

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертации Сима Павла Евгеньевича

**«Исследование омических контактов HEMT транзисторов на основе GaN»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.04.04 - «Физическая электроника».**

Актуальность темы. Диссертация Сима П.Е. посвящена исследованию процессов формирования омических контактов для транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT), изготовленных на основе гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN и выращенных на подложках SiC, Al₂O₃ и Si методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. В настоящее время HEMT транзисторы на основе GaAs, InAs и других широко используются в системах беспроводной связи, радиолокации, спутниковом телевидении и др.. Такие транзисторы демонстрируют высокую рабочую частоту (свыше 3 ГГц), высокую выходную мощность и коэффициент полезного действия, а также компактность и надежность устройств СВЧ электроники. Однако эта технология достигла своего потолка. Перспективы разработки следующего поколения СВЧ техники связаны с прогрессом в развитии СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия (GaN). Уникальное сочетание электронных свойств GaN обеспечивает более, чем 10-кратное увеличение удельной выходной СВЧ мощности транзисторов, по сравнению транзисторами на классических соединениях A₃B₅ (арсенид галлия, фосфид индия и др.), позволяют использовать их при высоких температурах и в агрессивных средах, а также делает менее чувствительным к радиационным повреждениям. При разработке HEMT транзисторов, предъявляются высокие требования к параметрам омических контактов, которые значительно влияют на ключевые параметры и надежность транзисторов. Использовать хорошо развитую технологию создания контактов к HEMT транзисторам на основе GaAs оказались несостоятельными из-за более высокой температуры плавления GaN, большой величиной барьера Шоттки. Вышеизложенное несомненно делает **актуальной** тему представленной к защите диссертационную работу, нацеленную на разработку технологии изготовления омических контактов к HEMT транзисторам на основе перспективных AlGaIn/GaN и InAlN/GaN гетероструктур.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения со списком основных результатов и выводов, списка литературы. Общий объем диссертации 112 страниц, в

том числе 17 таблиц, 74 рисунка, список литературы из 71 наименования и копии двух авторских свидетельств на изобретения.

Во введении отражены требуемые признаки квалификационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук - цель работы, ее научная новизна, практическая значимость, актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, задачи и методы исследования, степень достоверности и апробация работы, а также научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава имеет обзорный характер, в которой рассмотрены энергетическая диаграмма HEMT транзистора, его конструктивные особенности, материалы подложек для гетероструктур, условия формирования омических контактов, включая выбор металлической композиции, способов обработки поверхности полупроводника перед металлизацией, режимы отжига контактов.

Во второй главе описана методика экспериментов, включая моделирование параметров омических контактов к HEMT транзисторам на базе гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN в программе Silvaco TSCAD, рост тестовых гетероструктур для исследований, определение режимов быстрого отжига контактов, выбор конструкции реактора для отжига тестовых структур, особенности измерения контактного сопротивления структур с высоким слоевым сопротивлением, альтернативные методы подготовки низкоомных омических контактов.

Глава третья посвящена исследованию влияния обработки поверхности полупроводника перед металлизацией на контактное сопротивление, выбору типа слоевого состава омических контактов для гетероструктур и исследованию особенностей различных металлизаций, выбору основной металлизации Ti/Al/Mo/Au и обоснованию режимов ее отжига, а также исследованию профиля элементного состава металлизаций методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии после быстрого отжига контактов.

В главе четвертой рассматриваются особенности формирования омических контактов для выбранной металлизации Ti/Al/Mo/Au на пластинах большого диаметра, до 100 мм. Рассмотрено влияние изгиба пластин при нагреве на однородность получаемого контактного сопротивления и разработка реактора для

отжига больших пластин. Представлены некоторые параметры изготовленных НЕМТ транзисторов.

Основные новые научные результаты, полученные автором, сформулированы в заключении и являются основой для трех защищаемых положений.

Научная новизна и практическая значимость исследований. В диссертации Сима П.Е. представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость, среди которых можно выделить:

- способ быстрого термического отжига омических контактов на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN, выращенных на подложках Al₂O₃, Si и SiC большого диаметра, до 100 мм, который обеспечивает высокую однородность электрических параметров омических контактов по пластине;

- основы технологии формирования омических контактов на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au с величиной контактного сопротивления 0,3 и 0,25 Ом·мм и среднеквадратичной шероховатостью поверхности контакта до 14 и 24 нм для НЕМТ транзисторов на базе гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN соответственно, выращенных на подложках SiC, Al₂O₃ и Si;

- возможности создания низкоомных омических контактов на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au с высокой устойчивостью к длительному высокотемпературному нагреву и их пригодность для разработки СВЧ усилителей мощности на базе гетероструктур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов
Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректностью постановки цели и задач исследований, использованием современных экспериментальных технологических методик и методов измерений, согласием полученных результатов и их сопоставимостью с данными других авторов, а также непротиворечивостью существующим научным представлениям. Основные результаты исследований, представленные в работе, достаточно полно отражены в 11 публикациях в периодических научных изданиях, доложены и обсуждены на российских и международных научных конференциях и семинарах.

Замечания по работе.

В таблице 1.1 указано значение уровня зарядовой нейтральности (CLN) в InN, равное 1,7 эВ, которое требует пояснения.

Нечетко определено понятие «подлегирирование» полупроводника.

Результаты моделирования омических контактов представлены схематично. Оси на рисунках 2.1 и 2.3 не обозначены, поэтому из рисунков не удастся определить область локализации двумерных электронов в InAlN/AlN/GaN структуре. Как эта рассчитанная величина согласуется с имеющимися в литературе данными? Можно результаты расчетов вольт-амперной характеристики контакта объяснить понижением высоты барьера Шоттки и/или увеличения его туннельной прозрачности?

Не обсуждается причины различия величин контактных сопротивлений к гетероструктурам InAlN/GaN и AlGaIn/GaN: диффузия галлия из слоя GaN, роль соединений TiN и AlN.

Результаты послойных рентгеновских исследований элементного состава металлических контактов указывают на значительное перемешивание металлов при выбранных режимах быстрого отжига металлизации, что может влиять на величину контактного сопротивления и поверхностную морфологию контакта.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку представленного диссертационного исследования.

Общее заключение. В целом диссертация Сима П.Е. представляет завершенное исследование, выполненное на высоком техническом уровне и объединенное общим подходом при решении поставленных задач, которое вносит значительный вклад в развитие существующих представлений об особенностях формирования омических контактов к НЕМТ транзисторам на основе A_3 -нитридных полупроводников. В результате проведенного исследования разработаны научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, вносящее существенный вклад в технологию производства СВЧ НЕМТ транзисторов. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне представленная диссертационная работа соответствует пункту 2 «Твердотельная электроника, в том числе СВЧ электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника,

оптоэлектроника, криоэлектроника» паспорта специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, научные положения и выводы.

Диссертационное исследование Сима Павла Евгеньевича «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN», представленное на соискание ученой степени кандидата технических наук, по критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов соответствует требованиям ВАК РФ, а диссертант заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

официальный оппонент,



Журавлев Константин Сергеевич

доктор физико-математических наук,

заведующий лабораторией молекулярно лучевой эпитаксии соединений A_3B_5

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН»

630090, г.Новосибирск, пр. Академика. Лаврентьева, 13,

Тел.: (383) 3304475; E-mail:zhur@isp.nsc.ru

« ».02.2019

Подпись Журавлёва К.С заверяю
ученый секретарь ИФП СО РАН
к.ф.-м.н.



С.А. Аржанникова