

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Великовского Леонида Эдуардовича «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе  $(\text{InAlGa})\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  гетероструктуры с легированными буферными слоями», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время транзисторы на основе GaN широко используются в системах беспроводной связи и радиолокации. Применение монолитных интегральных схем и транзисторов на основе GaN HEMT позволяет увеличить мощность, коэффициент полезного действия, а также компактность и надежность устройств СВЧ электроники. Проблема расширения частотного диапазона СВЧ транзисторов на основе GaN является актуальной, поскольку применение таких транзисторов в СВЧ МИС на их основе должно позволить значительно улучшить параметры устройств СВЧ диапазона, заменив устройства на основе других соединений типа  $\text{AlB}_5$ , прежде всего на основе GaAs. В повышении частотного диапазона СВЧ транзисторов на основе GaN важную роль играет конструкция гетероструктуры и состав буферных слоев. Исследования, направленные на повышение рабочей частоты мощных транзисторов на основе GaN, ведутся многими научными центрами и ведущими компаниями-производителями СВЧ компонентов, что делает актуальной тему диссертационной работы.

### Содержание работы

Диссертация включает в себя введение, три главы, заключение и список цитируемой литературы, который состоит из 195 наименований.

**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** проанализированы пути повышения рабочей частоты СВЧ транзисторов. Проведено сравнение электрофизических свойств различных материалов, используемых для создания СВЧ транзисторов. Рассмотрены основные варианты конструкций гетероструктур на основе GaN. Сделан обзор эффектов, влияющих на выбор конструкции гетероструктуры и СВЧ транзисторов на основе GaN. В выводах главы обосновывается выбор направлений исследования.

**Вторая глава** посвящена исследованию эпитаксиальных гетероструктур, используемых для создания СВЧ транзисторов. На большом фактическом материале показана зависимость напряжения пробоя от параметров конструкции буферных слоев GaN. Исследовано влияние конструкции буферных слоев на параметры транзисторов и на наблюдаемые эффекты на ВАХ, связанные с ловушками в буферных слоях. Исследованы различные варианты  $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$  и  $\text{InAlIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$  гетероструктур, предназначенных для создания СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона. Проанализировано влияние *in situ* пассивации нитридом кремния на токи утечки в затворах транзисторов, проведено исследование устойчивости к воздействию температуры и влажности, наиболее часто используемых в технологии СВЧ транзисторов диэлектрических пленок – нитрида кремния, диоксида кремния, оксида алюминия. В выводах главы сформулированы наиболее важные результаты проведенных исследований.

**В третьей главе** представлены результаты исследования импульсных ВАХ и СВЧ характеристик  $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$  и  $\text{InAlIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$  экспериментальных образцов HEMT. Продемонстрирован эффект подавления короткоканальных эффектов на ВАХ транзисторов, изготовленных с применением конструкций буферных слоев, выбранных в результате исследований главы 2. Исследовано влияние конструкции транзисторов на малосигнальные СВЧ параметры. Показано, что применение выбранных в результате исследования конструкций  $\text{InAlIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$  и  $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$  HEMT и конструкций буферных слоев

позволяет получать высокий уровень усиления по мощности в диапазоне 30-40 ГГц.

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

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

1. Показано, что использование Fe-легирования в буферных слоях мощных СВЧ транзисторов на основе GaN позволяет получить наилучшее сочетание параметров по постоянному сигналу и в импульсном режиме.
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 к созданию под каналом транзистора слоя, содержащего глубокие центры. Захват электронов в этом слое приводит к увеличению коллапса тока до 45-70% вне зависимости от толщины легированного слоя и наличия под каналом барьерного слоя AlGaN.
3. Показано, что применение *in situ* пассивации нитридом кремния толщиной 5 нм позволяет снизить на порядок ток утечки затвор-сток в транзисторе на основе In<sub>0,14</sub>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.

**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 и непротиворечивостью существующим научным представлениям, а также наличием публикаций в рецензируемых журналах, входящих в список журналов рекомендованных ВАК РФ.

**Научная и практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что полученные результаты вносят вклад в пополнение научно-технических знаний по применению новых эффективных конструкций СВЧ транзисторов на основе гетероструктур нитрида галлия в современных приборах СВЧ.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Замечание по оформлению представленных результатов. Надписи на многих рисунки оформлены так, что невозможно их прочесть. (Например рис.2.2., 2.24, 2.25. и др.).

2. На мой взгляд, неправомерно применена обработка экспериментальных результатов по методу среднего отклонения на графиках, описывающих пробивные напряжения в гетероструктурах (рис. 2.4, 2.9, 2.15, и др.), в силу малого количества экспериментальных точек, что ухудшает наглядность восприятия.

3. Присутствуют опечатки по тексту: стр.48 слоевая концентрация электронов  $2,1 \div 2,7 \text{ см}^{-3}$ , стр. 56 токи утечки ( $>1 \text{ А/мм}$ ), рис.2.18. указана концентрация Fe, в подписи С, рис.2.21. в подрисуночной надписи: концентрация электронов в гетероструктурах AlGaN/GaN с различной толщиной канала при 300°K (а) и 77°K (б) для серии образцов с Fe-легированием буферным слоем, а на рисунке представлена подвижность, на рис.2.29 представлено сравнение ВАХ AlGaN/GaN HEMT вблизи напряжения пробоя, а изначально речь идет о гетероструктурах InAlN/GaN.

4. Не приведены измерения СВЧ мощностей разработанных транзисторов.

5. Не представлены результаты моделирования по распределениям тока в предлагаемых буферных слоях гетероструктур, хотя анализ по ним присутствует.

6. В сложных буферных слоях, где предлагается легирование С и Fe, вызывает сомнение необходимость проведения легирования типа CF<sub>4</sub> структур, т.к., по моему мнению, в основном будет «работать» только легированный слой под каналом.

### Заключение

Указанные замечания не снижают научную значимость полученных в диссертационной работе экспериментальных и теоретических результатов.

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

Диссертационная работа Великовского Л.Э. выполнена на достаточно высоком научно-методическом уровне и представляет собой завершённое научное исследование, которая вносит вклад в развитие существующих представлений о связи параметров конструкции гетероструктуры и буферных слоев с параметрами СВЧ транзисторов на постоянном токе, в импульсе и СВЧ сигнале, 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 Великовский Леонид Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 - «Физическая электроника».

Официальный оппонент,



Егоркин Владимир Ильич,

кандидат технических наук

ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

124498, г.Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1,

Тел.: (499) 731-44-41, E-mail: egorkin@qdn.miee.ru

« 07 » февраля 2020 г.

Подпись Егоркина В.И. заверяю

Начальник ОК МИЭТ




Заболотный С.В.