

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Новосибирского государственного
технического университета,
доктор технических наук, профессор
Алексей Геннадьевич Вострецов



«12» февраля 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Великовского Леонида Эдуардовича «СВЧ транзистор миллиметрового
диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с
легированными буферными слоями», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.04.04 - Физическая электроника

Нитридные соединения группы III-N (GaN, AlN, InN) и их твердые растворы занимают лидирующее положение среди полупроводников группы III-V при разработке мощных СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT), широко используемых в радиолокации, телекоммуникации, спутниковых системах связи. При этом расширение миллиметрового диапазона рабочих частот СВЧ транзисторов и увеличение их удельной выходной мощности является одним из основных направлений исследований в данной области полупроводниковой электроники.

Актуальность темы. Диссертация Великовского Л.Э. посвящена решению проблем увеличения рабочей частоты транзистора, поддержания высокой плотности тока в коротко-канальных транзисторах за счет выбора конструкции гетероструктуры, ограничения утечек тока через буферные слои транзистора и токов утечки затвора за счет выбора пассивирующих слоев для СВЧ транзисторов на основе (InAlGa)N/AlN/GaN, выращенных на подложках 4H-SiC, Al₂O₃ и Si,

предназначенных для усилителей диапазона 30-40 ГГц. Тема работы представляется актуальной как по разработке соответствующей отечественной элементной базы СВЧ электроники, так и в плане работ по импортозамещению.

Целью работы является выявление и усовершенствование технологических и конструктивных решений, позволяющих сформировать СВЧ транзисторы на основе гетероструктур (InAlGa)/AlN/GaN для усилителей миллиметрового (мм) диапазона длин волн.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных результатов работы и списка цитируемой литературы из 195 источников, включая публикации соискателя по теме диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, обоснована новизна исследований и их практическая значимость, сформулированы защищаемые положения, представлены сведения об апробации результатов работы.

В первой главе выполнен обзор и анализ научно-технической литературы по особенностям конструкций СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона длин волн на основе нитрида галлия. Анализ научно-технической литературы показывает, что работы в направлении повышения выходной удельной мощности и частотного диапазона НЕМТ на базе гетероструктур (InAlGa)N/AlN/GaN проводятся во многих зарубежных фирмах и научных центрах.

Во второй главе приводятся результаты экспериментальных исследований конструкций гетероструктур (InAlGa)N/AlN/GaN, буферных слоев и пассивирующих покрытий, предназначенных для использования в СВЧ транзисторах миллиметрового диапазона длин волн. Рассмотрены буферные слои на основе нелегированного, легированного углеродом и легированного железом GaN. Исследовано влияние параметров конструкции на напряжение пробоя буферного слоя и на напряжение исток-сток, эффекты короткого канала, коллапса тока, сдвига напряжения насыщения и «kink» эффекта. Проведены измерения спектра ловушек и профилей легирования в НЕМТ.

Третья глава посвящена анализу характеристик СВЧ транзисторов в зависимости от метода пассивации и технологии формирования затвора СВЧ транзистора. Рассмотрено влияние параметров конструкции InAlN/AlN/GaN гетероструктуры на малосигнальные СВЧ характеристики НЕМТ. Исследовано влияние легирования железом буферного слоя на подавление короткоканального эффекта ВАХ. Проведены сравнительные исследования параметров СВЧ транзисторов на базе гетероструктур AlGaIn/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN.

Основные результаты и выводы

1. Продемонстрирована возможность получения коротко-канальных СВЧ транзисторов, на вольт-амперных характеристиках которых подавлены эффекты

короткого канала.

2. Показано, что легирование буферного слоя железом позволяет устранить токи утечки в буферном слое, ограничить величину коллапса тока, поднять напряжение пробоя исток-сток в транзисторах InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN с $L_g=0,25$ мкм и ограничить величину выходной проводимости в транзисторах с $L_g \geq 0,15$ мкм.

3. Показано, что приближение легированного углеродом слоя к проводящему каналу на расстояние ближе 0,2 мкм приводит к увеличению коллапса тока и «kink» эффекта.

4. Предложена конструкция и продемонстрирован эффект от использования барьерного слоя AlGaN с переменным составом в буферном слое, позволяющий ограничить выходную проводимость в транзисторах с $L_g < 0,15$ мкм.

5. 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 для (InAlGa)N/AlN/GaN HEMT.

6. Применение *insitu* пассивации нитридом кремния толщиной 5 нм позволяет снизить на порядок ток утечки затвор-сток в HEMT $In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN$.

7. Изготовлены InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN СВЧ HEMT с длиной затвора 0,15 мкм и с максимальным коэффициентом усиления по мощности в режиме усиления класса В более 10 дБ в диапазоне до 40 ГГц.

Научная новизна. Проведены систематические исследования методов формирования непроводящих буферных слоев для пространственной локализации двумерного электронного газа в проводящем канале транзистора, выполнен анализ спектра ростовых ловушек и связанных с ловушками эффектов коллапса тока, «kink» эффекта и эффекта сдвига напряжения. Показано, что для всех исследованных вариантов конструкции буферных слоев использование легированных углеродом слоев приводит к увеличению коллапса тока.

Проведено исследование деградации состава различных диэлектрических покрытий в результате воздействия температуры и влажности. Обнаружено изменение химических связей кремния в пленках нитрида кремния, осажденных методами стимулированного плазмой низкотемпературного осаждения, заключающееся в резком увеличении количества связей Si-Она поверхности и связей Si-Si в глубине пленки нитрида кремния. Показано, что использование осажденного *in situ* нитрида кремния позволяет снизить утечки тока в затворах InAlN/AlN/GaN транзисторов.

Показано, что СВЧ транзисторы на базе гетероструктур AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN имеют коэффициент усиления по мощности не менее 10 дБ в

диапазоне до 40 ГГц, а выбранные конструкции буферного слоя позволяют подавить коротко-канальный эффект ВАХ транзистора с длиной затвора 150 и 100 нм.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс в АО НПФ «Микран» (г. Томск).

Обоснованность и достоверность результатов. Научные положения и выводы, сформулированные в работе, их достоверность и научная новизна аргументированы и обоснованы результатами экспериментальных исследований, выполненных на современном метрологическом и технологическом оборудовании.

Полнота изложения материалов диссертации

По результатам диссертации опубликовано 13 работ, из которых 5 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, и 1 свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. Результаты диссертации докладывались на Российских и международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе. По результатам обсуждения на семинаре можно сформулировать следующие замечания к диссертационной работе Великовского Л.Э.:

Некоторые рисунки диссертации (2.1; 2.2; 2.6; 2.7; 2.12; 2.14; ряд др.) имеют мелкий шрифт по осям, что затрудняет восприятие представленного материала. Имеются также технические ошибки в тексте.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности.

Предмет и результаты исследования диссертационной работы Великовского Л.Э. соответствует пункту «Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника» паспорта специальности 01.04.04 – физическая электроника, технические науки.

Заключение. Диссертация Великовского Л.Э. «СВЧ транзистор миллиметрового диапазона на основе (InAlGa)N/AlN/GaN гетероструктуры с легированными буферными слоями» является завершенной научно-квалификационной работой, 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. Автореферат полностью соответствует

содержанию диссертации.

Диссертация соответствует критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, а её автор Великовский Л.Э., заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Доклад Л.Э. Великовского по теме диссертации заслушан на научном семинаре кафедры Полупроводниковых приборов и микроэлектроники в Новосибирском государственном техническом университете, отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден 12 февраля 2020года, протокол заседания № 3.

Председатель семинара кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета

Дмитрий Иванович Остертак

Отзыв подготовил: доктор технических наук, профессор кафедры Полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета

Александр Андреевич Величко

Адрес ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20.

Тел. (383) 346-50-01, 346-08-77, E-mail: rector@nstu.ru

