стр. 6 указано «Оптимизация конструкции обусловлена необходимостью получения одновременно высокого напряжения пробоя, низких емкостей и сопротивлений затвор-исток и затвор-сток (C_{gs} , C_{gd} , R_d , R_s).» и исследуется пассивация на основе Al_2O_3 , SiO_2 и *in situ* Si_3N_4 при этом указанные диэлектрики имеют различную диэлектрическую проницаемость (от 4 до 10), что может влиять на C_{gs} , C_{gd} . Из автореферата явно не следует, какой из параметров определял конечную толщину пассивации.

2. В автореферате допущена описка или противоречие. Так на стр. 15 заявлено, что «...оба типа связей до воздействия температуры и влажности присутствовали в пленках в незначительном (менее 10%) количестве. Полученные данные не

позволяют считать осажденные в исследованных режимах пленки нитрида кремния устойчивыми к температурному нагреву и воздействию влаги пассивирующими покрытиями». Вместе с тем на стр. 18 в основных результатах приводится вывод, согласно которому «... использование пассивации на основе Al_2O_3 , SiO_2 и *in situ* Si_3N_4 позволяет сформировать устойчивое к температурному нагреву и воздействию влаги пассивирующее покрытие»;

5) от кандидата физико-математических наук, начальника отдела прикладных нанoeлектронных структур Занавескина Максима Леонидовича, федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, *без замечаний*.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что: д.ф.-м.н. Журавлёв К.С. является специалистом в области молекулярно-лучевой эпитаксии нитридных гетероструктур и их исследований; к.т.н. Егоркин В.И. является специалистом в области гетероструктурных СВЧ транзисторов и технологий их изготовления; ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» известен квалифицированными специалистами и работами по исследованию полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур, в том числе и на базе полупроводников группы III-V. Уровень компетентности официальных оппонентов и ведущей организации достаточен для оценки научной и практической значимости диссертационной работы Великовского Л.Э.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая научная идея использования в СВЧ транзисторах гетероструктур $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с мольной долей индия 12÷14% и AlGaN барьером переменного состава под каналом и *in situ* пассивацией Si_3N_4 , обогащающая научную концепцию конструкции гетероструктур для СВЧ транзисторов на основе InAlN/GaN ;

предложены концепция выбора конструкции гетероструктур на основе AlGaN/GaN и InAlN/GaN буферных слоев для подавления эффекта короткого канала в транзисторе; научно-обоснованная гипотеза о роли углерода в увеличении эффекта коллапса тока в транзисторах с легированным углеродом буферным слоем;

доказана возможность использования пассивированных *in situ* SiN гетероструктур InAlN/AlN/GaN с мольной долей индия 12÷14% для изготовления СВЧ транзисторов с высоким напряжением пробоя и низкими токами утечки затвора;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана роль углерода в резком увеличении эффекта коллапса тока в СВЧ транзисторах на основе GaN с легированным углеродом буферным слоем;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс современных информативных физических методов исследований, необходимых для получения данных об элементном и фазовом составе полупроводниковых гетероструктур и диэлектрических пленок, а также о спектре глубоких центров в полупроводниковых гетероструктурах;

изложены факторы и причинно-следственные связи влияния конструктивных параметров буферных слоев (легирующей примеси и профиля легирования) на напряжение пробоя в буферных слоях и коллапс тока в транзисторах;

раскрыт механизм влияния повышенной температуры и влажности на фазовый состав пленок Si₃N₄, Al₂O₃ и SiO₂, осажденных различными методами;

изучены элементные профили распределения химических элементов и химических связей в пленках Si₃N₄, Al₂O₃ и SiO₂, подвергшихся воздействию повышенной температуры и влажности;

проведена модернизация существующих представлений о возможностях снижения тока утечки и увеличении напряжения пробоя в СВЧ транзисторах на основе InAlN/AlN/GaN гетероструктур с *in situ* пассивацией Si₃N₄.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в практику технологии изготовления СВЧ транзисторов на основе гетероструктур InAlN/GaN с легированными буферными слоями, разработанные при выполнении 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, УИР REMEFI 57817X240); получено свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы;

определены оптимальные конструктивные параметры буферных слоев, первого слоя пассивации и состава гетероструктуры для НЕМТ транзисторов на базе гетероструктур AlGa_N/Ga_N и InAl_N/Ga_N;

создан научно-технологический задел для получения СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона на основе гетероструктур InAl_N/Ga_N с легированными буферными слоями с подавленным короткоканальным эффектом на вольт-амперной характеристике и высоким напряжением пробоя исток-сток;

представлены рекомендации по использованию разработанных конструкций буферных слоев и гетероструктур в производстве НЕМТ транзисторов миллиметрового диапазона.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные результаты могут быть использованы в: АО НПФ «Микран» (г. Томск), АО «НИИПП» (г. Томск), ФГБУВПО ТУСУР (г. Томск), ГУП НПП «Пульсар» (г. Москва), ФГАНУ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН (г. Москва).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методов, сертифицированного оборудования, воспроизводимостью получаемых результатов и их согласованностью, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании СВЧ транзисторов;

теория электрофизических свойств легированных буферных слоев построена на использовании известных представлений, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

идея базируется на основе современных представлений о свойствах и влиянии легированных буферных слоев, гетероструктур и пассивирующих покрытий на свойства и параметры СВЧ Ga_N транзисторов, а также на практических результатах, полученных в АО НПФ «МИКРАН»;

использованы результаты обработки статистически значимого объема экспериментальных данных, современные методики сбора и обработки экспериментальных данных;

установлено качественное и количественное совпадение полученных результатов с данными, приведенными в независимых источниках в той области исследований, где таковые имеются;

использованы современные технологические, метрологические методики и аналитическое оборудование, обеспечивающие получение достоверных результатов.

Личный вклад соискателя состоит в формулировке целей и задач исследования, формулировании научных выводов по каждой главе диссертации, а также обобщенного вывода по диссертационной работе в целом; планировании экспериментов, проведении основной части экспериментов и измерений, анализе, сопоставлении, интерпретации и обобщении полученных экспериментальных результатов; подготовке основных публикаций по теме исследования, а также в выступлении на семинарах и конференциях различных уровней.

На заседании 28.02.2019 г. диссертационный совет Д 212.268.04 принял решение присудить Великовскому Леониду Эдуардовичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Зам. председателя совета,
профессор, д.ф.-м.н.

Михайлов М.М.

Ученый секретарь совета,
профессор, д.т.н.

Акудиничев Ю.П.

