

ОТЗЫВ
официального оппонента
о диссертации Великовского Леонида Эдуардовича
«СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN
гетероструктуры с легированными буферными слоями»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 01.04.04 - «Физическая электроника».

Актуальность темы. Перспективы разработки следующего поколения СВЧ техники связаны с прогрессом в развитии СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия (GaN). Высокое напряжение пробоя, характерное для широкозонных полупроводников, обеспечивает приборам на основе GaN большое преимущество в рабочем напряжении по сравнению с более узкозонными арсенидом галлия, фосфидом индия и кремнием. Однако высокий уровень фоновой концентрации электронов, характерный для нелегированного GaN, получаемого эпитаксиальными методами, заставляет использовать различные методы для ограничения проводимости в буферных слоях СВЧ транзисторов, в том числе легирование. Конструкции буферных слоев и технологические параметры их изготовления являются технологическими секретами компаний-производителей эпитаксиальных гетероструктур, что делает актуальными детальные исследования влияния конструкций на характеристики транзисторов. Повышение рабочей частоты СВЧ транзисторов на основе GaN также является актуальным направлением исследований и предполагает, в частности, использование гетероструктур с высоким содержанием индия (AlN/GaN, InAlN/GaN). Диссертация Великовского Л.Э. посвящена исследованию конструкций мощных СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT), изготовленных на основе гетероструктур AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN с легированными буферными слоями. Исследование направлено на поиск конструктивных решений, позволяющих расширить частотный диапазон данных типов HEMT на миллиметровый диапазон, что делает **актуальной** тему представленной к защите диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения со списком основных выводов и списка использованных источников. Общий объем диссертации 144 страниц машинописного текста, в том числе 9 таблиц, 61 рисунок, список литературы из 195 наименований.

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 пути повышения рабочей частоты и мощности СВЧ GaN HEMT. Показано, что пропорциональное уменьшение основных параметров конструкции транзистора налагает более жесткие требования на пространственную локализацию электронов в канале транзистора, что предполагает использование сложных конструкций буферного слоя. Обоснованы преимущества InAlN/AlN/GaN перед AlGaN/AlN/GaN гетероструктурами. В выводах сформулированы основные проблемы, решение которых требуется для создания СВЧ транзисторов мм-диапазона на основе GaN, а также для применения InAlN/AlN/GaN гетероструктур в СВЧ транзисторах.

Во второй главе приведены результаты исследования эпитаксиальных гетероструктур, предназначенных для создания СВЧ транзисторов. Приведены параметры гетероструктур и транзисторов для нескольких вариантов конструкций. Обоснован выбор конструкций гетероструктур на основе AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN, использованных для

исследования параметров СВЧ транзисторов. Показана зависимость напряжения пробоя от конструктивных и технологических параметров буферных слоев, изготовленных на основе нелегированного, легированного углеродом и легированного железом GaN, проанализированы их влияние на параметры транзисторов на основе GaN. Для основных типов буферных слоев GaN исследованы спектры ловушек. Исследованы ряд пассивирующих покрытий СВЧ транзисторов, показано влияние *in situ* пассивации на ток утечки в барьере Шоттки затвора AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN транзисторов. Полученные в результате исследований данные показывают связь выбранных параметров конструкции с напряжением пробоя буферного слоя, электрофизическими параметрами гетероструктур, напряжением пробоя исток-сток транзистора, эффектами короткого канала, коллапсом тока, сдвигом напряжения насыщения и «kink» эффектом.

Глава третья посвящена исследованию характеристик AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN транзисторов. Продемонстрирована возможность подавления короткоканальных эффектов с помощью выбранных конструкций буферных слоев. Исследовано влияние уменьшения расстояния исток-сток и длины затвора на малосигнальные СВЧ параметры транзисторов. Продемонстрирован высокий уровень усиления в диапазоне до 40 ГГц для обоих типов гетероструктур.

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

Научная новизна и практическая значимость исследований. В диссертации Великовского Л.Э. представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость, среди которых можно выделить:

- Выявлено влияние параметров конструкции буферных слоев на основе GaN и AlGaN/GaN с легированными углеродом и железом слоями на основные параметры гетероструктуры и транзисторов;

- Обнаружено, что *in situ* SiN с толщиной 5 нм в гетероструктуре $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ позволяет снизить ток утечки барьера Шоттки и гетероструктур с толщиной 5 нм позволяет снизить на порядок ток утечки и увеличить напряжение пробоя в барьере Шоттки;

- Показано, что использование Fe-легирования в сочетании с AlGaN барьером переменного состава под каналом транзистора позволяет достичь высокой степени пространственной локализации двумерного электронного газа в канале транзистора с длиной затвора 0,1 мкм

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 5 публикациях в периодических научных изданиях, доложены и обсуждены на 7 российских и международных научных конференциях и семинарах.

Замечания по работе. Работа в значительной мере носит описательный характер. Имеющиеся обсуждения экспериментальных результатов имеют качественный характер, не приводятся оценки, не рассматриваются возможные альтернативные объяснения. Это снижает качество анализа полученных очень интересных результатов.

В частности, не обсуждается, почему легирование железом позволяет получать более высокие напряжения пробоя, чем легирование углеродом? Чем определяется минимальное расстояние, на которое можно приближать легированный углеродом слой GaN к каналу транзистора?

Отсутствуют оценки, подтверждающие, что величина компоненты электрического

поля, вызывающего захват электронов на ловушки в буфере и коллапс тока, меньше в InAlN/AlN/GaN гетероструктурах, чем в AlGaIn/AlN/GaN гетероструктурах.

Не обсуждается, как сказывается толщина пассивирующей пленки *in situ* Si₃N₄ на эффект коллапса тока, связанный с захватом на поверхностные состояния гетероструктур?

Не обсуждается, насколько полно удалось раскрыть потенциал InAlN/AlN/GaN гетероструктур при изготовлении мм-транзисторов? Существуют возможности по дальнейшему повышению параметров транзисторов на основе таких гетероструктур?

В диссертации и автореферате много несогласованных окончаний слов. Часть рисунков в диссертации содержит мелкий шрифт, что затрудняет их восприятие. На рисунке 2.18 неверно обозначена ось (концентрация железа?), почему-то продемонстрирована концентрация атомов углерода около $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что значительно отличается от заданной при росте слоя $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Не тот график показан на рис.2.21б.

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

Общее заключение. В целом диссертация Великовского Л.Э. представляет законченное исследование, выполненное на высоком научно-техническом уровне и объединенное общим подходом при решении поставленных задач, которое вносит значительный вклад в развитие существующих представлений о влиянии конструкции буферных слоев на параметры AlGaIn/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN СВЧ транзисторов. В результате проведенного исследования разработаны научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, вносящее существенный вклад в технологию производства СВЧ 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 Великовского Леонида Эдуардовича «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями», 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

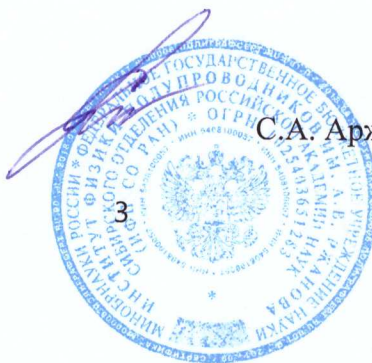
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией молекулярно лучевой эпитаксии соединений АзВ₅ Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН»

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

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

« 03 » 02 2020 г.

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



С.А. Аржанникова