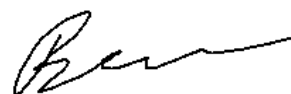


УДК 621.382

На правах рукописи



Великовский Леонид Эдуардович

СВЧ ТРАНЗИСТОР МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ  
(InAlGa)N/AlN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С ЛЕГИРОВАННЫМИ  
БУФЕРНЫМИ СЛОЯМИ

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена: в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» (г. Томск)

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент Сахаров Юрий Владимирович

Официальные оппоненты:  
Журавлев Константин Сергеевич, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), заведующий лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии соединений АЗВ5

Егоркин Владимир Ильич, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники (г. Москва), ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Защита состоится «27» февраля 2020 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04, созданного на базе ФГБОУ ВО ТУСУР по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ТУСУР и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/y3sbf8oz>

Автореферат разослан « 27 » декабря 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

 Ю.П. Акулиничев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Развитие мобильных и высокоскоростных средств телекоммуникаций обусловлено быстрым развитием приемно-передающих устройств СВЧ диапазона с полупроводниковыми приборами в качестве усилительных элементов. Основными активными элементами данных систем являются монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ диапазона, в которых активным усилительным элементом являются СВЧ транзисторы. Использование гетероструктур на основе GaN позволяет значительно увеличить мощность СВЧ транзисторов. К настоящему времени технологии СВЧ МИС с полевыми транзисторами с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе GaN широко применяются в устройствах с рабочими частотами до 30 ГГц. Актуальность диссертационной работы обусловлена тенденцией в развитии техники сверхвысоких частот, заключающейся в расширении частотных и мощностных диапазонов работы СВЧ транзисторов, несоответствием достигнутых к настоящему времени параметров технологии GaN транзисторов и теоретических пределов их частотных и мощностных параметров, а также потребностью в данных транзисторах и СВЧ МИС на их основе для применения в различных устройствах СВЧ диапазона. Для повышения рабочей частоты необходимо решать комплекс проблем, связанных с увеличением электрических полей и повышением требований пространственному ограничению проводящих слоев в короткоканальных приборах.

### Цель работы

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

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. исследовать методы формирования и разработать конструкцию высокоомного буферного слоя, обеспечивающего пространственную локализацию двумерного электронного газа в канале транзистора при максимальных напряжениях пробоя в транзисторе;
2. разработать конструкции гетероструктур на основе (InAlGa)N/GaN, обеспечивающих наилучшее сочетание параметров гетероструктуры и транзистора для мм-диапазона;
3. исследовать низкочастотные и высокочастотные характеристики СВЧ (InAlGa)N/GaN транзисторы с различными конструкциями гетероструктуры, буферного слоя и длиной затвора;
4. провести анализ устойчивости к воздействию температуры и влажности диэлектрических покрытий, используемых для пассивации СВЧ транзисторов.

### **Научная новизна работы**

1. Выявлено влияние толщины легированных слоев в конструкции буферного слоя транзисторной гетероструктуры, включающей легированные железом и углеродом слои GaN, а также слои AlGaN переменного состава, на напряжение пробоя мощных СВЧ транзисторов.

2. Показано, что приближение легированного углеродом буферного слоя GaN к двумерному электронному газу в канале AlGaN/AlN/GaN транзистора на расстоянии 0,2 и менее микрон приводит к созданию под каналом транзистора содержащего глубокие центры слоя, захват электронов в котором приводит к увеличению коллапса тока до 45-70% вне зависимости от толщины легированного слоя и наличия под каналом барьерного слоя AlGaN;

3. Обнаружено, что применение *in situ* пассивации нитридом кремния толщиной 5 нм позволяет снизить на порядок ток утечки затвор-сток в транзисторе на основе  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  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.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработаны конструкции буферных и пассивирующих слоев СВЧ НЕМТ транзисторов на основе гетероструктур  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  и  $\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , обеспечивающие сочетание высокого напряжения пробоя, низкого коллапса тока и плотности токов утечки.

2. Показано влияние конструктивных параметров буферного слоя на напряжение пробоя и утечку в буферных слоях, а также на коллапс тока, «kink» эффект и напряжение пробоя в транзисторе.

3. Для гетероструктур  $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  и  $\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$  проведен сравнительный анализ ВАХ и СВЧ характеристик, показаны зависимости СВЧ характеристик транзисторов от ключевых параметров конструкции – длины затвора и расстояния исток-сток.

4. Предложены конструкции эпитаксиальных гетероструктур  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  и  $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , включающие расположенный на расстоянии 0,5 мкм от канала легированный железом буферный слой GaN, и позволяющие получить в СВЧ НЕМТ с длиной затвора 0,15 мкм в режиме усиления класса В максимально стабильный коэффициент усиления более 10 дБ в диапазоне до 40 ГГц.

5. Исследован состав и устойчивость к температуре и влажности основных покрытий для пассивации рабочей области транзистора, предложены варианты пассивирующих слоев, обеспечивающих максимальную защиту транзисторов.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Буферный слой гетероструктуры, включающий легированный железом GaN и расположенный под каналом барьерный слой на основе AlGaN, позволяет устранить короткоканальные эффекты на ВАХ, а также повысить до

100 В напряжение пробоя в СВЧ транзисторах на основе InAlN/AlN/GaN и AlGaIn/AlN/GaN гетероструктур с затвором длиной менее 0,15 мкм.

2. Легированный углеродом буферный слой GaN, приближенный к каналу AlGaIn/AlN/GaN транзистора на расстояние 0,2 и менее микрон, приводит к увеличению коллапса тока до 45-70% вне зависимости от толщины легированного слоя и наличия под каналом барьерного слоя AlGaIn.

3. In situ пассивация  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}$  нитридом кремния толщиной 5 нм позволяет в транзисторе на основе гетероструктуры  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  снизить на порядок ток утечки затвор-сток и сформировать устойчивое к воздействию температуры и влажности защитное покрытие для рабочей области транзистора.

### **Методология и методы исследования**

Результаты диссертации получены с применением комплекса экспериментальных метрологических (атомная силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия, рентгеновская дифракция высокого разрешения, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия с послойным распылением вещества ионами аргона, вторичная ионная масс-спектрометрия, релаксационная спектроскопия глубоких уровней, измерения эффекта Холла и слоевого сопротивления, импульсные и СВЧ измерения) и технологических (газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении, стимулированное плазмой химическое вакуумное осаждение из газовой фазы, атомно-слоевое осаждение) методик. Использовалось электрофизическое моделирование в программном комплексе Silvaco TCAD.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современных метрологических и технологических методов, воспроизводимостью полученных результатов и их соответствием данным, полученным другими авторами в тех областях, где таковые имеются.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих научно-практических конференциях и семинарах: Международной конференции IFOST 2019 (Томск, 2019), 10-й Международной научно-практической конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» (Москва, 2019), 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (Minsk, Belarus, 2018), 11-й всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 2017), Тринадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2017), International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Astana, Kazakhstan, 2017), 10-й всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2015).

Работа выполнена при финансовой поддержке ПНИЭР "Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных

интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения" (Соглашение № 14.578.21.0240 от 26.09.2017 г.) УИР REMEFI 57817X240.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах, в том числе – в 5 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК, в 5 публикациях в сборниках трудов Международных конференций, в 2 публикациях в сборниках трудов Российских научных конференций, в 1 свидетельстве о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы, из них 7 индексируются в WoS и Scopus.

**Личный вклад автора** заключается в планировании и проведении большей части экспериментальных исследований, в анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке материалов исследований к публикации.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Содержит 144 стр. машинописного текста, 61 рисунка и 9 таблиц. Библиография включает 195 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении приведены основные характеристики транзисторов с высокой подвижностью электронов, сформулирована цель и научная новизна работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту, обоснована теоретическая и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена рассмотрению основных пути повышения рабочей частоты и мощности СВЧ GaN НЕМТ. Проанализирована связь СВЧ параметров с конструктивными особенностями транзисторов, а также возможности улучшения электрофизических параметров эпитаксиальных гетероструктур. Основным путем увеличения рабочей частоты внутреннего транзистора является увеличение граничной частоты усиления по току  $f_t$  за счет увеличения соотношения насыщенной дрейфовой скорости электронов в канале  $v_{sat}$  к длине затвора  $L_g$ . Для повышения граничной частоты усиления по мощности  $f_{max}$  необходимо увеличить соотношение между входным и выходным сопротивлением транзистора путем уменьшения  $R_s$  (суммы сопротивления омических контактов и сопротивления исток-затвор), а также подавления короткоканального эффекта и тока утечки в буферном слое. Профиль затвора должен обеспечивать минимальное сопротивление при минимальной емкости затвор-сток. Оптимизация конструкции обусловлена необходимостью получения одновременно высокого напряжения пробоя, низких емкостей и сопротивлений затвор-исток и затвор-сток ( $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ ,  $R_d$ ,  $R_s$ ). Для получения высокой выходной мощности конструкция транзистора должна обеспечивать максимальный диапазон выходного тока и выходного напряжения. Из-за снижения рабочего напряжения в транзисторах с длиной затвора менее  $<0,2$  мкм необходимо повышать концентрацию и подвижность

электронов в гетероструктуре.

Разработка СВЧ транзисторов мм-диапазона предполагает решение ряда конструктивных и технологических проблем, которые становятся все более серьезными с увеличением рабочей частоты прибора. Методы повышения рабочей частоты транзисторов, не касающиеся типов конструкции гетероструктуры, предполагают пропорциональное уменьшение основных параметров конструкции транзистора – ширины и длины затвора, расстояния затвор-исток и затвор-сток. Такие изменения приводят к увеличению напряженности электрического поля в транзисторе и должны рассматриваться совместно с выбором и изменениями конструкции гетероструктуры. Пропорциональное уменьшение габаритов транзистора предполагает использование затворов с длиной не более 0,15 мкм Г или Т-образной формой профиля; использование уменьшенного до 2 мкм и менее расстояния исток-сток; использование конструкций гетероструктуры, позволяющих уменьшать расстояние затвор-канал сохраняя высокую концентрацию электронов в канале; использование сложных конструкций буферного слоя транзисторов, позволяющих минимизировать короткоканальные и связанные с ловушками эффекты. Уменьшение расстояние затвор-канал налагает более жесткие требования на свойства диэлектрических слоев, пассивирующих рабочую область транзистора, которые должны связывать поверхностные состояния, ограничивать проникновение влаги в рабочую область транзистора и уменьшать паразитные емкости.

Преимуществом InAlN/GaN перед AlGaN/GaN гетероструктурами является высокая концентрация электронов в 2DEG, что дает возможность использовать тонкий барьерный слой в гетероструктурах HEMT [1-3]. Это делает актуальным сравнительное исследование технологии и свойств СВЧ транзисторов мм-диапазона на основе InAlN/GaN и AlGaN/GaN гетероструктур. Для промышленного использования InAlN/GaN гетероструктур необходимо решение ряда проблем, основными из которых являются высокие токи утечки затвора, короткоканальные эффекты, низкие значения напряжения пробоя в транзисторе, коллапс тока, увеличение тока утечки затвора и уменьшение тока стока в ходе испытаний.

**Вторая глава** посвящена исследованию свойств эпитаксиальных гетероструктур для СВЧ транзисторов.

В первой части главы проведен сравнительный анализ двух основных типов гетероструктур, исследованных в работе: AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN. Для каждой из них выбран и экспериментально обоснован состав и толщины. Исследование образцов гетероструктур показало, что по своим электрофизическим свойствам  $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  гетероструктуры с толщиной барьерного слоя 22 нм и  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  гетероструктуры с толщиной барьерного слоя 5 нм будут иметь высокие концентрации и подвижности электронов в двумерном газе, что позволяет их использовать в исследованиях короткоканальных СВЧ транзисторов для мм-диапазона длин

волн (Таблица 1).

Таблица 1 – Параметры InAlN/GaN и AlGaN/GaN гетероструктур

Тип гетероструктуры	Толщина барьерного слоя, нм	Слоевое сопротивление, Ом/□	Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /В·с	Концентрация электронов, см <sup>-2</sup>
In <sub>0,14</sub> Al <sub>0,86</sub> N/AlN/GaN	5	220÷240	1340	2,1·10 <sup>13</sup>
Al <sub>0,24</sub> Ga <sub>0,76</sub> N/AlN/GaN	22	353÷366	1750	1·10 <sup>13</sup>

Во второй части главы рассмотрены конструкции буферных слоев для гетероструктур, изготовленных на основе нелегированного, легированного углеродом и легированного железом GaN, проанализированы их влияние на параметры транзисторов на основе GaN. Исследовано влияние выбранных параметров конструкции на напряжение пробоя буферного слоя, электрофизические параметры гетероструктур (InAlGa)N/GaN, напряжение пробоя исток-сток транзистора, эффекты короткого канала, коллапса тока, сдвига напряжения насыщения и «kink» эффекта. Для выбранных типов легированных слоёв GaN проведены измерения спектра ловушек и профилей легирования.

Для буферных слоев на основе нелегированного GaN характерна электронная проводимость, создающаяся за счет фоновых примесей кислорода, а также вакансий азота, действующих как мелкие доноры. Эти факторы плохо поддаются управлению, поэтому для подавления электронной проводимости используют повышение фоновой концентрации углерода, вакансии галлия и прорастающие дислокации, образующие акцепторные уровни. В силу этого режимы роста полуизолирующего GaN отличаются от режимов для получения GaN высокой чистоты и кристаллического совершенства, что не способствует получению максимальных электрофизических параметров в канале транзистора. Проведенная оптимизация режимов роста позволила увеличить напряжения пробоя до 60÷90 В и привела к уменьшению токов утечки. Толщина буферного слоя была выбрана равной 1,7÷1,8 мкм, был изменен также состав и режим роста зародышевого слоя AlGaN на подложке. Достигнутых напряжений пробоя недостаточно для получения высоких значений выходной мощности СВЧ транзисторов [4,5]. Для исследования коллапса тока, «kink» эффекта и эффекта дрейфа напряжения насыщения ВАХ транзистора измерялись в импульсном режиме с длительностью импульса 250 нсек. Коллапс тока в транзисторах с нелегированным буферным слоем рассчитывался по соотношению токов импульсной ВАХ при напряжениях на затворе 0 В и стоке 10 В при изменении напряжения на стоке в точке покоя между импульсами от 0 до 25÷30 В. Для транзисторов с нелегированным буферным слоем коллапс тока находится в пределах 15-30%. Сдвиг напряжения насыщения (эффект «knee walkout») в большинстве образцов отсутствует, что косвенно свидетельствует о невысоком уровне непреднамеренной примеси углерода в буферных слоях.



Спектр фотоэлектрической релаксационной спектроскопии PICTS нелегированного буферного слоя указывает на присутствие одного доминирующего глубокого центра с энергией ионизации 1 эВ, на котором закреплён уровень Ферми и который виден также в температурной зависимости тока. Полученные данные не позволяют однозначно определить, к какому типу (электронному или дырочному) относится данная ловушка, но поскольку от этого центра наблюдался наиболее сильный сигнал, концентрация таких центров должна быть наибольшей, а его энергетический уровень позволяет связать именно с ним наблюдаемый на импульсных ВАХ эффект коллапса тока.

Использование легированных углеродом буферных слоев позволяет подавить фоновую проводимость и обеспечить высокие значения напряжения пробоя в транзисторе. Верхняя часть буферного слоя, образующая канал транзистора, при этом остается нелегированной. Удаляя легирующую примесь от канала транзистора, можно сохранить условия для высокой подвижности электронов в двумерном электронном газе. Для компенсации фоновой электронной проводимости в GaN буфере объемная концентрация углерода должна выбираться на уровне  $N_d \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Легирование буферного слоя снимает используемые при его росте технологические ограничения, позволяя выбирать параметры роста, обеспечивающие более высокое кристаллическое совершенство буферного слоя. В InAlN/GaN гетероструктуре это позволяет почти в 2 раза увеличить подвижность двумерного электронного газа, измеренную при температуре 77°K, что свидетельствует о уменьшении рассеяния на шероховатости гетерограницы, фоновых примесях и дислокациях. Для получения напряжения пробоя выше 120 В необходимо уменьшать толщину нелегированного слоя GaN до 0,2÷0,5 мкм, однако уже при приближении легированного углеродом слоя к каналу транзистора на 0,7 мкм увеличение концентрации глубоких центров вблизи канала приводит к появлению значительного коллапса тока на импульсных ВАХ транзисторов (рисунок 1). Коллапс тока, наблюдаемый в транзисторах на InAlN/GaN гетероструктурах, меньше, чем в AlGaN/GaN транзисторах, и составляет около 10%. Спектр ловушек, полученный методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) с оптическим возбуждением, показал большой сигнал с дырочных ловушек с энергией активации  $E_a = 0,94 \div 0,98 \text{ эВ}$  и сечением захвата дырок  $\sigma_p = (2,7 \div 10,5) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ , что близко к приводимым в литературе данным для углеродной ловушки. Полученный результат объясняет значительные изменения величины коллапса тока в импульсных ВАХ по сравнению с образцами НЕМТ с нелегированным буферным слоем. Значения выходной проводимости, полученные для InAlN/GaN НЕМТ с С-легированным буферным слоем, каналом толщиной 0,8 мкм и различной длиной затворов показали, что данная конструкция буферного слоя не обеспечивает необходимого для транзисторов мм-диапазона подавления короткоканальных эффектов [6,7].

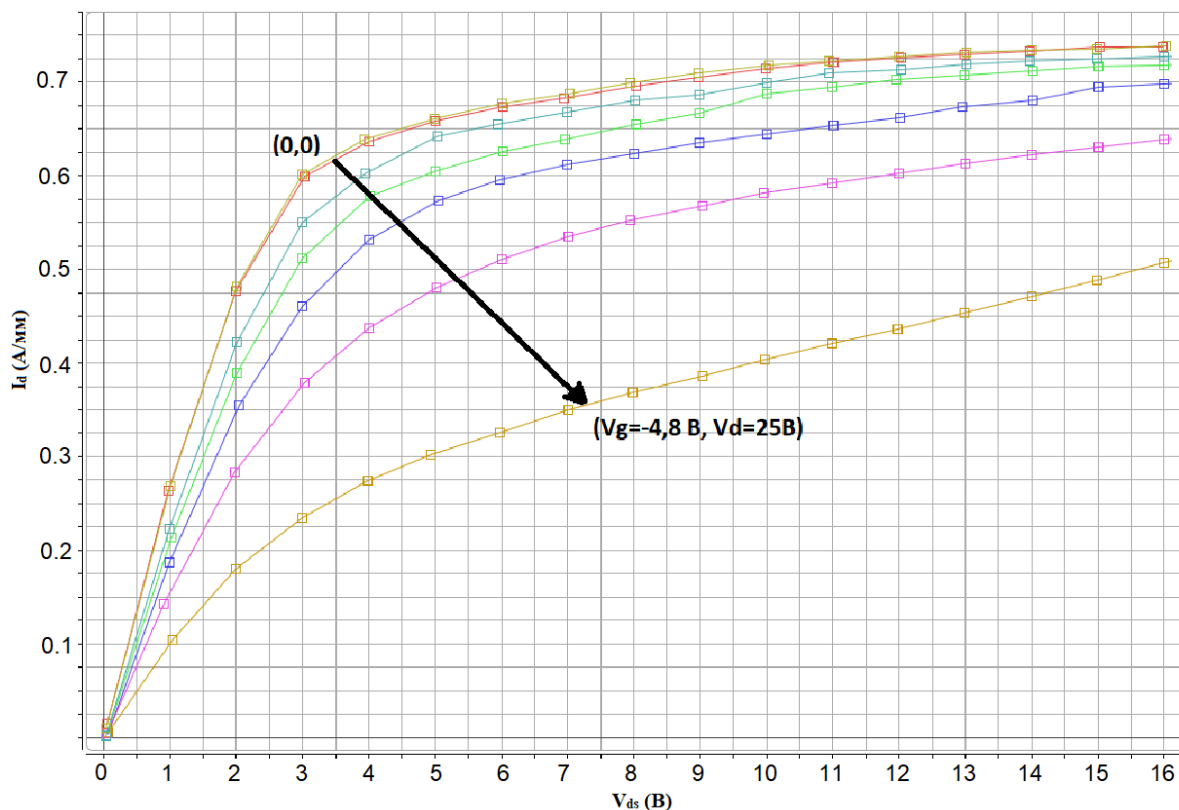


Рисунок 1 – Импульсная ВАХ при  $V_g = 0$  AlGaIn/GaN HEMT с C-легированным буферным слоем GaN и каналом толщиной 0,7 мкм, напряжение в точке покоя меняется от ( $V_g = -4,8$  В;  $V_d = 0$  В) до ( $V_g = -4,8$  В;  $V_d = 25$  В)

Легирование железом буферных слоев широко применяется в СВЧ транзисторах на основе GaN. Особенностью легирования железом является значительная сегрегация железа на поверхности при эпитаксиальном росте, приводящая к постепенному снижению концентрации железа в GaN. Если легирование железом остановлено на расстоянии 0,5 мкм от гетероперехода с двумерным газом (т.е. толщина нелегированной части буферного слоя равна 0,5 мкм), то при Fe-легировании с  $N_d \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$  концентрация железа в канале транзистора составит примерно  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация и подвижность электронов в канале снизятся на 10÷20%. Статистические данные по напряжению пробоя для образцов с Fe-легированным буферным слоем (рисунок 2), показывают, что при толщине нелегированного слоя 0,5 мкм напряжение пробоя становится выше 135 В. Коллапс тока в AlGaIn/GaN и InAlN/GaN HEMT с такой конструкцией буферного слоя ограничен 12÷22% и 5÷20%, соответственно. На импульсных ВАХ InAlN/GaN HEMT присутствует сдвиг напряжения насыщения (до 1 В) и составляющий менее 0,04 А/мм «kink» эффект. В спектре РСГУ, полученном для легированных железом слоев GaN, обнаружено присутствие центров с энергией ионизации 0,5 эВ и сечением захвата электронов  $5,5 \times 10^{-15} \text{ см}^2$ , и глубоких ловушек с энергией ионизации около 1 эВ. Акцепторный уровень с энергией ионизации 0,5 эВ связан с железом, и на нем закреплён уровень Ферми. Ловушки с энергией ионизации

около 1 эВ принадлежат акцепторам в нижней половине запрещенной зоны. Это либо комплексы вакансий галлия с кремнием, либо углеродные акцепторы.

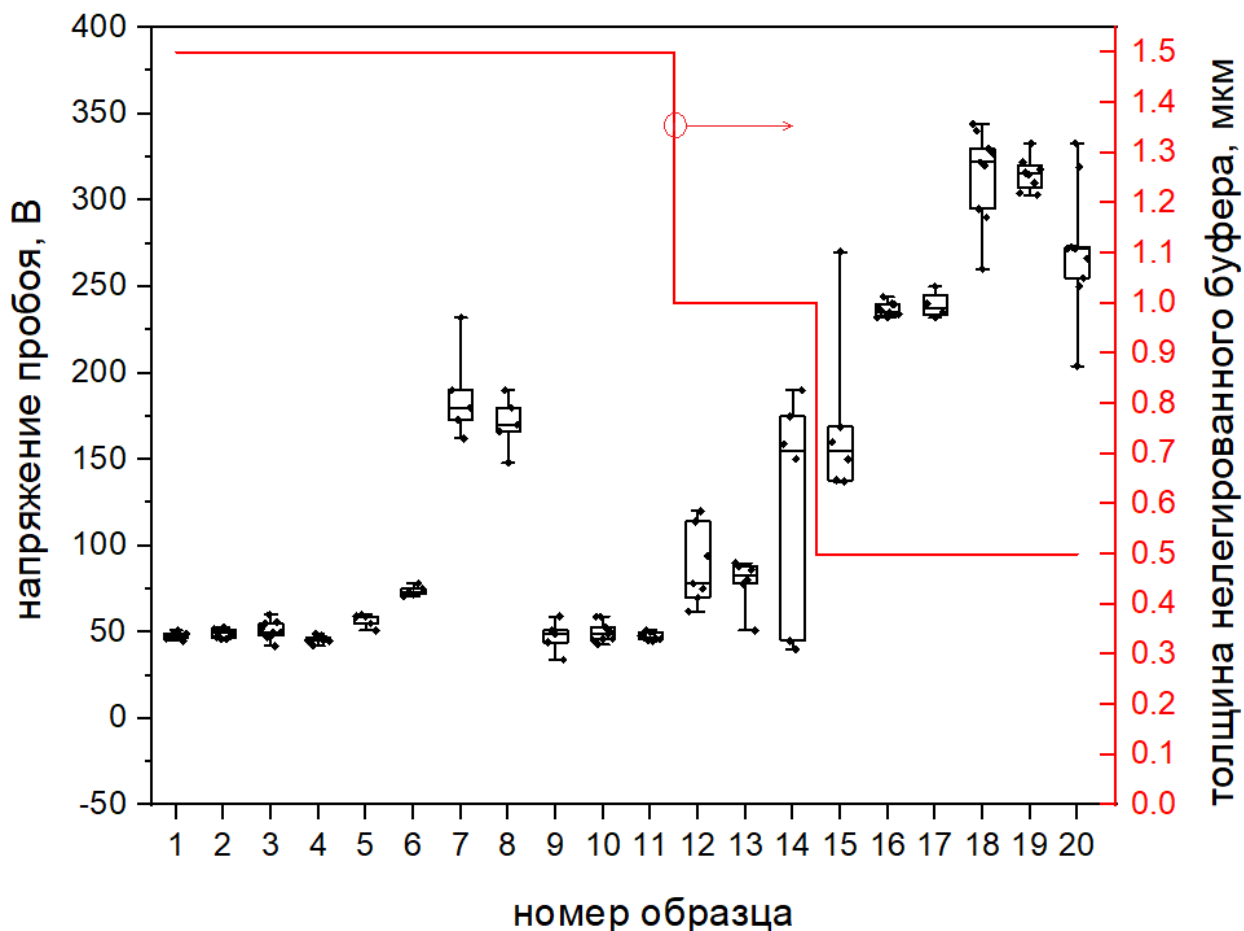


Рисунок 2 – Напряжение пробоя для различных толщин нелегированной части буферного слоя (толщины канала) в образцах с легированным железом буферным слоем

ВАХ транзисторов с легированными железом буферными слоями показали напряжение пробоя в транзисторах с  $L_g=0,2$  мкм выше 150 В и выше 200 В соответственно для AlGaIn/GaN и InAlN/GaN НЕМТ. Легирование железом является оптимальным решением для таких транзисторов, позволяющим минимизировать потери параметров транзисторов от этих эффектов. Но удаленный на 0,5 мкм от канала легированный железом слой GaN не дает требуемой в короткоканальных транзисторах пространственной локализации зарядов в двумерном электронном газе, а также снижает подвижность и концентрацию электронов в двумерном газе. Возможными решениями проблемы является применение совместного легирования железом и углеродом, использование дополнительных барьерных слоев AlGaIn под каналом, а также использование гетероструктур, в которых поверхностью эпитаксиального роста является N-плоскость в GaN. В короткоканальных транзисторах основными наблюдаемыми эффектами являются сдвиг

напряжения отсечки и рост выходной проводимости канала при увеличении напряжения.

Использование легированных углеродом и железом буферных слоев в одной конструкции буферного слоя дает возможность исследовать их влияние на напряжение пробоя и коллапс тока. Поскольку профиль концентрации при легировании углеродом имеет резкие границы, можно расположить легированный углеродом слой на небольшом расстоянии от двумерного электронного газа, а легированный железом слой удалить от канала транзистора. Исследование нескольких вариантов профилей легирования, отличающихся взаимным расположением и толщиной легированных железом и углеродом буферных слоев, показало, что изменение толщины нелегированного углеродом буферного слоя слабо влияет на измеренные напряжения пробоя. Основным фактором, определяющим диапазон напряжений пробоя, является толщина нелегированного железом буферного слоя. Значения напряжения пробоя в таких образцах близки к получаемым при легировании железом с теми же толщинами нелегированного слоя GaN. На импульсных ВАХ транзисторов с легированным углеродом и железом буферным слоем короткоканальный эффект, вызванный растеканием тока в области сильных электрических полей между затвором и стоком, значительно уменьшается. Полностью устранить эффекты короткого канала с помощью такой конструкции удастся только с приближением легированного углеродом слоя к каналу на расстояние 0,1 мкм, что приводит к увеличению до 50% и выше коллапса тока, а также «kink» эффекта. Собственно «kink» эффект сильнее проявляется в гетероструктуре InAlN/GaN и в структурах AlGaIn/GaN с близко расположенным к каналу С-легированным слоем [6,7].

Модернизировать конструкции буферных слоев GaN, легированных железом, возможно за счет вставки AlGaIn слоя с переменным составом под каналом транзистора, создающей дополнительный «обратный» барьер для проникновения электронов из канала в буферный слой. Исследованные конструкции буферных слоев с «обратным» барьером AlGaIn под каналом отличались толщиной канала и расстоянием от легированного железом слоя GaN. В одном образце было применено легирование углеродом слоя GaN между «обратным» барьером AlGaIn и легированным железом слоем GaN. Линейное нарастание мольной доли алюминия в составе «обратного» барьерного слоя AlGaIn использовалось для предотвращения образования двумерного газа на границе буферного слоя GaN и барьерного слоя AlGaIn. Условия роста и толщина GaN слоя, выращиваемого на AlGaIn, а также состав AlGaIn, выбирались с учетом необходимости избежать появления сильных упругих напряжений, приводящих к изгибу пластины и образованию трещин в GaN. Al<sub>0,07</sub>Ga<sub>0,93</sub>N был выбран исходя из минимального напряжения и низкой концентрации прорастающих дислокаций [8]. Параметры гетероструктур и импульсные параметры ВАХ транзисторов в образцах с различными конструкциями барьерного слоя под каналом приведены в Таблице 2. Сравнение слоевого сопротивления двумерного газа в гетероструктурах

AlGaN/GaN и некоторых образцах InAlN/GaN, показывает, что включение в конструкцию барьерного слоя, распложенного под каналом, приводит к увеличению слоевого сопротивления гетероструктуры. При толщине канала 50 нм использование конструкции с легированным железом и легированным углеродом слоями под «обратным» барьером позволяет получить минимальное (<10%) увеличение слоевого сопротивления канала. Все образцы с барьерными слоями имели высокие (150÷300 В) напряжения пробоя в буферных слоях. Сравнение напряжения пробоя в BCF1 с BF3 и BF1 показывает, что существует возможность уменьшения концентрации железа в канале транзистора за счет удаления легированного железом слоя дальше от канала с одновременным включением тонкой вставки легированного углеродом слоя под барьерным слоем. При использовании этой конструкции напряжение пробоя не уменьшается (в отличие от BF3, имеющего самые низкие напряжения пробоя среди данных образцов).

Таблица 2 – Параметры гетероструктур и импульсные параметры ВАХ транзисторов в образцах с различными конструкциями барьерного слоя под каналом

Параметры гетероструктур и транзисторов ( $L_g=0.2$ мкм)	Конструкции буферного слоя					
	BF1	BF2	BF3	BCF1	F1	F2
толщина легированного углеродом слоя, мкм	0	0	0	0,7	0	0
толщина нелегированного железом слоя, мкм	0,5	0,5	0,8	0,8	0,5	1,0
слоевое сопротивление AlGaN/GaN, Ом/□	452	405	358	349	342	300÷340
максимальный ток, А/мм (при $V_g=+1$ В)	0,94	0,96	1,1	1,1	1,1	1,2
коллапс тока в, % (при $V_d=10$ В)	19	27	61÷78	45	14÷29	12÷22
выходная проводимость $g_d$ , мСм/мм	0	0	0	0	0	4.5
напряжение пробоя $V_{ds}$ , В	180	170	160	120	>150	–
InAlN/GaN						
толщина нелегированного железом слоя, мкм	0,5	0,5	0,8	0,8	0,5	1,5
слоевое сопротивление, Ом/□	283	–	–	–	255	220÷240
максимальный ток, А/мм (при $V_g=+1$ В)	1,4	–	–	–	1,4	1,4
коллапс тока в, % (при $V_d=10$ В)	32	–	–	–	5÷22	27
выходная проводимость $g_d$ , мСм/мм	0	–	–	–	0	<6
напряжение пробоя $V_{ds}$ , В	>200	–	–	–	>200	–

Для всех конструкций с обратным барьером на импульсных ВАХ, измеренных для точки покоя, соответствующей измерению коллапса тока, наблюдается большой сдвиг напряжения насыщения при небольших изменениях сопротивления  $R_{on}$  и максимального тока стока. По сравнению с образцом BF2 на образце BF1 коллапс тока меньше, что, вероятно, связано с меньшей толщиной канала в BF1. По сравнению с образцами без легирования буферного слоя, конструкция BCF1 приводит к значительному увеличению коллапса тока. Коллапс тока в InAlN/GaN HEMT с обратным барьером выше, чем в AlGaN/GaN HEMT. В отличие от AlGaN/GaN HEMT с

легированным железом буфером, с уменьшением длины затвора выходная проводимость в InAlN/GaN НЕМТ транзисторах с обратным барьерным слоем не начинает возрастать, что показывает эффективность подавления короткоканального эффекта.

Проведенные эксперименты показали, что для получения транзисторов с длиной затвора 0,15 мкм, сочетающих в себе комплекс требуемых для работы в мм-диапазоне параметров, гетероструктура для СВЧ транзисторов должна иметь конструкцию буферного слоя на основе легированных железом слоев GaN. Для подавления короткоканальных эффектов в транзисторах с затворами длиной менее 0,15 мкм необходимо использование обратного барьера из AlGaN.

Таблица 3– Выходная проводимость ВАХ и напряжение пробоя InAlN/GaN транзисторов обратным барьером и различными длинами затворов

Длина затвора, мкм	Lg=0,1	Lg=0,15	Lg=0,2
Выходная проводимость $g_d$ , См/мм	0	0	0
Напряжение пробоя $V_{ds}$ , В	>100	>120	>150

В третьей части главы рассмотрены основные варианты пассивации СВЧ транзисторов. Благодаря возможности осаждения в камере роста и высокой стойкости к воздействию температуры и влажности *in situ* SiN является лучшим вариантом для первого слоя диэлектрического покрытия (InAlGa)N/GaN НЕМТ. Пассивация  $In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN$  *in situ* SiN толщиной 5 нм позволяет снизить ток утечки в барьерах Шоттки не менее чем на порядок по сравнению с пассивацией толщиной 3 нм и образцами без пассивации (рисунок 3), подавить захват электронов на поверхностные ловушки и получить высокое напряжение пробоя в барьере Шоттки.

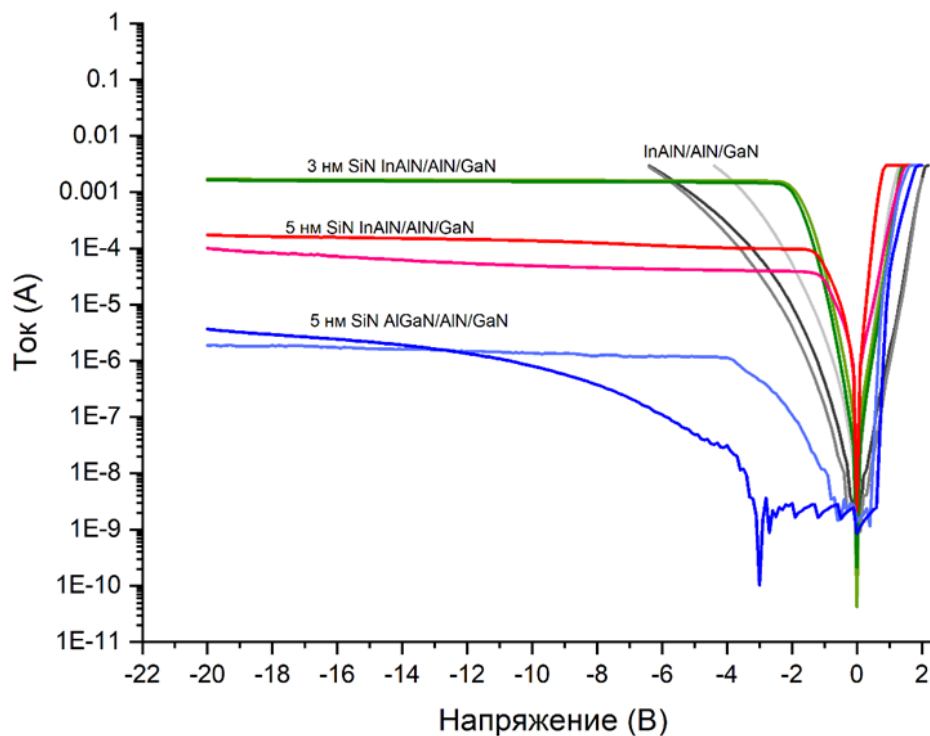


Рисунок 3 – ВАХ затвор-сток в InAlN/AlN/GaN транзисторах с пассивацией *in situ* SiN толщиной 3 нм (зеленые кривые), 5 нм (красные кривые), а также без пассивации (серые кривые) и в AlGaIn/AlN/GaN транзисторах с пассивацией *in situ* SiN толщиной 5 нм (синие кривые)

В AlGaIn/AlN/GaN транзисторах *in situ* SiN толщиной 5 нм также позволяет подавить захват электронов на поверхностные ловушки и получить низкие токи утечки затвора.

Среди исследованных пассивирующих покрытий  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  показали наиболее высокую стойкость к воздействию температуры и влажности, что дает возможность выбирать покрытия для следующих после *in situ* SiN слоев пассивации МИС и СВЧ транзисторов в зависимости от требований к его диэлектрической проницаемости.

Исследованные образцы нитрида кремния, осажденные в различных режимах и установках методами стимулированного плазмой химического вакуумного осаждения из газовой фазы, имели соотношение Si:N близкое к 5:4 и высокое содержание атомов кислорода на поверхности ( $\approx 35\%$ ), которое увеличивалось до 50% после выдержки в климатической камере в течение 200 часов при 80% влажности и 85°C. Анализ химических связей кремния в образцах показал, что после выдержки в климатической камере увеличение количество связей с кислородом на поверхности возрастает до 40÷50%, а в глубине пленки до 18÷25% возрастает количество связей атомов кремния с друг другом. Оба типа связей до воздействия температуры и влажности присутствовали в пленках незначительном (менее 10%) количестве. Полученные данные не позволяют считать осажденные в исследованных режимах пленки нитрида кремния устойчивыми к температурному нагреву и воздействию влаги пассивирующими покрытиями.

**В третьей главе** диссертационной работы приводится описание результатов исследований характеристик СВЧ транзисторов.

В первой части главы приводятся сведения о выбранной технологии изготовления СВЧ транзисторов. В ходе экспериментов был сделан выбор метода пассивации и технологии формирования затвора. Использование ионной имплантации вместо плазменного травления межприборной изоляции позволяет снизить утечки между контактными площадками транзисторов, возникающие при высоких напряжениях и вносящих вклад в токи утечки прибора. Выбор технологии формирования затвора через травление щели в диэлектрике обусловлен использованием *in situ* SiN в качестве первого слоя пассивации. Конструкция затвора учитывала результаты моделирования электрических полей в транзисторе и влияние формы профиля затвора на величину максимумов электрического поля [9,10].

Во второй части рассмотрено влияние параметров конструкции InAlN/AlN/GaN гетероструктуры на малосигнальные СВЧ характеристики. Полученные результаты показали, что, при условии выбора толщины InAlN равной 5÷7 нм и мольной доли индия равной 12÷14%, величина  $f_{max}$  будет близкой к максимальной для исследуемых диапазонов толщин и состава InAlN. [11,12] на их импульсные и СВЧ характеристики.

Для транзисторов с  $L_g=0,15$  мкм для подавления короткоканального эффекта на ВАХ достаточно включения в конструкцию легированного железом буферного слоя, при этом снижение максимального тока в результате применения легирования буферного слоя в  $In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN$  НЕМТ составляет около 16% [6,7]. «Kink» эффект на ВАХ транзистора снижается примерно в 2 раза. В  $Al_{0,24}Ga_{0,76}N/AlN/GaN$  НЕМТ на ВАХ отсутствует «kink» эффект, а коллапс тока составляет 19%.

Выбирая расстояние исток-сток не более 2÷2,5 мкм и длину затвора не более 0,15 мкм, можно получить в диапазоне 30÷40 ГГц в обоих типах транзисторов для рабочей точки  $V_{ds}=27,5$ В,  $I_d=15$  мА значения  $MSG \geq 10$  дБ в диапазоне до 40 ГГц (Рисунок 4). InAlN/AlN/GaN НЕМТ и AlGaN/AlN/GaN НЕМТ имеют в этой рабочей точке  $f_t \approx 34$  ГГц и  $f_{max} \approx 148$  и 183 ГГц, соответственно.



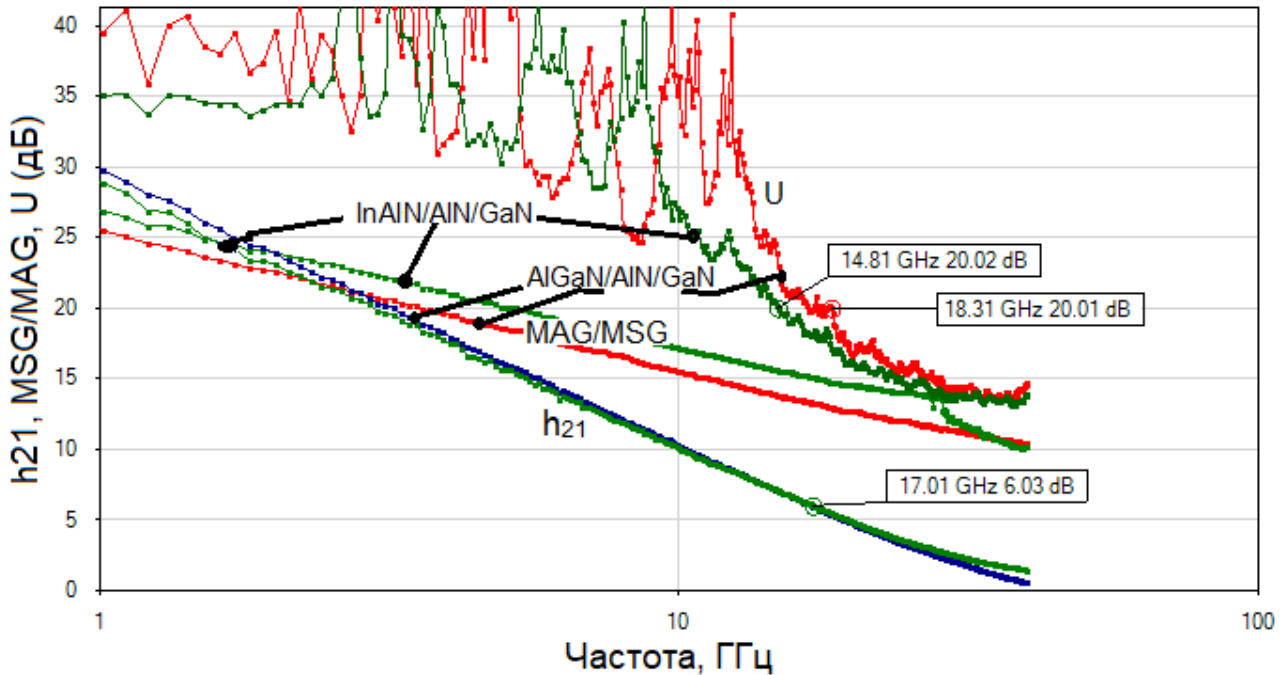


Рисунок 4 – Сравнение MSG/MAG,  $h_{21}$  и  $U$  для InAlN/AlN/GaN (зеленые кривые) и AlGaIn/AlN/GaN (красные и синие кривые) транзисторов с  $L_g=0,15$ ,  $L_{sd}=2$  мкм,  $W_g=100$  мкм для рабочей точки  $V_{ds}=27,5$ В,  $I_d=15$  мА

Для транзисторов с  $L_g=0,1$  мкм для подавления короткоканального эффекта на ВАХ необходимо включение в конструкцию расположенного под GaN каналом толщиной барьерного слоя AlGaIn. Такая конструкция приводит к снижению тока в InAlN/AlN/GaN HEMT на 26%, и увеличению коллапса тока.

На изготовленных InAlN/AlN/GaN транзисторах были проведены измерения импульсных  $S$  параметров для экстракции линейной и нелинейной модели транзисторов. На основании полученных моделей была разработана СВЧ МИС однокаскадного усилителя мм-диапазона, предназначенная для контроля СВЧ параметров технологии [13].

Измеренные  $S$  параметры и полученные из них зависимости MSG/MAG от частоты продемонстрировали высокий потенциал изготовленных InAlN/GaN и AlGaIn/GaN HEMT для работы в мм-диапазоне.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Продемонстрирована возможность получения короткоканальных СВЧ транзисторов, на вольт-амперных характеристиках которых подавлены эффекты короткого канала.

2. Показано, что легирование буферного слоя железом позволяет получить лучший баланс зависящих от конструкции буферного слоя параметров транзистора, полностью устранить утечки в буферном слое, ограничить величину коллапса в InAlN/AlN/GaN HEMT 22% и AlGaIn/AlN/GaN HEMT 30%, поднять напряжение пробоя исток-сток в транзисторах с  $L_g=0,25$  мкм до

более чем 200 В в InAlN/AlN/GaN НЕМТ и более 150 В в AlGaN/AlN/GaN НЕМТ, ограничить рост выходной проводимости в транзисторах с  $L_g \geq 0,15$  мкм.

3. Проведено сравнение параметров СВЧ транзисторов, изготовленных с легированием буферного слоя углеродом, железом и без легирования буферного слоя. Показано, что приближение легированного углеродом слоя к каналу на расстояние ближе 0,2 мкм приводит к значительному 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.

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

7. Изготовлены InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN НЕМТ, позволяющие получить в СВЧ НЕМТ с длиной затвора 0,15 мкм в режиме усиления класса В максимальный коэффициент усиления по мощности более 10 дБ в диапазоне до 40 ГГц.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Великовский Л.Э. Твердые растворы  $In_xAl_{1-x}N$ : проблемы стабильности состава / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. // Физика и техника полупроводников, 2019, том 53, вып. 12, – С. 1733-1739 (WoS, Scopus)

2. Великовский Л.Э. Физические свойства твердых растворов  $In_xAl_{1-x}N$  / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т.61, №6. – С. 142-147 (WoS, Scopus)

3. Великовский Л.Э. Особенности радиационных изменений электрических свойств InAlN/GaN НЕМТ / А.Г. Афонин, В.Н. Брудный, П.А. Брудный, Л.Э. Великовский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019 – Т.62, №9. – С. 106-111 (WoS, Scopus)

4. Великовский Л.Э. Разработка мощных GaN транзисторов L,S и X диапазона / Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Тезисы докладов 11-й всероссийской конференции ”Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Москва. – 2017 – С. 114-115.

5. Великовский Л.Э. Разработка мощных GaN транзисторов L-S-C диапазона / Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н., Шишкин Д.А., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф. // Тезисы докладов 10-й всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Санкт-Петербург: СПбПУ. – 2015 – С. 131-132.

6. Великовский Л.Э. Разработки и исследования СВЧ транзисторов на основе AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур / Л.Э. Великовский, П.Е. Сим, О.И. Демченко, Н.Е. Курбанова, А.В. Сахаров, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, Д.А. Закгейм, А.Ф. Цацунников, Д.С. Артеев, М.А. Яговкина, А.А. Аксенов, В.В. Куричалов // 10-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», 15 мая 2019 года, Москва

7. Velikovskiy L.E. et al. InAlN/GaN and AlGaN/GaN HEMT Technologies Comparison for Microwave Applications / L.E. Velikovskiy, P.E. Sim, O.I. Demchenko, N.E. Kurbanova, I.A. Filippov, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, D.S. Arteev, M.A. Yagovkina, A.F. Tsatsulnikov // Тезисы докладов международной конференции IFOST 2019, October 14-17, 2019, Tomsk (WoS, Scopus)

8. Великовский Л.Э. Stress-dislocation management in MOVPE of GaN on SiC wafers / M. E. Rudinsky, E. V. Yakovlev, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, E. E. Zavarin, A. F. Tsatsulnikov // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science Volume 213, Issue10, October 2016, Pages 2759-2763 (WoS, Scopus)

9. Великовский Л.Э. Влияние конструкции полевого электрода на распределение электрического поля в СВЧ GaN HEMT / Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Тринадцатая международная научно-практическая конференция “Электронные средства и системы управления”, 29 ноября – 1 декабря 2017, Томск, ТУСУР, Ч. 1. С. 119-122.

10. L. E. Velikovskiy Field-plate design optimization for high-power GaN high electron mobility transistors / N. E. Kurbanova, O. I. Demchenko, L. E. Velikovskiy, P. E. Sim // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, 29-30 June 2017 (WoS, Scopus)

11. Velikovskii L.E. Ultrathin barrier InAlN/GaN heterostructures for HEMT / A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, S.O. Usov, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, O.I. Demchenko, N.Y. Kurbanova, L.E. Velikovskii // 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology», 18-22 June 2018. – Minsk, Belarus

12. Velikovskii L.E. Ultrathin barrier InAlN/GaN heterostructures for HEMTs / A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, D.A. Zakheim, S.O. Usov, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, P.E. Sim, O.I. Demchenko, N.Y. Kurbanova and L.E. Velikovskii // Semiconductors, December 2018, Volume 52, Issue 14, pp 1843–1845 (WoS, Scopus)

13. Великовский Л.Э. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2019630196. Микросхема для проведения DEC тестов при производстве InAlN/GaN HEMT / Великовский Л.Э. (РФ), Сим П.Е. (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). - №2019630200; поступл.: 16.10.2019; регистр.: 24.10.2019.