

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сим Павла Евгеньевича «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

### Актуальность темы диссертации

В разработке технологического процесса изготовления полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ – транзисторов) важную роль играют омические контакты. К их омическому сопротивлению, материалу самого контакта и поверхности обращенной к полупроводнику предъявляются достаточно высокие требования. Они влияют на эффективность работы транзистора в обычных условиях и, в особенности, в условиях воздействия внешних факторов: температуры и термоциклирования, радиации, механических знакопеременных нагрузок и др.. Можно заключить, что тема диссертационной работы направленная на разработку технологического процесса изготовления омических контактов транзисторов на основе GaN является актуальной.

### Содержание работы

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение и список цитируемой литературы, который состоит из 71 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, формулируется цель и задачи диссертационной работы, ее научная новизна и практическая ценность, изложены защищаемые положения и, описана структура диссертации.

**В первой главе** приводится информация по свойства полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе GaAs, InAs и др. . Сделан краткий обзор работ по проблемам связанным с разработкой омических контактов для НЕМТ транзисторов. Отмечены требования к ним рассмотрено несколько вариантов из изготовления. Обычно такая глава сопровождается обсуждением, анализом проблем по рассматриваемому вопросу и обосновывается постановка задач исследований. Рассматриваемая глава не содержит этого материала.

**Вторая глава** посвящена изложению результатов численного моделирования основных параметров омических контактов НЕМТ транзисторов на основе структур AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> и InAl<sub>n</sub>|Ga<sub>n</sub>, методике экспериментов. Представлены маршруты технологических операций. Анализируется и обосновывается выбор режимов термического отжига, выбор газовых сред, представлен метод расчета контактного сопротивления. В заключении главы сделан вывод по методике проведения исследований.

**В третьей главе** представлены результаты исследований влияния химической и плазмохимической обработки поверхности полупроводников на величину контактного сопротивления. Уделено внимание обоснованию выбора

способа их металлизации. Представлены и кратко проанализированы профили элементного содержания многослойных контактов различного состава до термического и после термического отжига. Проявляется эффект взаимной диффузии металлов этих пленок.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям формирования контактов на полупроводниковых пластинах сравнительно большого диаметра – до 100мм. Экспериментально обосновывается оптимальное значение температуры отжига, исследуется влияние состава атмосферы реактора в котором происходит отжиг на величину удельного сопротивления материала контактов. Достигнуты достаточно низкие значения удельного сопротивления. Уделено внимание формированию морфологии поверхности металлических контактов. Подтверждена очевидная связь шероховатости металлических контактов с величиной шероховатости полупроводниковых материалов.

Представлены вольт-амперные характеристики НЕМТ транзисторов. Приведены также результаты температурных испытаний контактов.

В разделе **заключение** сформулированы основные выводы по результатам выполнения диссертационного исследования.

К основным результатам диссертационной работы, имеющим **научную новизну**, можно отнести следующие:

1. Установлены закономерности формирования омических контактов, соотношения толщин пленок многослойных металлических покрытий: Ti/Al/Mo/Au с величиной контактного сопротивления исследуемых НЕМТ транзисторов.

2. При использовании заполнения гелием реактора в котором происходил отжиг многослойных омических контактов полупроводниковых гетероструктур большого диаметра (до 100мм) удается обеспечить однородный нагрев пластины и тем самым снизить разброс величин контактного сопротивления по площади пластин до 10%.

3. Обосновано понижение температуры отжига контактов на 40<sup>0</sup>С при использовании тонкого промежуточного слоя из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> между полупроводниковой пластиной и металлическим контактом.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации** обеспечиваются корректностью постановки цели и задачи исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных экспериментальных методик и аналитического оборудования. Достоверность полученных экспериментальных результатов обусловлена последовательным и корректным применением современных методов анализа морфологии, структуры, химического состава многослойных покрытий и непротиворечивостью существующим научным представлениям, а также наличием публикации в рецензируемых журналах входящих в список журналов рекомендованных ВАК РФ.

**Научная значимость и практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что результаты проведенных исследований вносят вклад в развитие отдельных вопросов научно технического обоснования технологических процессов создания транзисторов на основе GaN. Обоснованы возможности создания низкоомных омических контактов на основе многослойных металлических Ti/Al/Mo/Au покрытий.

### **Замечания по диссертационной работе**

- Не совсем обоснованным видится утверждение автора о механизме формирования соединения окиси алюминия «который всплывает на поверхность» омического контакта на основе многослойной металлической структуры Ti/Al/Mo/Au в процессе отжига. Рисунки 3.13, 3.17 показывают спадающий с поверхности концентрационный профиль кислорода после отжига. Близкий профиль имеет и алюминий. Профили соответствуют диффузионным профилям этих элементов, но не из под поверхности контакта, а наоборот с внешней поверхности контакта.

- Важным в процессе отжига является химическая чистота используемого газа при заполнении ректора, наличие в нем тех или иных примесей представляется важным. Эти данные не приведены в работе.

- В тексте диссертации содержатся ошибки в оформлении, например: удельное сопротивление, с. 19 обозначено как Ом/см, а не Ом·см, на рис 2.14 нет обозначения осей, в подписи к рис. 1.4 не содержится ссылки откуда он взят, хотя в тексте это присутствует. Названия некоторых параграфов: 1.4 «Выпрямлявший контакт», 4.4 «Испытания омических контактов...»: желательно было скорректировать.

- Обзорная глава 1 не содержит заключения по ней в котором обычно формулируется и обосновывается постановка задач исследований.

### **Заключение**

Однако эти замечания не снижают научную значимость полученных в диссертационной работе экспериментальных и теоретических результатов по закономерностям формирования и свойствам омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN.

Представленный автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Работа прошла апробацию в докладах на конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК.

Диссертационная работа Сим Павла Евгеньевича выполнена на достаточно высоком научно-методическом уровне и представляет собой завершённое научное исследование, которая вносит вклад в развитие существующих экспериментальных и теоретических представлений о методах формирования металлических контактов полупроводниковых приборов, совокупность которых можно квалифицировать как существенный вклад в область физической электроники.

Диссертация отвечает требованиям п.9. «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Сим Павел Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Официальный оппонент,  
Заведующий лабораторией № 1 Института физики высоких технологий,  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет», профессор, доктор технических наук  
Ремнев Геннадий Ефимович



12.02.2019

Адрес: 634000, Россия, г. Томск, проспект Ленина, д.2 стр.4, Института физики  
высоких технологий, Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет»

Тел.: (3822) 606405

Факс.: (3822) 606405

E-mail: remnev@tpu.ru

Подпись Г.Е.Ремнева заверяю:  
Ученый секретарь ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
Ананьева О.П.

