

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

АО «Научно производственная фирма «МИКРАН»

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»

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доцент, Сахаров Ю.В.

Томск 2019

Список сокращений

HEMT, ТВПЭ - транзистор с высокой подвижностью электронов;
MOCVD - осаждение металлоорганических соединений из газовой фазы;
РФЭС, XPS - Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия
2DEG - двумерный электронный газ;
МЛЭ, МВЕ - молекулярно-пучковая эпитаксия;
МИС - микроволновая монолитная интегральная схема;
MAG/MSG – максимально достижимый/стабильный коэффициент усиления;
РАЕ – КПД по добавленной мощности;
ВИМС, SIMS - вторичная ионная масс-спектрометрия;
UID - непреднамеренно легированный;
СС - коллапс тока;
QP – точка покоя, соответствующая подаваемому между импульсами напряжению на транзистор;
FP - полевой электрод;
DIBL - эффект снижения высоты барьера, вызванного напряжением на стоке;
МДМ - металл-диэлектрик-металл;
LPCVD - химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении ;
PECVD - стимулированное плазмой химическое вакуумное осаждение из газовой фазы;
ICPECVD - стимулированное индуктивно-связанной плазмой химическое вакуумное осаждение из газовой фазы;
ALD – атомно-слоевое осаждение.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. Основные параметры и особенности конструкций СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона на основе нитрида галлия.....	12
1.1 Основные пути повышения рабочей частоты и мощности СВЧ транзисторов	12
1.2 Электрофизические свойства системы материалов (InAlGa)N/GaN, используемые при применении в мощных СВЧ транзисторах	16
1.3 Конструкции гетероструктур на основе GaN для СВЧ транзисторов	19
1.3.1 Гетероструктуры на основе AlGaN/GaN.....	19
1.3.2 Конструкции буферного слоя	20
1.3.3 Эффекты, влияющие на выбор конструкции	24
1.3.4 Технологии пассивации транзисторов	33
1.3.5 Гетероструктуры InAlN/GaN	37
1.4 Основные результаты и выводы главы 1	40
ГЛАВА 2. Исследование эпитаксиальных гетероструктур для СВЧ транзисторов.....	42
2.1 Конструкции гетероструктур для СВЧ транзисторов.....	42
2.1.1 Гетероструктуры на основе AlGaN/GaN.....	42
2.1.2 Гетероструктуры на основе InAlN/GaN	45
2.2 Конструкции буферных слоев для гетероструктур их влияние на параметры СВЧ транзисторов на основе GaN	52
2.2.1 Выбор конструкций и тестовых элементов для исследования параметров буферных слоев.	52
2.2.2 Буферные слои на основе нелегированного GaN	54
2.2.3 Буферные слои на основе GaN, легированного углеродом.....	61
2.2.4 Буферные слои на основе GaN, легированного железом	70

2.2.5	Буферные слои на основе GaN, легированного железом и углеродом.....	80
2.2.6	Буферные слои на основе AlGaN и GaN	86
2.3	Исследование пассивирующих покрытий.....	92
2.3.1	Выбор режимов осаждения и методика исследования.....	92
2.3.2	Профиль элементов в диэлектрических пленках нитрида кремния	94
2.3.3	Анализ химических связей в нитриде кремния	97
2.3.4	Профиль элементов в диэлектрических пленках диоксида кремния и оксида алюминия.....	103
2.3.5	Влияние in situ пассивации на напряжение пробоя и токи утечки затвора в InAlN/AlN/GaN НЕМТ.....	104
2.3.6	Выводы.....	107
2.4	Основные результаты и выводы главы 2.....	108
ГЛАВА 3. Исследование характеристик СВЧ транзисторов		110
3.1	Технология изготовления транзисторов.....	110
3.2	Исследование импульсных и СВЧ характеристик транзисторов.....	111
3.2.1	Параметры гетероструктуры InAlN/AlN/GaN и их влияние на СВЧ характеристики	111
3.2.2	Сравнение импульсных ВАХ транзисторов	112
3.2.3	Влияние расстояния исток-сток на СВЧ характеристики	117
3.2.4	Влияние длины затвора на усиление (InAlGa)N/AlN/GaN НЕМТ.....	120
3.2.5	Сравнение граничных частот усиления AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN транзисторов.....	121
3.3	Основные результаты и выводы главы 3.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие мобильных и высокоскоростных средств телекоммуникаций обусловлено быстрым развитием приемно-передающих устройств СВЧ диапазона с полупроводниковыми приборами в качестве усилительных элементов. Повышение мощности, чувствительности к слабым сигналам и рост рабочей частоты этих устройств открыли возможности для постоянного улучшения основных параметров данных систем. Основными активными элементами данных систем являются монокристаллические интегральные схемы СВЧ диапазона, а активным усилительным элементом являются СВЧ транзисторы. Наиболее распространенным типом СВЧ транзисторов являются полевые транзисторы с затвором, образующим барьер Шоттки с полупроводником (ПТШ). Транзисторы, в которых проводящий канал формируется в эпитаксиальной гетероструктуре на границе раздела двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны, называются транзисторами с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, или НЕМТ – high electron mobility transistor). НЕМТ и биполярные гетероструктурные транзисторы являются основными активными компонентами современных СВЧ устройств, в которых необходимо иметь усиление СВЧ сигнала.

Для работы в миллиметровом (мм) диапазоне длин волн (30÷300 ГГц) конкурирующими являются арсенид галлия (GaAs), нитрид галлия (GaN) и фосфид индия (InP) [1,2]. Низкие напряжения пробоя, характерные для InP, ограничивают возможности создания мощных устройств на этом материале, оставляя для него область частот выше 100 ГГц, в которой благодаря высокой подвижности электронов усилительные свойства СВЧ транзисторов на основе InP остаются вне конкуренции, позволяя реализовывать СВЧ устройства небольшой мощности с рабочими частотами во всем мм-диапазоне и достигая максимальной частоты усиления по мощности более 1 ТГц [3–6]. Технологии метаморфных (М-НЕМТ) и псевдоморфных (Р-НЕМТ) транзисторов на основе GaAs близки к пределу в сво-

ем развитии, достигнув максимальной частоты усиления по мощности более 600 ГГц [7,8]. Удельная выходная мощность технологий на основе GaAs и InP для мм-диапазона значительно ниже 1 Вт/мм. В то же время НЕМТ на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN существенно расширили возможности приборов СВЧ-диапазона. Широкая запрещенная зона GaN обеспечивает возможность получения приборов с высоким напряжением пробоя, а высокая слоевая концентрация и подвижность электронов в канале позволяет расширить частотный диапазон НЕМТ. К настоящему времени технологии монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона на базе GaN широко применяются в устройствах с рабочими частотами до 30 ГГц. Сравнение достигнутого уровня рабочей частоты и мощности [1,2] с теоретическим пределом [9] показывает, что GaN технологии еще не достигли предельных параметров.

Степень разработанности темы. Повышение рабочей частоты GaN СВЧ-транзисторов сдерживается сложностями подавления паразитных эффектов, возникающих по мере уменьшения длины затвора транзистора, ограниченными электрофизическими параметрами гетероструктур для этого диапазона, невысокими электрическими и СВЧ-параметрами полученных приборов и их низкой надежностью. InAlN, InAlGaIn и AlN рассматриваются как альтернатива AlGaIn для применения в гетероструктуре НЕМТ. Имеющиеся данные о разработках СВЧ-НЕМТ на основе гетероструктуры InAlN/GaN показывают ее высокий потенциал для применения в различных частотных и мощностных диапазонах полупроводниковой СВЧ-электроники.

Работа посвящена решению проблем создания мощных СВЧ-транзисторов мм-диапазона на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaIn/AlN/GaN. Актуальность темы обусловлена 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. В работе демонстрируется принципиальная и практическая возможность получе-

ния таких СВЧ транзисторов, в которых значительно снижены основные эффекты, препятствующие получению высоких мощностных параметров СВЧ транзисторов мм-диапазона.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является выявление и усовершенствование технологических и конструктивных решений, позволяющих сформировать СВЧ транзисторы на основе $(\text{InAlGa})\text{N}/\text{GaN}$ для усилителей мм-диапазона длин волн.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

– исследовать методы формирования и разработать конструкцию высокоомного буферного слоя, обеспечивающего пространственную локализацию двумерного электронного газа в канале транзистора при максимальных напряжениях пробоя в транзисторе;

– разработать конструкции гетероструктур на основе $(\text{InAlGa})\text{N}/\text{GaN}$, обеспечивающих наилучшее сочетание параметров гетероструктуры и транзистора для мм-диапазона;

– исследовать низкочастотные и высокочастотные характеристики СВЧ $(\text{InAlGa})\text{N}/\text{GaN}$ транзисторы с различными конструкциями гетероструктуры, буферного слоя и длиной затвора;

– провести анализ устойчивости к воздействию температуры и влажности диэлектрических покрытий, используемых для пассивации СВЧ транзисторов.

Научная новизна работы.

1. Выявлено влияние толщины нелегированных 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 расстояние 0,2 и менее микрон приводит созданию под каналом транзистора со-

держающего 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 AlGaIn;

3. Обнаружено, что применение *in situ* пассивации нитридом кремния толщиной 5 нм позволяет снизить на порядок ток утечки затвор-сток в транзисторе на основе $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ 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 $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ и $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$, 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 $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ и $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ 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 $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ и $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaIn}$, включающие расположенный на расстоянии 0,5 мкм от канала легированный железом буферный слой GaIn, и 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.

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

Методология и методы исследования.

Результаты диссертации получены с применением комплекса экспериментальных метрологических (атомная силовая микроскопия (АСМ), 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. Использовались электрофизическое моделирование в программном комплексе Silvaco TCAD.

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 AlGaN/AlN/GaN гетероструктур с затвором длиной менее 0,15 мкм.

2. Легированный углеродом буферный слой GaN, приближенный к каналу AlGaN/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 AlGaN.

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.

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 сверхвысококачественных 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. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 7 научных конференциях.

Личный вклад Автором осуществлено планирование и проведение большей части экспериментальных исследований, проведен анализ и интерпретация полученных результатов, подготовка материалов исследований к публикации.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников. Содержит 144 стр. машинописного текста, 61 рисунка и 9 таблиц. Библиография включает 195 наименований.

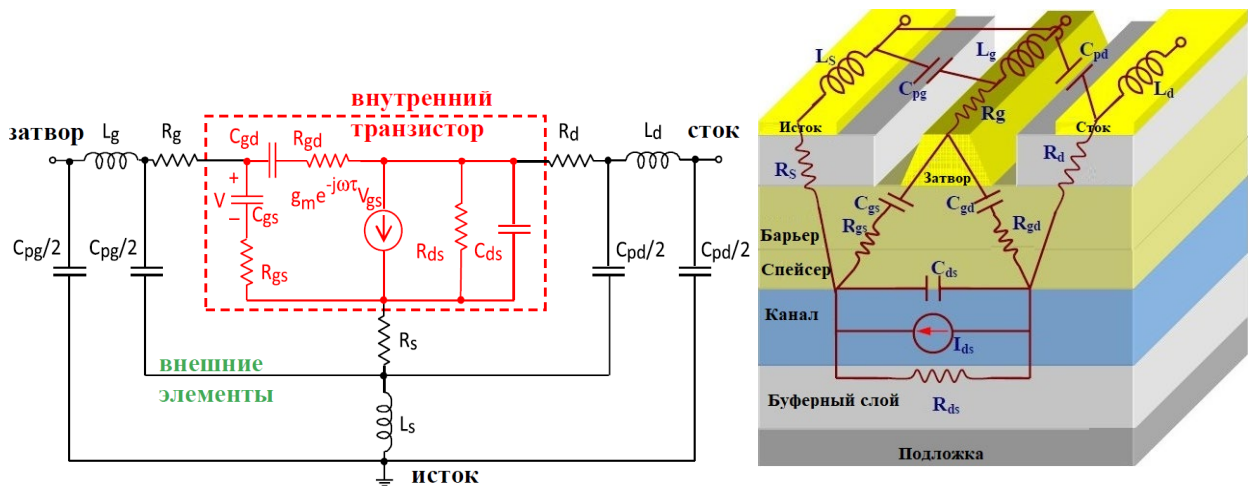
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ.

1.1 Основные пути повышения рабочей частоты и мощности СВЧ транзисторов

При выборе технических решений, направленных на повышение рабочей частоты и мощности СВЧ GaN НЕМТ мм-диапазона, проанализирована связь СВЧ параметров с конструктивными особенностями транзисторов, а также возможности улучшения электрофизических параметров эпитаксиальных гетероструктур. Используя измеренные малосигнальные параметры рассчитываются линейные модели транзисторов, описывающие их работу при небольших (сопоставимых с тепловой энергией электронов) входной и выходной мощностях. Малосигнальные параметры используются при создании нелинейной модели, описывающей поведение транзистора при работе в режиме с большой амплитудой входных и выходных сигналов. Малосигнальные параметры СВЧ транзисторов получают в ходе измерения параметров рассеяния – S параметров, из которых рассчитываются параметры транзистора, позволяющие охарактеризовать его работу в качестве усилителя [10,11]: коэффициент усиления по току (h_{21}), максимально доступный и максимально стабильный коэффициенты усиления по мощности (англ. maximum available/stable gain - MAG/MSG), коэффициент стабильности K , однонаправленный коэффициент усиления по мощности U . Частотные зависимости h_{21} , U и MAG/MSG используют для вычисления двух важнейших параметров, характеризующих СВЧ транзистор – максимальной частоты усиления по току f_t и максимальной частоты усиления по мощности f_{max} . Поскольку с ростом частоты h_{21} и MAG уменьшаются с наклоном 6 дБ/октаву, а MSG с наклоном 3 дБ/октаву, знание трех параметров транзистора – частоты, при которой коэффициент стабильности K равен единице, f_t и f_{max} позволяет оценить значения MAG, MSG и h_{21} для нужной частоты. На практике f_{max} , полученная экстраполяцией

зависимости $MAG/MSG(f)$ часто оказывается ниже f_{max} , полученной из зависимости $U(f)$, что является аргументом для использования значений MAG/MSG на выбранной частоте для характеристики транзисторов [12]. Важнейшими параметрами транзистора, определяемыми в режиме сигнала с большой амплитудой, являются удельная (на миллиметр ширины затвора) выходная мощность, коэффициент усиления по мощности, а также КПД по добавленной мощности (англ. Power Added Efficiency – PAE).

Для выявления связи СВЧ параметров с конструктивными и технологическими параметрами транзисторов используют эквивалентную схему НЕМТ, в которой учтены основные внутренние и внешние элементы транзистора (контактные площадки и другие элементы). Из измеренных S параметров рассчитываются параметры элементов эквивалентной схемы СВЧ НЕМТ (рисунок 1.1).



а)

б)

Рисунок 1.1 – Малосигнальная эквивалентная схема СВЧ НЕМТ: а) электрическая схема, б) электрическая схема, наложенная на поперечный срез транзистора [13]

Для упрощенных вариантов эквивалентной схемы используются аналитические выражения для h_{21} , f_t , MAG и f_{max} как для «внутреннего», так и для транзистора с внешними элементами [14]:

$$|h_{21}| = \left| \frac{i_{out}}{i_{in}} \right| = \left| \frac{(1+j\omega R_{gd}C_{gd})g_m e^{-j\omega\tau}}{j\omega(C_{gs}+C_{gd})-\omega^2 C_{gs}C_{gd}(R_{gs}+R_{gd})} \right| \cong \frac{g_m}{2\pi f(C_{gs}+C_{gd})} \quad (1.1)$$

где последнее выражение получается при допущении, что $\omega R_{gd}C_{gd} \ll 1$ и $\omega(C_{gs}+C_{gd}) \gg \omega^2 C_{gs}C_{gd}(R_{gs}+R_{gd})$. Для f_t выражение имеет вид [12]:

$$f_t = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs}+C_{gd})\left(1+\frac{(R_s+R_d)}{R_{ds}}\right)+g_m C_{gd}(R_s+R_d)} \cong \frac{g_m}{2\pi(C_{gs}+C_{gd})} \quad (1.2)$$

где g_m - внутренняя крутизна транзистора, связанная с внешней соотношением:

$$g_{ext} = \frac{g_m}{1+g_m R_s} \quad (1.3)$$

Для короткоканальных приборов, в которых электроны в канале движутся с насыщенной скоростью v_{sat} выражение для f_t можно записать через параметры гетероструктуры и транзистора, используя приближенное выражение [12]:

$$g_m \cong \frac{v_{sat}(C_{gs}+C_{gd})}{L_g} \quad (1.4)$$

где L_g - длина затвора а v_{sat} - насыщенная дрейфовая скорость электронов в канале транзистора. Приближенное выражение для f_t примет вид:

$$f_t \cong \frac{v_{sat}}{2\pi L_g} \quad (1.5)$$

MAG/MSG соответствуют максимальному коэффициенту усиления по мощности при согласовании на входе и выходе. При их расчете необходимо учитывать значение коэффициента стабильности K :

$$K = \frac{1+|S_{11}S_{22}-S_{12}S_{21}|^2-|S_{11}|^2-|S_{22}|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} \quad (1.6)$$

В случае $K>1$, транзистор безусловно устойчив и рассчитывается MAG:

$$MAG = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} (K - \sqrt{K^2 - 1}) \quad (1.7)$$

Если $K<1$, то для рассчитывается MSG:

$$MSG = G_T \max_{|k|=1} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| \quad (1.8)$$

Выражение для f_{max} через f_t имеет вид [12]:

$$f_{max} = \frac{f_t}{2 \cdot \sqrt{(R_{gs}+R_s+R_g)/R_{ds}+2\pi f_t R_g C_{gd}}} = \frac{f_t}{2 \cdot \sqrt{r_i+f_t \tau_3}} \quad (1.9)$$

где $r_i \equiv (R_{gs} + R_s + R_g)/R_{ds}$ – соотношение между входным и выходным сопротивлением и $\tau_3 = 2\pi R_g C_{gd}$.

Имеющие практическое значение для работы в конкретном диапазоне частот усилительные характеристики транзистора, такие как h_{21} и MSG могут быть найдены из рассчитанных или измеренных значений коэффициента стабильности K и предельных частот f_t и f_{max} . Из выражений, связывающих их с параметрами эквивалентной схемы транзистора следует ряд выводов, которые следует учитывать при разработке конструкции СВЧ транзистора:

1. Основным путем увеличения рабочей частоты внутреннего транзистора является увеличение f_t за счет увеличения отношения v_{sat}/L_g .

2. Для повышения 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 (уменьшая расстояние затвор-канал, ограничивая растекание тока и утечку в буферном слое). Профиль затвора должен обеспечивать минимальное сопротивление при минимальной емкости затвор-сток.

3. Оптимизация конструкции необходима для получения одновременно высокого напряжения пробоя, низких емкостей и сопротивлений затвор-исток и затвор-сток (C_{gs} , C_{gd} , R_d , R_s).

4. Для получения высокой выходной мощности конструкция транзистора должна обеспечивать максимальный диапазон выходного тока и выходного напряжения. Из-за снижения рабочего напряжения в короткоканальных (<0,25 мкм) затворах необходимо повышать максимальный ток гетероструктуры.

Технологические и конструктивные 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 значительным изменениям в электрических полях в полупровод-

никовой гетероструктуре и должны рассматриваться совместно с выбором и изменениями конструкции гетероструктуры. Понимание механизмов, влияющих на транспортные свойства 2DEG, имеет важное значение для выбора путей повышения СВЧ характеристик транзисторов.

1.2 Электрофизические свойства системы материалов (InAlGa)N/GaN, используемые при применении в мощных СВЧ транзисторах

Сочетание широкой запрещенной зоны, высокой концентрации носителей заряда обеспечивает системе материалов (InAlGa)N/GaN высокие напряжения пробоя и высокую плотность тока в транзисторах (Таблица 1.1) [15–17]. Высокая теплопроводность GaN и SiC позволяет создавать мощные СВЧ транзисторы с параметрами, превышающими соответствующие параметры НЕМТ на основе кубических полупроводников во всех диапазонах частот, в которых GaN НЕМТ могут демонстрировать достаточный уровень усиления.

Сравнительная оценка диапазона использования различных систем материалов для усиления СВЧ мощности [1,18,19], показывает, что GaN может применяться в СВЧ диапазонах от нескольких ГГц более чем 100 ГГц в устройствах с выходной мощностью до сотен ватт. Сравнение дрейфовой скорости ряда полупроводниковых материалов, используемых для создания СВЧ-приборов [16,20–22], показывает, что по величине дрейфовой скорости электронов GaN, InN и AlN, а также 2DEG в AlGaN/GaN гетероструктуре превосходят структуры на основе Si, SiC, InP, GaAs, уступая только InGaAsP и InSb.

Таблица 1.1 Сравнение основных электрофизических параметров наиболее распространенных полупроводниковых материалов, используемых для создания СВЧ-приборов [15].

Основные параметры полупроводниковых соединений	Si	AlGaAs/ InGaAs	SiC	AlGaN/ GaN	Гетероструктуры на основе InP
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	1,4	3,2	3,4	1,35
Подвижность электронов, см ² /В·с	1350	8500	700	2000	10 000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, $\times 10^7$ см ²	1,0	2,0	2,0	2,5	2,3
Концентрация электронов области 2D-электронного газа, см ⁻²	-	$3 \cdot 10^{12}$	-	$1 \div 2 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{12}$
Критическая напряженность электрического поля, МВ/см	0,3	0,4	2,0	3,3	0,5
Теплопроводность, Вт/см·К	1,5	0,5	4,5	1,3	0,7

Механизмы рассеяния электронов в GaN включают рассеяние на поверхностных донорных центрах [23], фоновых примесях [24]; акустическое фононное рассеяние; рассеяние на потенциале деформации, возникающем из-за полей деформации вокруг дислокаций [25]; рассеяние на шероховатости границы раздела гетероперехода AlGaN/GaN а также сплавное рассеяние вследствие проникновения волновой функции электрона в барьер AlGaN, рассеяние на оптических фононах. При низких температурах подвижность ограничивает рассеяние на шероховатости гетерограницы и сплавное рассеяние [26,27]. При комнатной температуре и напряженности электрического поля менее 100 кВ/см доминирует полярное оптическое рассеяние фононов [28,29]. С ростом поля часть электронов переходит в верхние долины зоны проводимости и скорость дрейфа уменьшается. Относительно низкая подвижность электронов в GaN может компенсироваться выбором конструкции и режимом работы приборов, позволяющими работать в сильных электрических полях, при которых скорости дрейфа близки к их максимуму.

Основной элемент конструкции НЕМТ – гетеропереход материалов с разной шириной запрещенной зоны, создающий условия для возникновения в области гетероперехода двумерного электронного газа (англ. two-dimensional electron gas – 2DEG). В отличие от гетероструктур на основе GaAs и InP, спонтанная и пьезоэлектрическая поляризация в (InAlGa)N/GaN гетероструктурах позволяют

получать высокую концентрацию носителей в 2DEG без легирования (рисунок 1.2).

Различная электроотрицательность металлов третьей группы делают различной спонтанную поляризацию в AlN, GaN, InN и твердых растворах на их основе. Несоответствие параметров кристаллической решетки приводит к возникновению механических деформаций растяжения или сжатия в гетероструктурах (In,Al,Ga)N/GaN, в результате возникает пьезоэлектрическая поляризация. Выбирая сочетания материалов, можно создавать гетероструктуры с заданным направлением упругих напряжений, а также без напряжений [30].

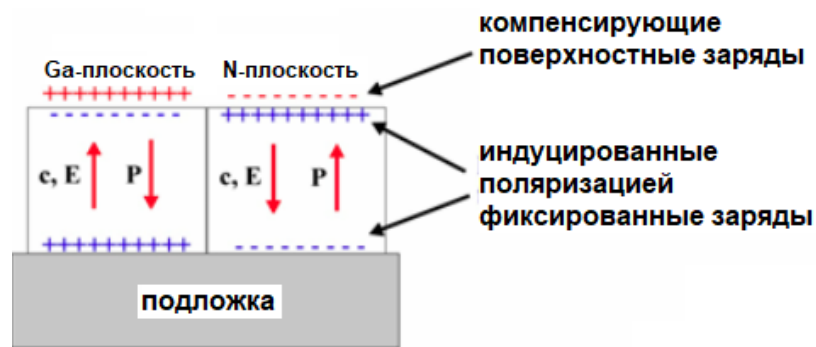


Рисунок 1.2 – Формирование наведенных поляризацией зарядов для азотной и галлиевой плоскостей в GaN [31]

В нелегированной гетероструктуре AlGaIn/GaN формирование 2DEG объясняется донорными состояниями на поверхности AlGaIn [23]. Электроны накапливаются на границе гетероперехода и образуют 2DEG. Распределение зарядов в гетероструктуре AlGaIn/GaN с Ga-поляризованностью показано на рисунке 1.3.

Заряды спонтанной (σ_{sp}) и пьезоэлектрической (σ_{pz}) поляризации присутствуют в слоях GaN и AlGaIn. На поверхности имеется заряд σ_m , его концентрация равна n_s – слоевой концентрации заряда в 2DEG.

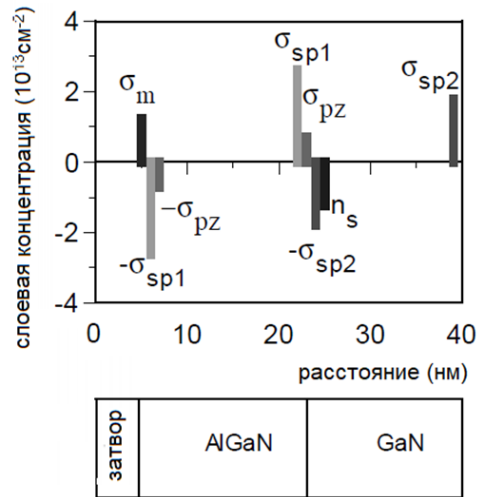


Рисунок 1.3 – Распределение зарядов спонтанной (σ_{sp}), пьезоэлектрической (σ_{pz}) поляризации, поверхностных зарядов (σ_m) и заряда в 2DEG (n_s) в гетероструктуре AlGaN/GaN с Ga-полярностью [32]

Поляризационные заряды в AlN и InAlN значительно больше, чем в GaN, что обеспечивает более высокую концентрацию в 2DEG в InAlN/GaN и InAlGaN/GaN, позволяя увеличить плотность тока в СВЧ транзисторах [33,34]. Сопоставимая с AlGaN/GaN гетероструктурами радиационная стойкость делает InAlN/GaN альтернативой AlGaN/GaN в устройствах космического применения [35].

1.3 Конструкции гетероструктур на основе GaN для СВЧ транзисторов

1.3.1 Гетероструктуры на основе AlGaN/GaN

Верхняя часть гетероструктуры образует с металлом затвора барьер Шоттки. В транзисторах, предназначенных для диапазона до 20 ГГц, для повышения надежности часто используют AlGaN с низким содержанием алюминия (не более 22%). В $Al_{0,19}GaN$ толщиной около 24 нм не происходит релаксация механических напряжений, в то время как для AlGaN с содержанием Al 29% эта толщина составляет примерно 15 нм (что меньше типичной толщины барьерного слоя для

HEMT, рассчитанных на применение до 18 ГГц) [36]. Превышение критической толщины является условием для деградации полупроводника в сильных электрических полях за счет пьезоэлектрического эффекта [37]. Конструкции мощных транзисторов мм-диапазона должны иметь тонкий барьерный слой (≈ 10 нм), поэтому для поддержания высокой концентрации в 2DEG используют структуры с высоким (28-40%) содержанием алюминия в AlGaN [38–40].

Использование тонкой ($1\div 3$ нм) вставки AlN или $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ между барьерным и каналным слоем было применено в работах [41,42], позволило увеличить разрыв зон на гетерогранице и снизить сплавное рассеяния за счет большей локализации волновой функции электронов в слое канала GaN. Концентрация и подвижность в 2DEG увеличились для $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ с $n_s = 1,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $\mu = 1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ до $n_s = 1,65 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $\mu = 1716 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ [43]. Несмотря на большую напряженность электрического поля, данные о влиянии вставки AlN на надежность приборов ограничены данными о деградации AlN при протекании прямого тока в барьере Шоттки [44] и данными о ловушках в нем [45].

Для минимизации влияния поверхностных состояний на параметры HEMT поверх барьерного слоя часто располагают слой GaN, обеспечивающий увеличение высоты барьера Шоттки в GaN/AlGaN/GaN гетероструктуре, а также критическое напряжение, при котором начинается рост утечки барьера Шоттки в ходе испытаний [46,47]. Поверхностный GaN слой уменьшает эффект коллапса, связанный с поверхностными состояниями, улучшает линейность транзистора [48] и предотвращает окисление слоя AlGaN при контакте с атмосферой в ходе технологических процессов формирования затвора транзистора.

1.3.2 Конструкции буферного слоя

Проводящий канал GaN HEMT выращивают на толстом буферном слое – высокоомном GaN-слое, нелегированном или легированном глубокими примесями, компенсирующими типичную для эпитаксиальных GaN слоев электронную

проводимость. Буферный слой должен обеспечивать надежную электрическую изоляцию активных элементов транзистора или СВЧ МИС друг от друга, а также обеспечивать отсутствие утечки и пробоя в транзисторе в закрытом состоянии во всем диапазоне напряжений на стоке. С технологической точки зрения, буферный слой обеспечивает при эпитаксии плавный переход от подложки к более совершенной кристаллической структуре канала.

Эпитаксиальный рост транзисторных гетероструктур (InAlGa)N/GaN возможен на различных материалах подложек, свойства которых приведены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры материалов подложек для роста GaN.

Подложка	Рассогласование кристаллической решетки с GaN (%)	Несоответствие коэффициентов теплового расширения (ТКР) (%)	Коэффициент теплопроводности при 300 К (Вт/см·К)
GaN	0	0	1,3
SiC	3,6	50	4,55
Al ₂ O ₃	14	34	0,35
Si	17	53	1,54

Высокая теплопроводность SiC обеспечивает ему широкое применение в мощных СВЧ транзисторах и МИС. Подложки GaN пока не нашли широкого применения в технологии СВЧ транзисторов и МИС из-за отсутствия материала большого диаметра и высокого качества. Низкая теплопроводность Al₂O₃ ограничивает его применение в технологии мощных транзисторов. Подложки SiC и Si являются основными материалами для производства СВЧ GaN устройств. Проблемы, связанные со параметрами буферных слоев, характерны как для слоев GaN, выращенных на Si, так и для слоев на Al₂O₃ или SiC. Наиболее значительная проблема – фоновая концентрация носителей заряда (электронов) в нелегированных буферных слоях, приводящая к возникновению тока утечки и снижению напряжения пробоя. Причины появления фоновой проводимости связывают с примесями C, Si и O, а также с дефектами (прежде всего с вакансиями азота) в GaN. Основной причиной проводимости n-типа в GaN считаются атомы кислоро-

да [49–52]. Механическое (растягивающее) напряжение в слое GaN также влияет на формируемые при росте дефекты. Измерения с помощью вторичной ионной масс-спектропии (англ. secondary ion mass spectrometry – SIMS) показали, что уменьшить концентрацию C, Si и O намного ниже уровня 10^{17} см^{-3} в толстых слоях GaN крайне сложно. Использование зародышевого слоя AlN позволяет снизить механические напряжения и уровень примесей в буферном слое GaN [53]. В настоящее время для уменьшения тока утечки и эффектов короткого канала в буферный слой вводят глубокие акцепторные уровни за счет собственных дефектов, либо за счет внешних легирующих примесей, таких как железо (Fe) или углерод (C) [54]. Альтернативой легированию могут быть конструкции буферного слоя из AlGaN (гетероструктура с двойным гетеропереходом AlGaN/GaN/AlGaN), обеспечивающая эффективную пространственную локализацию электронов в канале (рисунок 1.4). Однако наличие толстого буферного слоя AlGaN отрицательно влияет на теплопроводность всей структуры из-за значительно (более чем на порядок) более низкой теплопроводности AlGaN по сравнению с GaN [55,56].

Также применяется конструкция буферного слоя на основе GaN с вставкой из слоя AlGaN. В ней необходимо учитывать возможность возникновения паразитных n или p каналов у нижней и верхней границы AlGaN, при этом мольная доля Al для таких слоев AlGaN варьируется от 3 до 30%. Применяются барьеры на основе тонкой (несколько нм) вставки из InGaN и с достаточно толстыми (больше 50 нм) слоями AlGaN ($X_{\text{Al}} < 10\%$) [57–65].

Глубокие центры захвата носителей заряда (ловушки) были обнаружены во всех типах буферных слоев. Некоторые ловушки характерны для образцов, легированных определенными примесями. Так, для легированных железом образцов наблюдаются ловушки с энергиями активации $0,23 \div 0,45 \text{ эВ}$ и $0,53 \div 0,7 \text{ эВ}$ [66,67]. Для легированных углеродом – центры C_{Ga} и C_{N} , а также комплексы типа $C_{\text{N}}-V_{\text{Ga}}$.

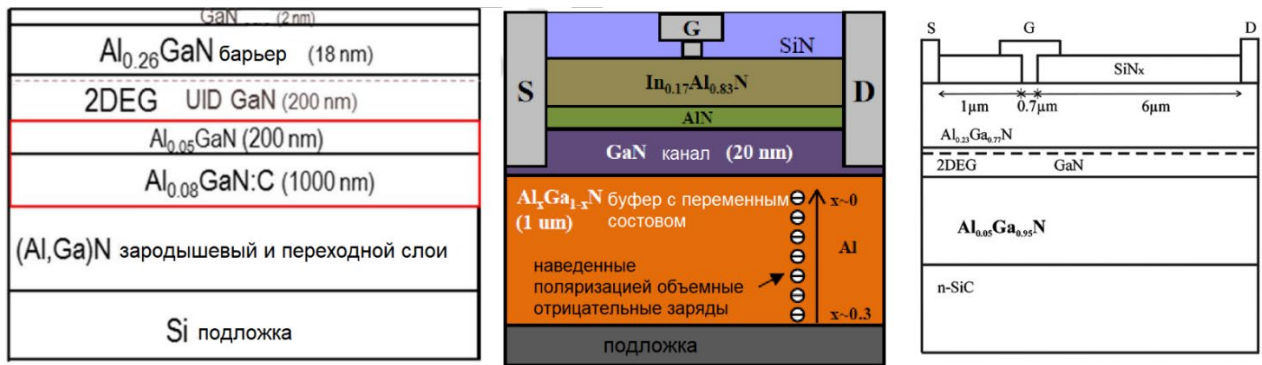


Рисунок 1.4 – Варианты конструкций с буферными слоями AlGaN, расположенными под GaN каналом: легированный углеродом $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$, $\text{Al}_{0,3\dots0}\text{Ga}_{0,7\dots0}\text{N}$ буферный слой с переменным составом, нелегированный $\text{Al}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}$ буферный слой [57,68,69]

Приводимые в различных публикациях данные о спектре ловушек не всегда выявляют однозначную связь того или иного уровня с определенным типом дефектов кристаллической решетки [70–73]. Рассматриваются также ловушки, приписываемые собственным дефектам. Так, с V_N связывают уровни с энергией активации $0,06 \div 0,2$ эВ, $0,37$ эВ, $0,18 \div 0,19$ эВ [74]. Краевые и винтовые дислокации с центрами с энергией активации $0,18 \div 0,19$ эВ. Междоузельные дефекты азота (N_i) и галлия (Ga_i), пронизывающие дислокации создают ряд глубоких центров захвата с энергиями активации $0,5 \div 1,5$ эВ, что оказывает существенное влияние на подавление фоновой проводимости буферных слоев [53,75].

Важным свойством легированных образцов GaN является профиль легирования выбранной примесью. Эксперименты с углеродом показали, что по крайней мере для диапазона $10^{17} \div 10^{18}$ см^{-3} можно получить резкий профиль легирования по толщине образца, выбирая режим по температуре и давлению в реакторе [76,77]. При легировании железом профиль легирования зависит только от давления прекурсора и не отличается резкими границами [72,78,79], спадая после выключения прекурсора на два порядка по концентрации на толщине $0,4 \div 0,6$ мкм за счет поверхностной сегрегации железа [80,81]. Сравнение СВЧ транзисторов для мм-диапазона, изготовленных с использованием легирования буферного слоя уг-

леродом и буферным слоем на основе AlGaN, проведенное в работе [82] показало, что легированные углеродом буферные слои позволяют транзисторам демонстрировать более высокие плотности тока, f_t , f_{max} и усиления.

Эпитаксия буферного слоя должна учитывать влияние дефектов в GaN на проводимость. В ранних работах утверждалось, что краевые дислокации формируют глубокие акцепторные ловушки, способствуют захвату электронов, снижая проводимость слоя [83]. В последующих работах было показано, что глубокие центры, формируемые винтовыми и краевыми дислокациями, создают пути для проводимости в нитриде галлия, а снижение плотности дислокаций обеспечивает рост высокоомного материала [83].

Производители эпитаксиальных гетероструктур и СВЧ транзисторов не раскрывают конструкции и режимы роста буферных слоев, поскольку эта конструкция во многом определяет параметры изготавливаемых СВЧ транзисторов, и имеет отличия для каждого частотного диапазона. Выбор конструкции буферного слоя для СВЧ транзисторов мм-диапазона представляет собой комплексную задачу, для решения которой для каждого требуемого диапазона частот должны быть проведены эксперименты с различными вариантами конструкций буферного слоя, и на основании анализа результатов выбраны оптимальные параметры конструкций. При выборе конструкции необходимо, помимо требований к проводимости и напряжению пробоя, учитывать влияние типа и концентрации ловушек в буферном слое на эффекты, проявляющиеся на импульсной вольт-амперной характеристике (ВАХ) транзистора и влияющие на его СВЧ параметры.

1.3.3 Эффекты, влияющие на выбор конструкции

1.3.3.1 Коллапс тока

Одна из существенных проблем GaN технологии, долго препятствовавшая достижению высоких параметров транзисторов – нестабильность тока стока, от-

меченная уже у первых GaN-транзисторов. Резкое падение тока стока при достижении определенных значений напряжения на стоке V_{ds} было названо коллапсом тока. Он проявлялся также при переключении транзистора из закрытого состояния (при $V_{gs} < V_t$ и большом V_{ds}) в открытое (при $V_{gs} > V_t$) снижением тока и увеличением сопротивления R_{on} в транзисторе при подаче на вход сигнала большой амплитуды. Уменьшение тока, наблюдаемое на импульсной ВАХ в зависимости от длины импульса и выбора напряжений точки покоя между импульсами (рисунок 1.5 а) [84], является одним из проявлений эффекта коллапса тока. Помимо коллапса тока, в транзисторах наблюдалось ухудшение СВЧ параметров на высокой частоте (“дисперсия тока”) несмотря на хорошие статические характеристики. Еще один тип нестабильности – эффект задержки (запаздывания) затворного и стокового сигнала (англ. – gate lag и drain lag) – длительные переходные процессы в транзисторе (задержке) на временной зависимости тока стока в импульсном режиме при переключении напряжения на затворе, переводящего транзистор из закрытого в открытое состояние транзистора (gate lag) и при переключении напряжения на стоке между большими и маленькими напряжениями (drain lag). Эффект сдвига напряжения насыщения (англ. – knee walkout), наблюдаемый при работе транзистора в режиме большого сигнала, также связан с коллапсом (рисунок 1.5 б) [85].

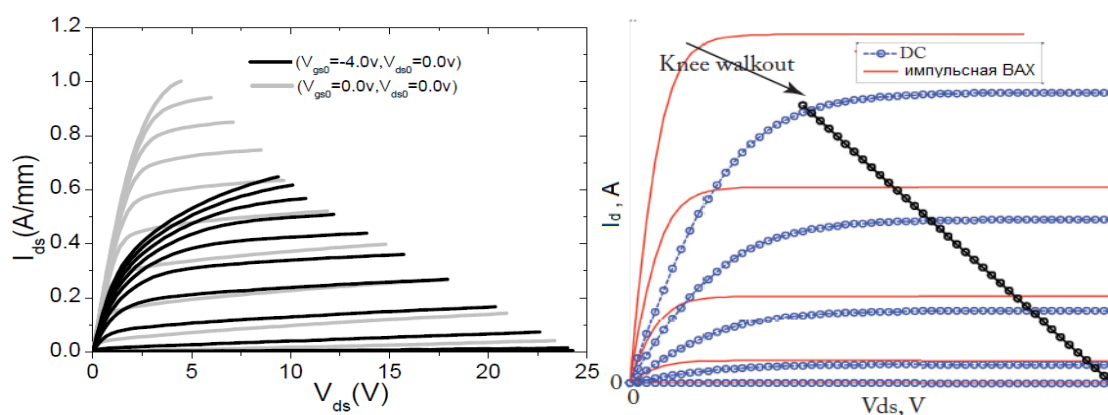


Рисунок 1.5 – ВАХ транзисторов с коллапсом тока: а) в зависимости от точки покоя между импульсами, б) различия между статической и импульсной ВАХ – эффект «knee walkout»

Коллапс тока растет с ростом мольной доли алюминия в барьерном AlGaN [40], что свидетельствует о том, что эффекты коллапса, сдвига напряжения насыщения, затяжек затвора и стока связаны с захватом электронов ловушками, находящимися на поверхности в области затвор-сток, затвор-исток и в объеме буферного слоя GaN [86,87]. Ловушки между затвором и стоком, заряжаясь, образуют «виртуальный затвор», уменьшают ток и увеличивают напряжение насыщения в транзисторе. Виртуальный затвор имеет медленное время отклика из-за относительно длительного времени выброса носителей заряда в ловушках. При высокочастотной модуляции этот «виртуальный затвор» не может следовать за модуляцией переменного тока и остается постоянно заряженным, снижая плотность электронов в 2DEG под затвором.

Для количественной оценки эффекта коллапса тока (Current Collapse, CC) рассчитывается соотношение между токами стока в режиме без коллапса и током стока в режиме с коллапсом:

$$CC (\%) = \frac{I_d(V_g=0, V_d>0, QP(0,0)) - I_d(V_g=0, V_d>0, QP(V_{gq}, V_{dq}))}{I_d(V_g=0, V_d>0, QP(0,0))} (\%) \quad (1.10)$$

где QP (quiescent point) – точка покоя, соответствующая подаваемому между импульсами напряжению на транзистор, $I_d(V_g = 0, V_d > 0)$ – ток транзистора, измеренный для напряжения на стоке V_d (как правило, выбирается точка в диапазоне 5÷20 В, больше напряжения насыщения, но достаточно далеко от максимально допустимых напряжений в транзисторе) при нуле на затворе. Для измерения коллапса тока точка покоя выбирается исходя из условий $|V_g| > |V_t|$ и $V_d > 0$. Рассчитанная по формуле 1.10 величина CC соответствует режиму измерения «gate lag», если точка покоя выбирается с напряжением на затворе, несколько большим по модулю, чем напряжение отсечки транзистора V_t ($|V_g| > |V_t|$) и $V_d = 0$ и «drain lag» (при этом точка покоя выбирается с $V_g = 0$ и $V_d > 0$). В точке покоя, соответствующей режиму измерения «drain lag», на сток подается высокое напряжение, из-за чего электроны в транзисторе могут быть захвачены ловушками, распо-

ложенными в глубине буферного слоя [88]. В режиме измерения «gate lag» электроны могут быть захвачены на ловушки, расположенные на поверхности, в барьерном слое InAlN или AlGaN, или вблизи области канала транзистора [89]. Для количественной оценки коллапса, помимо тока, сравнивают сопротивления транзистора в открытом состоянии R_{on} . Пассивация поверхности нитридом кремния (Si_3N_4) позволяет в значительной мере решить проблему коллапса, благодаря чему она стала широко применяться в технологии. Заряд в Si_3N_4 связывает поверхностные ловушечные состояния (уровень энергии ловушек $E_l = 1,8$ эВ).

Для подавления коллапса, вызванного ловушками в глубине полупроводника, необходимо оптимизировать конструкцию буферного слоя. На коллапс тока, вызываемый глубокими центрами захвата носителей внутри буферного слоя, оказывает влияние концентрация, профиль легирования и вводимое вещество. Fe-легирование буферного слоя GaN приводит закреплению уровня Ферми к верхней половине запрещенной зоны. Углерод как примесь с промежуточной валентностью при малых концентрациях выступает как мелкий донор, но при высоких концентрациях начинается самокомпенсация, в результате уровень Ферми фиксируется в нижней половине, что вызывает существенный коллапс тока [90–92]. Удаление легированного углеродом или железом буферного слоя от канала снижает коллапс, но снижает напряжение пробоя. Приближение примеси в буферном слое к каналу, подавляя утечку, приводит к увеличению коллапса тока. Поскольку коллапс определяется спектром и расположением ловушек, он меняется в зависимости от состава буферного слоя: коллапс в структуре с нелегированным буферным слоем AlGaN отличается от коллапса в транзисторах с легированным буферным слоем GaN [93].

Помимо профиля легирования, на величину коллапса оказывает влияние конфигурация электродов транзистора. Использование полевого электрода (англ. field plate – FP) приводит к снижению электрического поля на краю затвора, однако в результате снижаются f_t , f_{max} и MAG/MSG. Снижение электрического поля уменьшает заброс высокоэнергичных электронов на ловушки в буферном слое,

что приводит к уменьшению вклада в коллапс тока этого типа ловушек [88]. Расположение FP между затвором и стоком уменьшает заряд поверхностных ловушек между затвором и стоком [94–96]. Различают два варианта конструкции FP: истоковый и затворный, и их сочетания (двойной FP). Двойной FP является типичным решением, используемым в СВЧ транзисторах, однако для мм-диапазона он не применяется из-за увеличения затворных емкостей. В затворном FP шляпа затвора сдвинута в сторону стока, что уменьшает коллапс за счет снижения вклада в него буферных и поверхностных ловушек.

Для уменьшения коллапса тока необходимо удалять легированные слои от канала. Для уменьшения тока утечки в транзисторе и увеличения напряжения пробоя необходимо, напротив, приближать легированные углеродом или железом слои к каналу транзистора, что может привести к ухудшению СВЧ характеристик из-за присутствия в канале примеси p-типа (Fe).

1.3.3.2 «Kink» эффект

Одним из связанных с ловушками эффектов, приводящих к значительному ухудшению СВЧ параметров транзистора, является «kink» эффект (англ. kink – перегиб) – наблюдаемое на ВАХ транзистора резкое увеличение тока стока при достижении определенного напряжения на стоке (рисунок 1.6). Эффект наблюдается в транзисторах, изготовленных на Si, InP, GaAs. В полупроводниках с узкой запрещенной зоной этот скачок связывают с накоплением дырок, создаваемых ударной ионизацией. В гетероструктурах AlGaIn/GaN он также связывается с ударной ионизацией [97], а также с эффектами захвата носителей ловушками [98–100]. Тем не менее, точное положение задействованных ловушек (буферный слой, барьерный слой или поверхность транзистора) однозначно не выяснено. Сравнение импульсных и статических ВАХ транзисторов, наблюдаемых при комнатной и пониженных температурах, показало, что «kink» эффект сильнее проявляется при пониженной температуре, что связывают с увеличением подвижности элект-

тронов и, как следствие, скорости ударной ионизации, приводящей к генерации дырок, частично компенсирующих отрицательный заряд на поверхности [101,102]. Коллапс при понижении температуры должен также возрасти, что связано с ловушечной природой этого эффекта, но в работе [102] показано, что коллапс меньше проявляется при низкой температуре. Это было объяснено эффектом маскировки снижения тока из-за коллапса другими эффектами, приводящими к росту тока, в частности, компенсацией отрицательного заряда на поверхности между затвором и стоком за счет генерации дырок при ударной ионизации. Показана возможность объяснения этого эффекта исключительно присутствием в барьерном слое и в буфере глубоких ловушек с разным временем захвата носителей за счет дефектов, внесенных реактивным ионным травлением щели в SiN_x во фторной плазме [103]. В работе [104] в транзисторах, изготовленных по трем различным технологическим процессам на двух одновременно группах эпитаксиальных пластин от двух различных производителей «kink» эффект наблюдается только в партии от одного из производителей эпитаксиальных структур вне зависимости от техпроцесса. Объединение двух источников «kink» эффекта предложено в работе [105], где предположено, что освобождение электронов из ловушек в барьерном слое происходит за счет ударной ионизации. «Kink» эффект наблюдается на ВАХ при больших, чем для коллапса, напряжениях на стоке. Кроме того, «kink» эффект проявляется только после приложения напряжения на сток, достаточного для захвата электронов ловушками. При измерении ВАХ на меньших напряжениях на стоке «kink» эффект не появляется (рисунок 1.6) [105], а также проявляется по-разному в зависимости от направления изменения напряжения на стоке (при $\Delta V_{ds} < 0$ «kink» эффект проявляется сильнее) [106], [107].

Фотолюминесценции в желтом диапазоне спектра (YL) была предложена в работе [104] и успешно использовалась для скрининга выращенных эпитаксиальных пластин для пластин с нелегированным буферным слоем на связанные с «kink» эффектом ловушки. Однако она не показала корреляции с «kink» эффектом в Fe-легированных AlGaN/GaN HEMT [108], что дает основания считать, что в

«kink» эффекте задействованы более сложные процессы захвата на ловушках. Предположение о связи «kink» эффекта с мелкими ловушечными уровнями ($E_a=60$ мэВ), появляющимися из-за вакансий азота, было обосновано в работе [109]. Напротив, в работе [110] представлена модель «плавающего» буфера, описывающая «kink» эффект и гистерезис ВАХ легированных железом AlGaIn/GaN НЕМТ.

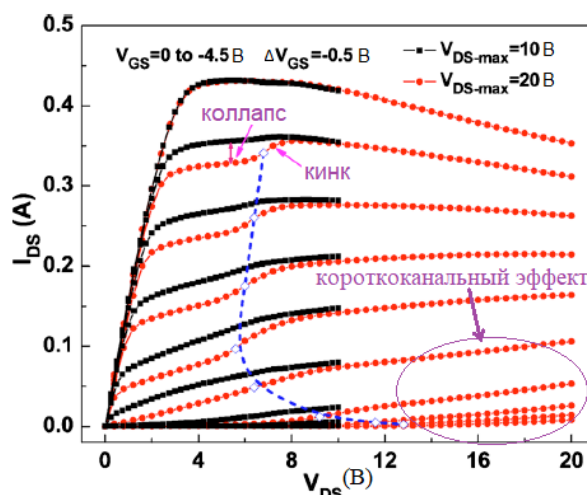


Рисунок 1.6 – ВАХ транзистора с обозначенными областями «kink» эффекта (область выделена пунктиром) и коллапса. «Kink» эффект появляется на ВАХ, измеренной до $V_{ds}=20$ В, и не появляется на ВАХ, измеренной до $V_{ds}=10$ В [105]

Непреднамеренное легирование углеродом при эпитаксиальном росте гетероструктуры может привести к образованию GaN-буфера р-типа. В работе показано, что утечка за счет обратного напряжения смещения между 2DEG и буферным слоем р-типа может обеспечить механизм для инжекции дырок и разрядки буфера. Для пластин с AlGaIn/GaN НЕМТ с различным фоновым уровнем углерода «kink» эффект резко отличается. Наблюдаются переходные процессы тока утечки положительной и отрицательной величины с энергией активации 0,9 эВ, что соответствует акцепторному уровню углерода в области буфера GaN. Ток дырок для зарядки буфера возникает прежде всего из-за утечки с помощью захвата на ловушки, а не через ударную ионизацию. Предположение о влиянии примеси

углерода на «kink» эффект подтверждается при сравнении ВАХ транзисторов с Fe- и C-легированием буферного слоя [111]. Близкие к профилю спада концентрации железа, ступенчатый и экспоненциальный профиль легирования углеродом вблизи канала приводят к значительному увеличению как «kink» эффекта, так и коллапса тока [111].

Несмотря на различия в объяснениях и моделях «kink» эффекта, можно считать не подлежащей сомнению его зависимость от конструкции гетероструктуры, выбранных профилей легирования и концентрации углерода в буферном слое.

1.3.3.3 Короткоканальный эффект

Уменьшение длины затвора в НЕМТ и повышение рабочего напряжения могут привести к появлению эффекта короткого канала. При уменьшении длины затвора изменяется распределение потенциала под затвором, и, если не уменьшать пропорционально толщину барьерного слоя, характер распределения поля под затвором изменяется и затвор в результате не может управлять проводимостью канала так же эффективно, как и в случае длинного канала транзистора (рисунки 1.7 а, б). Если одновременно с уменьшением длины затвора уменьшать расстояние затвор-канал, то характер распределения потенциала не меняется (рисунки 1.7, в). В GaAs транзисторах короткоканальный эффект подавляется при аспектном соотношении $L_g/d \geq 5$ [112]. Для GaN НЕМТ допустимое минимальное аспектное соотношение, приводимое в различных работах, находится в диапазоне $5 \div 15$ [56,110,111]. Уменьшение толщины барьерного слоя налагает дополнительные требования к барьеру Шоттки, поскольку увеличение тока утечки через затвор и снижение напряжения пробоя затвор-сток может свести на нет положительный эффект от подавления короткоканального эффекта.

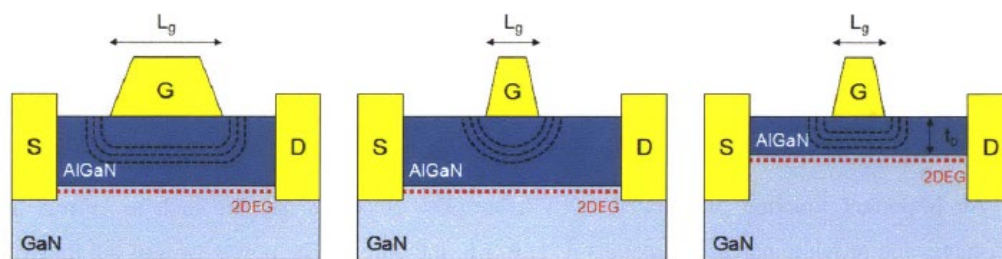


Рисунок 1.7 Распределение потенциала в транзисторах с длинным (а) и короткими (б, в) затворами [14]

Короткоканальный эффект приводит к увеличению выходной проводимости транзистора при росте напряжения на стоке, при этом напряжение отсечки снижается, как при утечке в буферном слое (рисунок 1.6) [61]. Вблизи отсечки транзистора по мере роста рабочего напряжения вертикальная составляющая электрического поля и увеличение горизонтальной составляющей электрического поля в коротком канале приводят к вытеснению электронов в область буферного слоя и возникновению неуправляемого тока. Для уменьшения этого эффекта необходимо обеспечить пространственную локализацию носителей заряда в канале транзистора.

В короткоканальных транзисторах на растекание тока стока в буферные слои влияет также эффект снижения барьера, вызванного напряжением на стоке (drain-induced barrier lowering, DIBL). В работе [115] был приведен расчет, показывающий, что для $L_g=0,17$ мкм недостаточно иметь изолирующий буферный слой, а необходимо иметь в нем концентрацию акцепторов не ниже 10^{17} см⁻³ для подавления данного эффекта.

При уменьшении длины затвора может быть реализован баллистический пролет носителей, для этого расстояние для пролета должно позволять пролет без рассеяния и должны быть достигнуты значения напряженности электрического поля в канале, необходимые для достижения пикового значения дрейфовой скорости носителей. В этом режиме параметры транзистора будут значительно отличаться от параметров в других режимах работы. По мере увеличения напряжения

будут создаваться условия для междолинного рассеяния электронов и образования области, где движутся электроны с большей эффективной массой. В GaN транзисторах с $L_g \leq 120$ нм электронов, движущихся в Γ долине, будет больше чем в транзисторах с длинным каналом. Этот эффект компенсирует снижение выходного сопротивления за счет ухудшения управляемости канала затвором. Однако снижение подвижности негативно сказывается на СВЧ усилении в этих режимах [40,116]. Формирование дефектов высокоэнергетичными электронами, может происходить как в барьерных, так и в буферных слоях, в особенности если в гетероструктуре отсутствует барьер для проникновения таких электронов в буферный слой [117–119].

1.3.4 Технологии пассивации транзисторов

Основное назначение пассивации в СВЧ транзисторах – защита рабочей области прибора от внешней среды. Обработка поверхности и выбор диэлектрика должны учитывать типичный спектр поверхностных ловушек, формируемых при пассивации. С повышением рабочей частоты транзисторов требования к качеству пассивации и поверхностным ловушкам ужесточаются, т.к. уменьшается толщина барьерного слоя в СВЧ транзисторе и влияние поверхностных зарядов на проводимость канала увеличивается.

В GaN на поверхности расположены донорные состояния, обеспечивающие при ионизации канал транзистора подвижными электронами. Без пассивации они могут захватывать электроны и уменьшать тем самым заряд носителей в двумерном электронном газе, снижая ток стока и СВЧ мощность транзистора. Источником свободных электронов в этом случае является затвор с барьером Шоттки, в котором при обратном смещении протекает небольшой по величине ток утечки, обусловленный туннелированием [120]. Пассивация поверхности GaN НЕМТ связывает поверхностные ловушечные состояния, ограничивая эффект коллапса, замедляет разрушающее воздействие внешних атмосферных факторов (влаги, кис-

лорода) на слои гетероструктуры, а также ограничивает поверхностные токи утечки в транзисторах. Подавление коллапса сильнее сказывается на СВЧ характеристиках транзистора, чем увеличение паразитных емкостей затвор-исток и затвор-сток в результате пассивации, поэтому для пассивации используют диэлектрические покрытия с большим значением относительной диэлектрической проницаемости (Si_3N_4 , Al_2O_3).

С появления первых AlGaN/GaN HEMT для пассивации и формирования подзатворного диэлектрика в МДП транзисторах были исследованы различные диэлектрические пленки: Al_2O_3 , AlN, AlSiN, AlTiO, Gd_2O_3 , HfO_2 , TaOxNy , La_2O_3 , LiNbO_3 , BCB, MSQ, MgO, Sc_2O_3 , PrO_3 , SiON, TiO_2 , Y_2O_3 , VO_2 , ZrO_2 , полиимид [121–138]. Исследовалась также возможность создания диэлектрических пленок на поверхности за счет окисления алюминия в перекиси водорода [139]. Наиболее часто используемым пассивирующим покрытием для GaN HEMT является нитрид кремния (Si_3N_4) (из-за отклонения от стехиометрического состава его чаще обозначают SiN_x или SiN). Использование пассивации SiN успешно устраняет эффект коллапса тока, обусловленный поверхностными ловушками (обычно на его долю приходится 70÷80%), оставшиеся 20÷30% коллапса приходится на влияние расположенных в буферном слое ловушек [140]. Это объясняется значительным уменьшением максимального электрического поля между затвором и стоком транзистора, что уменьшает полевую эмиссию электронов через барьер Шоттки и ограничивает захват электронов на поверхностных донорных центрах [106]. Кроме того, пассивация изменяет спектр ловушек на поверхности полупроводника. Ловушки на поверхности связаны с оксидами Ga и Al.

Для пассивации используются химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении (Low Pressure Chemical Vapour Deposition - LPCVD), стимулированное плазмой химическое вакуумное осаждение из газовой фазы (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition - PECVD), стимулированное индуктивно-связанной плазмой химическое вакуумное осаждение из газовой фазы (Inductively Coupled Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition - ICPECVD). LPCVD — вы-

сокотемпературная технология ($> 600^{\circ}\text{C}$). С помощью технологии PECVD можно осаждать SiN_x при температуре 300°C . Индукционные источники плазмы, используемые в технологии ICPECVD, создают высокоплотную плазму, что позволяет снизить температуру осаждения вплоть до комнатной, а также заменить аммиак (NH_3) азотом (N_2), что позволяет уменьшить содержание водорода в ICPECVD SiN [141]. При наличии технической возможности пассивирующий слой SiN осаждают в эпитаксиальной ростовой камере сразу (лат. *in situ* — «на месте») после роста остальных эпитаксиальных слоев. *In situ* SiN наиболее эффективен для устранения коллапса. Впервые предложенный для MOCVD в 2004 году [142] и для молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в 2007 году [143], он стал применяется ведущими производителями гетероструктур – компаниями «CREE» и «IMEC». *In situ* SiN обеспечивает наилучшее качество пассивации: минимальную утечку по поверхности, высокую плотность пленки (за счет высокой температуры осаждения – $700\div 800^{\circ}\text{C}$) и минимальный коллапс тока [144]. Для совместимости осаждения *in situ* SiN с технологическим процессом изготовления транзисторов с необходимо ограничить толщину наносимого покрытия $3\div 7$ нм. Слой SiN также может быть использован для формирования основания ножки Т-образного и Г-образного (с Field Plate) затвора, что упрощает изготовление и устойчивость затвора, однако увеличивает паразитные емкости затвор-исток и затвор-сток. При высоте ножки 50-150 нм вклад шляпы затвора в емкость затвора оказывается самым большим [145]. В технологии получили распространение двух и трехслойные диэлектрические пленки, состоящие из тонкого SiN и нескольких слоев диэлектриков, выбранных с требуемыми свойствами. В этом случае нижний слой выбирается исходя из минимизации коллапса и утечки по поверхности, а верхние слои исходя из оптимизации упругих напряжений, емкости и защиты поверхности от внешних воздействий [109,146].

Анализ свойств нижнего слоя SiN , наиболее эффективно подавляющего коллапс тока показал, что SiN с большим количеством водорода (водородных связей Si-H) обеспечивает минимальный коллапс тока, что было объяснено взаимо-

действием радикалов водорода, генерируемых в камере CVD с оксидом Ga на поверхности GaN (радикалы водорода травят оксид Ga, восстанавливая Ga на поверхности)[147]. Связи Si-H, обладающие низкой энергией, также уменьшают плотность ловушек электронов, возникающих в оксиде Ga. С другой стороны, пленка SiN, содержащая много связей Si-H, является гидрофобной, а это предотвращает окисление пленки SiN водой, что было подтверждено SIMS. Гидрофобные свойства пассивирующих покрытий требуются для повышения надежности транзисторов, поскольку молекулы воды участвуют в электрохимических реакциях с GaN приводящих к деградации СВЧ транзисторов [148].

Для высокочастотных HEMT с длиной затвора менее 100 нм использование толстого слоя SiN в сочетании с затворным Field Plate может уменьшить усиление в миллиметровом диапазоне и усложнить формирование затворной щели из-за сложностей с травлением щелей в диэлектрике с высоким соотношением глубины к ширине щели. Выбор верхнего слоя пассивации из материала с более низкой диэлектрической проницаемостью (например SiO₂) позволяет уменьшить паразитные емкости затвора и за счет этого улучшить СВЧ характеристики прибора [146]. Для получения минимальных емкостей затвора пассивирующий диэлектрик должен быть очень тонким и качественным. Для таких целей используется метод ALD, которым осаждаются HfO₂ и Al₂O₃. Пассивация Al₂O₃ толщиной 30–40 нм позволяет снизить коллапс тока ниже 15%, однако увеличение емкости затвора приводит к ухудшению f_t на 15–20%, с 292 до 241 ГГц для HEMT с длиной затвора менее 30 нм [121,149]. Варианты трехслойных покрытий были применены компанией «Fujitsu» для разработки технологии InAlN/GaN транзисторов мм-диапазона [150,151]. Сравнение токов утечки затвора для различных пассивирующих покрытий AlGaIn/GaN HEMT, показало, что при качественной подготовке поверхности GaN к осаждению, Si₃N₄, HfO₂ и Al₂O₃ имеют близкие величины токов утечки [140]. При выборе пассивации нужно учитывать его устойчивость к формированию ловушек при работе СВЧ транзистора, т.к. ловушки обнаружены как в SiN, так и в Al₂O₃[152,153]. Основные свойства SiN делают его диэлектри-

ком с низкой утечкой тока, высоким пробивным напряжением, низкой плотностью поверхностных состояний и хорошими защитными свойствами от проникновения влаги. Помимо SiN для минимизации емкостей возможно использование SiO₂ и другие пленки. При выборе пассивирующих покрытий необходимы учитывать особенности их деградации под воздействием различных факторов [153–155].

1.3.5 Гетероструктуры InAlN/GaN

Гетеропереходы InAlN/GaN, InAlGaN/GaN и AlN/GaN являются альтернативой AlGaN/GaN гетероструктурам в связи с тем, что они имеют более высокое встроенное электрическое поле, вызванное спонтанной поляризацией, и, как следствие, более высокую концентрацию 2DEG [156–158]. Для гетероструктур на основе InAlN слоевая концентрация 2DEG достигает $2,5 \div 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Особый интерес представляет гетероструктура In_{0,17}Al_{0,83}N/GaN из-за согласованного по постоянной решетки барьерного слоя InAlN, что, как ожидается, может положительно сказаться на надежности устройства [159]. Помимо высокой концентрации 2DEG, в структуре InAlN/GaN была показана возможность получения высокой подвижности электронов ($1800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) [160]. Высокая концентрация 2DEG в InAlN/GaN позволит увеличить частотный диапазон НЕМТ [161,162]. Соотношение тонкого барьерного слоя и короткой длины затвора СВЧ устройств является ключевым фактором в подавлении короткоканальных эффектов в транзисторе [114]. В InAlN/GaN возможно уменьшение толщины барьера до 5 нм с сохранением высоких электрофизических свойств материала, и, соответственно, уменьшение короткоканального эффекта в транзисторах с затвором длиной менее 150 нм. По прогнозу компании «Fujitsu», InAl(Ga)N/GaN транзисторы займут наиболее высокий диапазон мощностей и частот из всех полупроводниковых приборов [2]. Однако пока СВЧ НЕМТ и МИС на структурах (In,Al,Ga)N/AlGaN промышленно не выпускаются, хотя их изучение ведется с 2001 г. [158]. Первой публикацией

InAlN/GaN HEMT была работа [157], однако позднее она была отозвана из-за обнаруженного в барьерном слое низкого содержания индия и высокого содержания галлия. Этот эффект характерен для InAlN/GaN [34], поэтому важным требованием при разработке технологии является контроль состава InAlN. В работах [151,163] утверждается, что внедрение Ga улучшает характеристики прибора, в частности уменьшает утечку через барьер Шоттки затвора и улучшает морфологию поверхности. InAlN и ряд составов InAlGaN может быть выращен согласованным с GaN по постоянной кристаллической решетки [164] (рисунок 1.8).

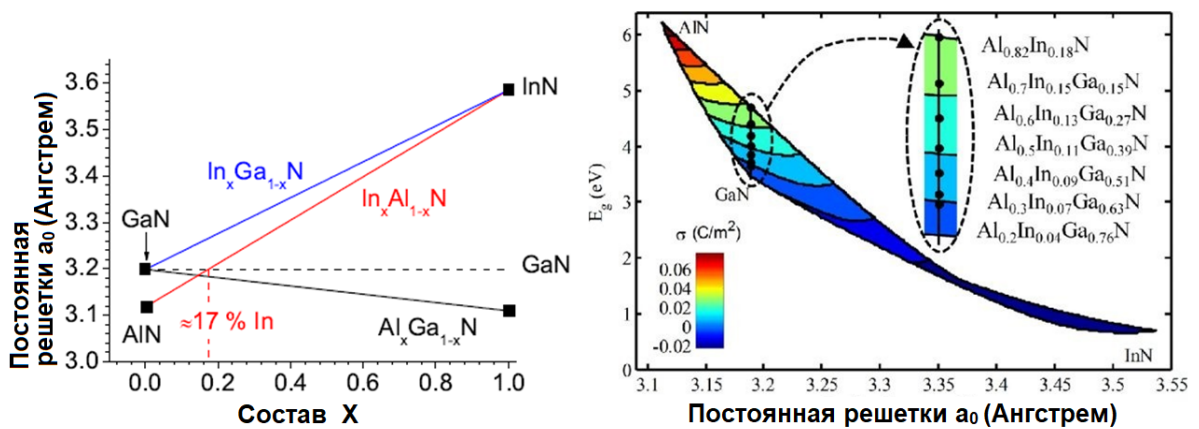


Рисунок 1.8 – Зависимости постоянной решетки от состава InAlGaN (а) и ширины запрещенной зоны от мольной доли (б) для различных составов соединений на основе InAlGaN [165,166]

Лучшие результаты для InAlN/GaN HEMT получены при использовании газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD). Условия роста Al-содержащих и In-содержащих слоев различны: оптимальные температуры для роста InN~600°C, а для AlN~1200°C. Для роста InAlN с высоким содержанием индия обычно используется атмосферное давление [167,168], при этом InAlN может быть выращен во всем диапазоне составов, но для содержания In более 18% наблюдается фазовая сепарация. Изменение толщины барьерного слоя InAlN в гетероструктурах GaN/AlN/InAlN от 10 до 33 нм приводит к незначительному изменению подвижности и концентрации электронов в канале [159]. Поэтому на прак-

тике используется $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ с $x=10\div 18\%$ и толщиной $5\div 15$ нм. Вставка AlN между барьерным слоем и каналом, как и для AlGaN/GaN гетероструктур, позволяет повысить подвижность 2DEG выше $1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [169]. Фактически эта вставка имеет состав AlGaN из-за большого количества галлия, который встраивается в решетку AlN из лежащих ниже слоев GaN [170].

Утечки затвора являются одной из основных проблем InAlN/GaN транзисторов. Они могут быть выше $1 \text{ мА}/\text{мм}$ даже при относительно низких напряжениях сток-исток. Утечки, связанные с низким структурным качеством барьерного слоя InAlN, преодолеваются за счет сложной конструкции пассивирующих слоев, предотвращающих как коллапс, так и окисление барьерного слоя [151] или за счет нанесения на поверхность различных окислов, формирующих МДП транзистор [171]. Пока для МДП транзисторов пока не было продемонстрировано сопоставимых с транзисторами с барьером Шоттки мощностных СВЧ характеристик. Механизмы протекания тока утечки в затворе транзистора исследованы в работе [172]. Есть данные о влиянии толщины пассивации нитридом кремния, осажденного *in situ*, на надежность и утечку затвора транзистора [173]. В работе [163] проведено сравнение параметров транзисторов на InAlN/GaN с InAlGaN/GaN транзисторами, и сделан вывод о большей пригодности барьерного слоя InAlGaN к работе в мощных усилительных СВЧ транзисторах. Основными причинами названы поверхностная сегрегация индия и большее количество дефектов в InAlN слое. Результаты исследований радиационной стойкости InAlN/GaN и AlGaN/GaN НЕМТ показали их сопоставимую устойчивость в аналогичных условиях облучения [35].

Для изготовления эпитаксиальных InAlN/GaN гетероструктур используют МOCVD и МЛЭ [174]. Оба метода продемонстрировали возможность обеспечивать схожие электрофизические параметры гетероструктур [33,34]. Несмотря на широкое применение в промышленном производстве многоподложечных установок газофазной эпитаксии с планетарной конструкцией реактора, наиболее успешные работы по росту InAlN/GaN выполнены с использованием горизон-

тальных реакторов. В планетарных реакторах в оптимальных для роста InAlN условиях возникают сильные рециркуляции, в результате при необходимых для роста InAlN условиях (несущий газ N_2 , избыток NH_3 , доминирование AlN компоненты), возникают сильные паразитные реакции, либо происходит вхождение галлия в InGaN слой [175–177].

1.4 Основные результаты и выводы главы 1

Разработка СВЧ транзисторов мм-диапазона предполагает решение ряда конструктивных и технологических проблем, которые становятся все более серьезными с увеличением рабочей частоты прибора. Основным путем увеличения рабочей частоты является уменьшение длины затвора одновременно с пропорциональным уменьшением габаритов транзистора, что 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 2 DEG; использование сложных конструкций буферного слоя транзисторов, позволяющих минимизировать короткоканальные и связанные с ловушками эффекты; оптимизацию диэлектрических слоев, пассивирующих рабочую область транзистора, для связывания поверхностных состояний, ограничения проникновения влаги в рабочую область транзистора и уменьшения паразитных емкостей.

Преимуществом InAlN/GaN перед AlGaIn/GaN гетероструктурами является высокая концентрация электронов в 2DEG, что дает возможность использовать тонкий барьерный слой в гетероструктурах НЕМТ. Это преимущество делает актуальным сравнительное исследование технологии и свойств СВЧ транзисторов мм-диапазона на основе InAlN/GaN и AlGaIn/GaN гетероструктур. Для промышленного использования InAlN/GaN гетероструктур необходимо решение ряда проблем, основными из которых являются высокие токи утечки затвора, коротко-

канальные эффекты, низкие значения напряжения пробоя в транзисторе [118], коллапс тока [178,179], увеличение тока утечки затвора и уменьшение тока стока в ходе испытаний [171,180–183].

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

2.1 Конструкции гетероструктур для СВЧ транзисторов

2.1.1 Гетероструктуры на основе AlGaN/GaN

Образцы гетероструктур (InAlGa)N/GaN были изготовлены на установке MOCVD Dragon 125 с горизонтальным типом реактора, предназначенным для эпитаксиального роста одной пластины диаметром 100мм. Благодаря оригинальной конструкции установка позволяет проводить процессы эпитаксиального роста в значительно более широком диапазоне режимов по давлению (до 1 атм), что особенно важно для роста InAlN. Ростовая камера имеет малый объем, что позволяет быстро изменять параметры роста слоев. Установка позволяет провести пассивацию *in situ* SiN и выращивать Fe- и C-легированные слои GaN.

Конструкция гетероструктур для транзисторов мм-диапазона должна учитывать необходимость подавления короткоканальных эффектов в транзисторе. Для гетероструктуры AlGaN/GaN это предполагает уменьшение толщины барьерного слоя AlGaN и увеличение мольной доли алюминия в нем для поддержания высокой концентрации носителей. Увеличение алюминия в AlGaN ведет к росту механических напряжений в структуре и снижению надежности конечного прибора, поэтому для исследования технологии СВЧ транзисторов использовались две конструкции гетероструктуры с различными толщинами барьерных слоев и мольных долей алюминия.

Первая конструкция включала в себя 1,5 нм GaN, 22 нм Al_{0,24}Ga_{0,76}N, 1 нм AlN и буферный слой GaN, выращенные на подложке 4H SiC. Мольная доля алюминия в AlGaN в диапазоне 20÷25% при толщине 20÷25 нм широко используется для СВЧ транзисторов для частотного диапазона 1÷18 ГГц. Необходимый уровень усиления в нем можно достигнуть, используя длину затвора больше 200 нм, что позволяет избежать влияния короткоканальных эффектов на СВЧ параметры

транзистора, а благодаря большой толщине барьерного слоя такая конструкция позволяет транзистору работать в широком диапазоне рабочих напряжений. Использование этой конструкции в качестве образца для сравнения позволяет увидеть эффект от изменений конструкции буферных и рабочих слоев гетероструктуры на полученные ВАХ и СВЧ характеристики. В частности, использование затворов длиной 100÷150 нм показывает эффект от влияния различных конструкций буферного слоя на утечки и короткоканальные эффекты в ВАХ транзисторов.

В состав второй гетероструктуры входили 1,5 нм GaN, 15 нм Al_{0.28}Ga_{0.72}N, 1 нм AlN и буферный слой GaN, выращенные на подложке 4H SiC. Увеличение мольной доли алюминия до 28% позволяет увеличить концентрацию электронов в канале и за счет этого сократить толщину барьерного слоя до 15 нм, что позволяет применять затворы длиной 100÷150 нм. Выбранное соотношение между длиной затвора и толщиной барьерного слоя при этом позволяет сократить короткоканальные эффекты в транзисторе.

Электрофизические параметры гетероструктур приведены в таблице 2.1. Выращенные гетероструктуры имели конструкцию буферного слоя, выбранную в результате исследований, рассмотренных в разделе 2.2. Конструкция включала легированный железом буферный слой GaN толщиной около 0,9 мкм и канал толщиной 0,5 мкм.

Таблица 2.1 – Параметры AlGaN/GaN гетероструктур для СВЧ транзисторов

№ Конструкции	Толщина слоя AlGaN, нм	Содержание Al в слое AlGaN, %	Слоевое сопротивление, Ом/□	Подвижность носителей в двумерном газе, см ² /В·с	Концентрация носителей в двумерном газе, см ⁻²
1	22	24	353÷366	1750	1·10 ¹³
2	15	28	301÷314	1800	1.1·10 ¹³

Передаточные характеристики транзисторов с длинами затвора L_g=0,2 мкм, полученные для V_{ds}=10 В, приведены на рисунке 2.1.

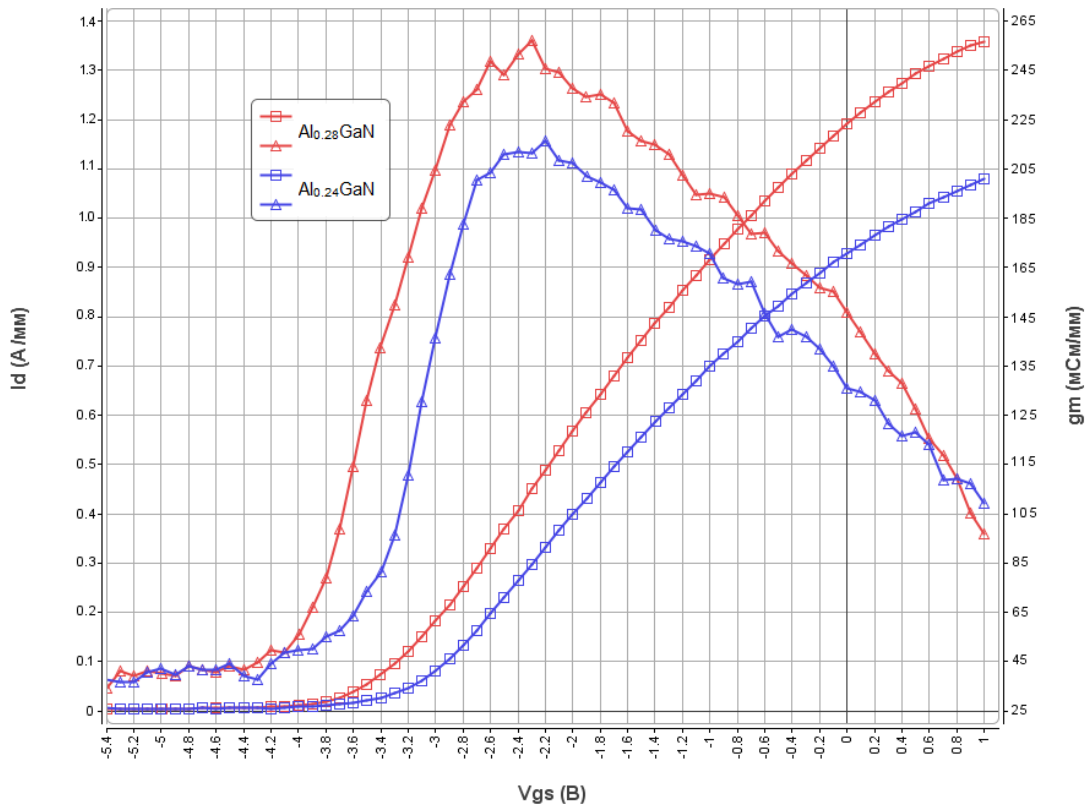


Рисунок 2.1 – Передаточные характеристики $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ и $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ (конструкции №1 и №2) при $V_{ds}=10\text{ В}$

Уменьшение до 15 нм толщины барьерного слоя в $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ гетероструктуре позволяет получить высокую плотность тока в транзисторе 1,35 А/мм, что на 20% больше чем в $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ гетероструктуре. Однако увеличение коллапса тока до 70% в этой гетероструктуре делает ее непригодной для использования для работы в мощных СВЧ транзисторах. Поскольку транзисторы были изготовлены по одной технологии, можно предположить, что увеличение коллапса тока обусловлено высокой плотностью ловушек в слое $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}$. Для уменьшения плотности ловушек в данной конструкции необходимо менять режим роста гетероструктуры либо уменьшать толщину барьерного слоя $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}$. Поэтому для частотных диапазонов, требующих формирования затворов длиной менее 100 нм, использование AlGaN с мольной долей алюминия менее 30% становится невозможным из-за необходимости снижать толщину барьерного слоя до 7÷10 нм. Для таких целей необходимо использовать гетероструктуры InAlN/GaN,

AlN/GaN или InAlGaN/GaN. В последующих экспериментах использовались гетероструктуры $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$, параметры которых сравнивались с результатами, полученными для InAlN/GaN гетероструктур.

2.1.2 Гетероструктуры на основе InAlN/GaN

Большой разрыв зоны проводимости и плотность поляризационных зарядов спонтанной поляризации позволяют увеличить до $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ концентрацию электронов 2DEG гетероструктуры InAlN/GaN, в которой толщина барьерного слоя составляет более 10 нм. Это позволяет уменьшить толщину барьерного слоя до $5 \div 7$ нм, сохранив концентрацию на уровне $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и использовать такие гетероструктуры в СВЧ транзисторах мм-диапазона (Таблица 2.2).

Таблица 2.2– Параметры InAlN/GaN гетероструктур для СВЧ транзисторов.

Толщина InAlN, нм	Содержание In в InAlN, %	Слоевое сопротивление, Ом/□	Подвижность электронов, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Концентрация электронов, см^{-2}
13	14	250÷282	707	$3,1 \cdot 10^{13}$
5	14	220÷240	1340	$2,1 \cdot 10^{13}$
10	12	280÷304	769	$2,9 \cdot 10^{13}$
5	12	218÷230	1110	$2,7 \cdot 10^{13}$

При выращивании гетероструктур InAlN/GaN необходимо найти компромисс между режимами роста InAlN, AlN и GaN, поскольку содержащие индий нитриды необходимо выращивать при температуре $700 \div 900^\circ\text{C}$, высокой концентрации аммиака ($>50\%$ по мольной доле), и атмосфере, содержащей минимум водорода при давлении в реакторе $400 \div 1000$ мбар. Эти параметры обусловлены малой энергией связи In-N, низкой реакционной способностью индия и его высоким равновесным давлением, нестабильностью InN в содержащей водород атмосфере. При росте AlN, напротив, требуется высокая температура ($>1100^\circ\text{C}$), атмосфера с высоким содержанием водорода, низкая концентрация аммиака, при давлении в реакторе 100 мбар или ниже. Это связано с паразитными реакциями в газовой фа-

зе между аммиаком и триметилалюминием (ТМАл) – единственным из практически используемых в III-N технологии прекурсором алюминия – приводящих к образованию AlN частиц и резкому падению скорости роста. Благодаря малому объему и ряду других конструктивных особенностей использовавшийся для исследований реактор установки Dragon 125 позволяет максимально приблизиться к выполнению этих требований. Аммиак, триметилгаллий (ТМГ), триметилиндий (ТМИ) и триметилалюминий использовались в качестве соединений – источников азота, галлия, индия и алюминия. При выращивании эпитаксиальных слоев GaN в качестве несущего газа использовался водород, при выращивании InAlN – азот. Структурные свойства выращенных образцов были исследованы методами раствороной электронной микроскопии, рентгеновской дифракции высокого разрешения (HR XRD), измерения эффекта Холла и слоевого сопротивления при комнатной температуре, а также рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с послойным распылением вещества ионами Ar. Предварительные данные, полученные на образцах InAlN/GaN гетероструктур [178], показали, что концентрация носителей в канале увеличивается с уменьшением содержания In, а подвижность имеет максимум при составе около 16%.

Эксперименты по росту InAlN/GaN показали, что наилучшее качество гетероструктур получается при потоке ТМИ $100\div 400$ см³/мин, а управление составом InAlN осуществляется выбором температуры образца в диапазоне $820\div 850$ °C. Анализ импульсных ВАХ InAlN/GaN транзисторов показал, что поток ТМИ влияет на величину коллапса тока [179]. На рисунке показаны изменения ВАХ при $V_g=0$ В при увеличении напряжения на стоке в точке покоя для двух режимов роста InAlN 400 см³/мин (а) и 100 см³/мин (б). Уменьшение потока ТМИ позволяет снизить коллапс, что вероятно связано с концентрацией или спектром ловушек в InAlN. Однако снижение потока ТМИ до 100 см³/мин приводит к неоднородности слоевого сопротивления на образцах диаметром 100 мм, поэтому для дальнейших экспериментов был выбран поток ТМИ 300 см³/мин.

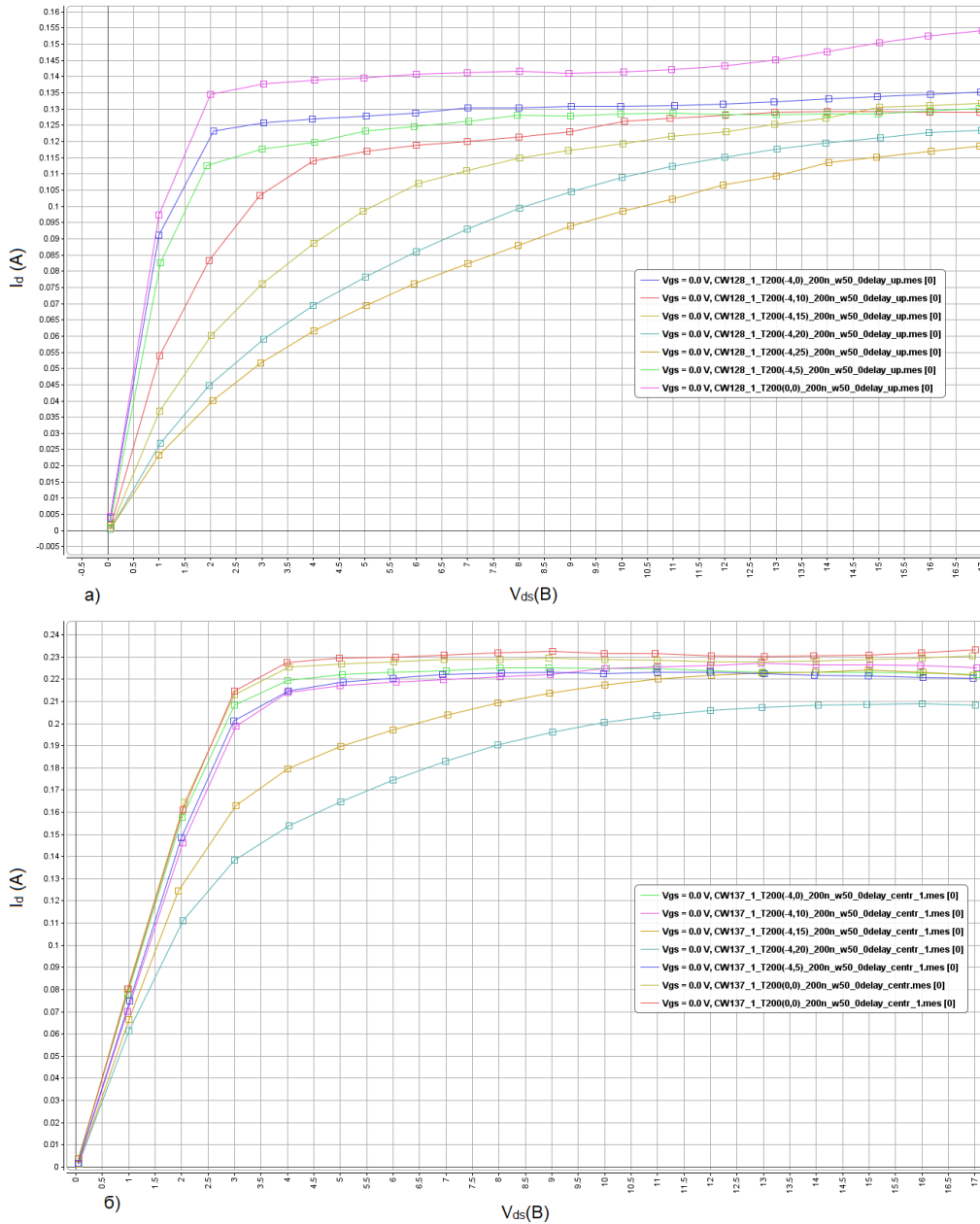


Рисунок 2.2 – Импульсные ВАХ InAlN/GaN HEMT, измеренные для $V_g=0$ В при увеличении напряжения на стоке в точке покоя для двух режимов роста InAlN – $400 \text{ см}^3/\text{мин}$ (а) и $100 \text{ см}^3/\text{мин}$ (б)

Расчет влияния толщины и состава барьерного слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ на концентрацию электронов в 2DEG показал, что при толщине барьерного слоя в диапазоне (5÷10) нм и процентном содержании индия 11-17 % можно получать концентрации электронов N_s , превышающие типичные для AlGaN/GaN гетероструктур значения. На рисунке 2.3 приведены результаты расчета зависимости концентрации

электронов в двумерном газе от толщины $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$. Толщина барьерного слоя начинает оказывать сильное влияние на концентрацию электронов в канале при уменьшении толщины слоя до $5 \div 6$ нанометров. При выборе гетероструктуры для изготовления транзисторов это необходимо учитывать, поскольку при изготовлении транзисторов необходимо проводить плазменное травление слоя Si_3N_4 , и небольшие неоднородности толщины и скорости травления нитрида кремния может привести к значительному разбросу параметров транзисторов. Толщина барьерного слоя была выбрана равной ≈ 7 нм, поскольку при такой толщине зависимость концентрации от толщины не носит резкий характер.

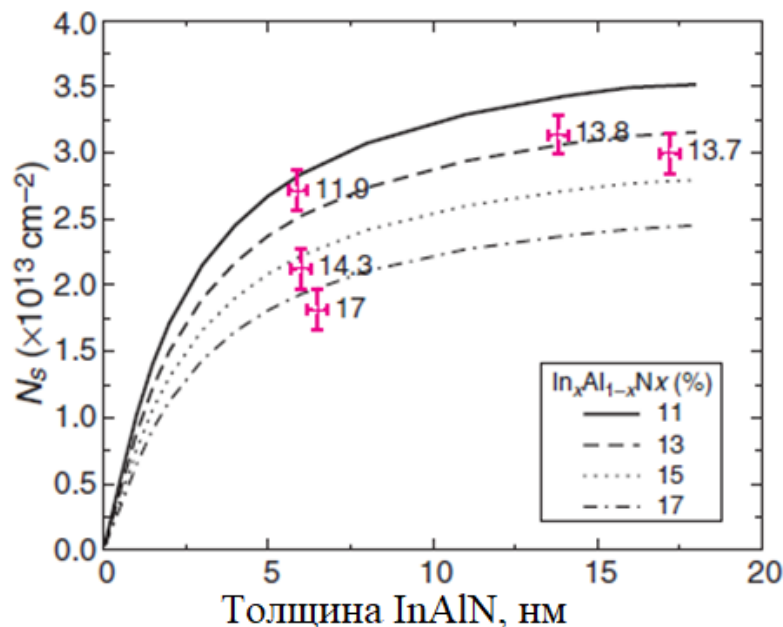


Рисунок 2.3 – Зависимость концентрации электронов в InAlN/GaN гетероструктуре от толщины барьерного слоя с нанесенными экспериментальными результатами (красные значки)

Исследования экспериментальных образцов, выращенных на подложках сапфира, показали, что при использовании вставки AlN толщиной $1 \div 1,2$ нм над каналом подвижность электронов возрастает до $1000 \div 1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при слоевой концентрации электронов $2,1 \div 2,7 \text{ см}^{-3}$. На рисунке 2.4 приведены статистические

данные, полученные для средних значений подвижности и концентрации электронов в серии образцов с мольной долей индия 12 и 14%, а также для образца с 17% индия в InAlN. При толщине барьерного слоя 5-7 нм слои сопротивление образцов находится в диапазоне $210 \div 280 \text{ Ом}/\square$, а концентрация находится в диапазоне $900 \div 1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

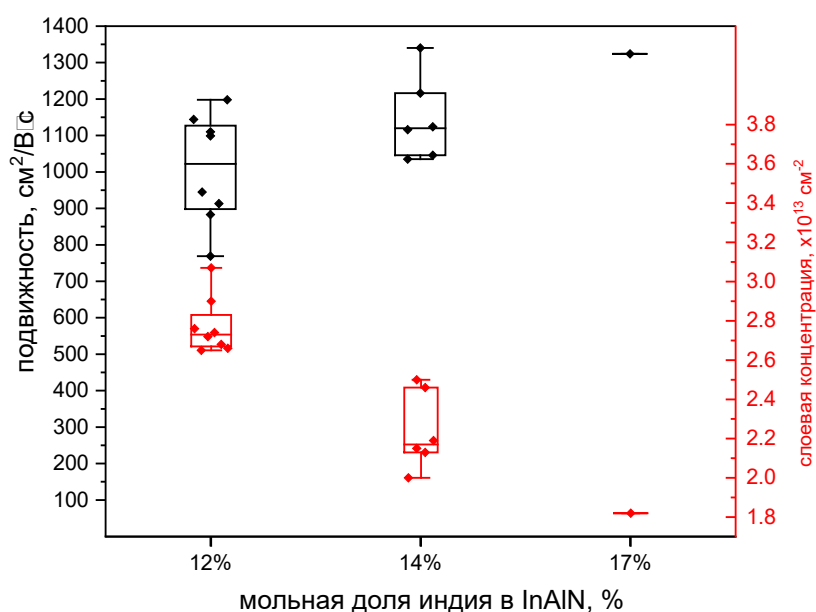


Рисунок 2.4 – Зависимость подвижности и концентрации от мольной доли индия в образцах с 5 нм InAlN

Рельеф поверхности InAlN, полученный с помощью атомно-силовой микроскопии, показал шероховатость поверхности $R_z=0,79 \text{ нм}$ при сканировании в поле $10 \times 10 \text{ мкм}$ (рисунок 2.5) и $1,9 \text{ нм}$ при сканировании в поле $50 \times 50 \text{ мкм}$, что соответствует приводимым в литературе данным для качественных InAlN слоев [180,181].

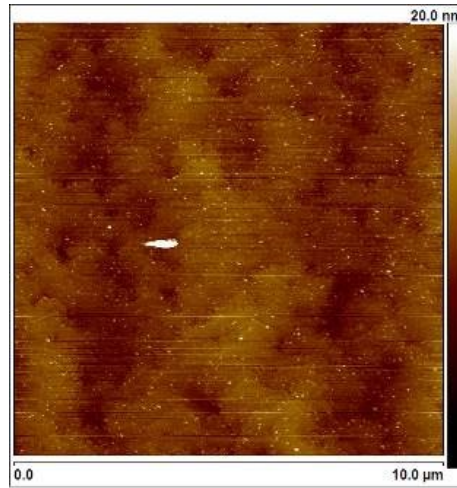


Рисунок 2.5 – Топологии поверхности, измеренная для экспериментального образца слоя InAlN (поле измерения 10×10 мкм)

Наиболее удобным методом характеристики слоев InAlN является использование рентгеновской диффрактометрии (XRD) с особым контролем отсутствия фазовой сепарации в слое InAlN. Однако толщина слоя InAlN должна быть достаточной для определения его состава, что, учитывая размерные эффекты при измерении кривых дифракции обычно означает необходимость использования слоев с толщиной выше $15 \div 20$ нм.

Однородность состава на толщине слоя InAlN была проверена послойным анализом состава образца InAlN/AlN/GaN методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. При использовании вместе с послойным распылением материалов этот метод позволяет определять профили химического состава исследуемых образцов [188]. Уменьшая угол наклона детектора электронов с 90° до 30° , можно уменьшить с 2,58 до 1,29 нм толщину слоя детектирования электронов из уровня 3d в галлии $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ [183]. Такое разрешение по глубине позволяет использовать XPS измерения для определения профиля и мольной доли индия в транзисторных (InAlGa)N/GaN гетероструктурах. Сравнение данных, полученных на образцах, отличающихся заданным в ходе эпитаксиального роста составу индия на $1,5 \div 2\%$, показал, что методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии можно провести проверку соответствия элементного состава гетерострук-

туры заданным значениям. Концентрация атомов индия на рисунке 2.6 а) и б) отличается примерно на 0,75%, что соответствует 1,5% отличию в мольной доле индия. Из данных, приведенных на рисунке 2.6, видно, что слой InAlN однороден по составу индия на всей толщине, что свидетельствует об отсутствии приводимого в ряде литературных источников эффекта встраивания галлия в слой InAlN и об отсутствии сегрегации индия на поверхности, достаточного для влияния на профиль.

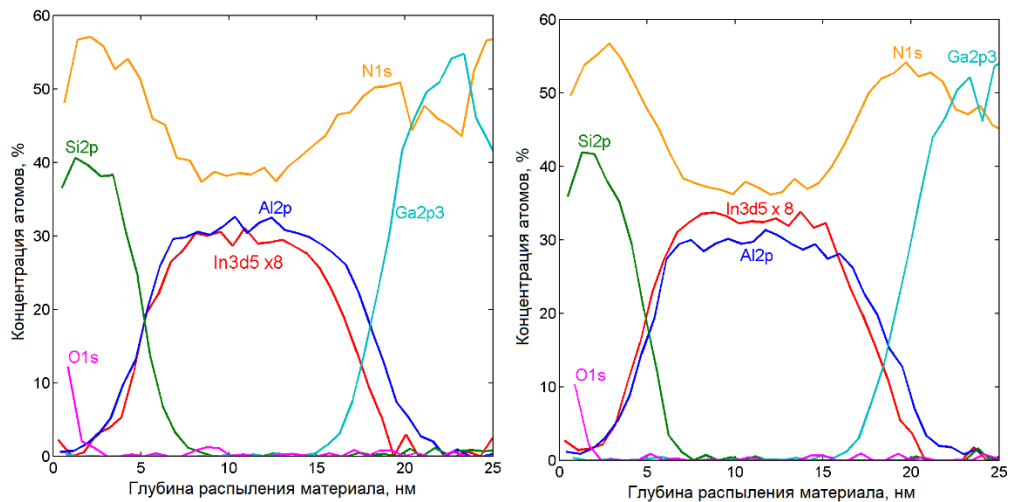


Рисунок 2.6 – Профиль концентрации элементов, полученный при последовательном удалении слоев с поверхности образцов с InAlN/AlN/GaN гетероструктурой, значения концентрации индия на графике увеличены в 8 раз

Из расчета зонной диаграммы для InAlN/AlN/GaN НЕМТ для двух напряжений на затворе видно, что в случае отсутствия широкозонных или легированных слоев под каналом для электронов при отрицательном напряжении на затворе отсутствует потенциальный барьер для проникновения в буферный слой GaN (рисунок 2.7 б).

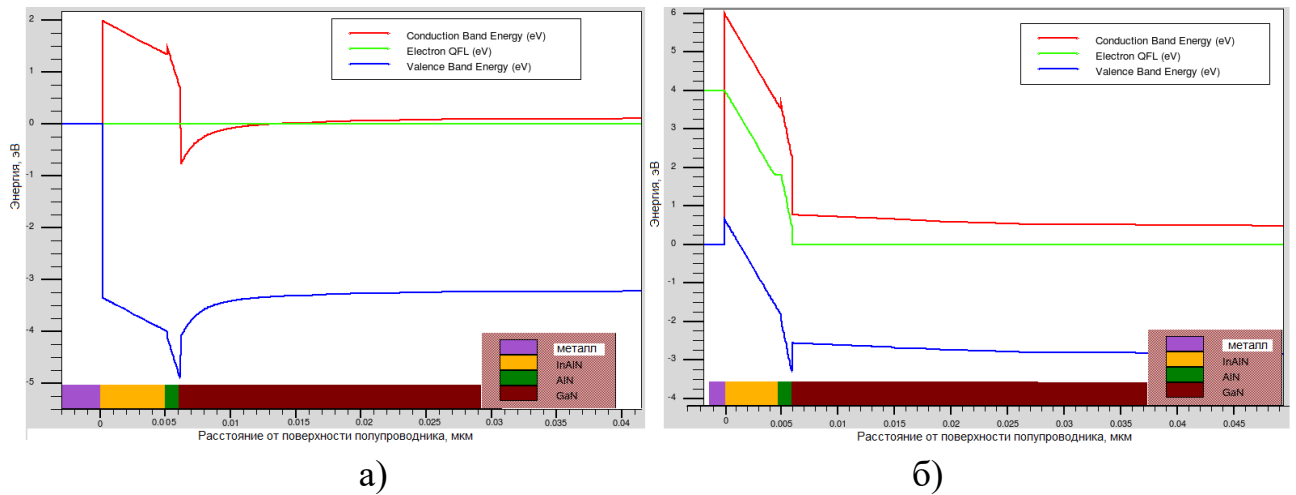


Рисунок 2.7 – Зонная диаграмма гетероструктуры InAlN/GaN HEMT при нуле на затворе (а) и вблизи напряжения отсечки (б)

Исследование образцов гетероструктур показало, что по своим электрофизическим свойствам $Al_{0,24}Ga_{0,76}N/AlN/GaN$ гетероструктуры с толщиной барьерного слоя 22 нм и $In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN$ гетероструктуры с толщиной барьерного слоя 5÷7 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. Для их успешного применения в короткоканальных транзисторах необходимо решить проблему пространственного ограничения электронов в канале транзистора со стороны буферного слоя.

2.2 Конструкции буферных слоев для гетероструктур их влияние на параметры СВЧ транзисторов на основе GaN

2.2.1 Выбор конструкций и тестовых элементов для исследования параметров буферных слоев.

Выбор конструкции буферного слоя оказывает значительное влияние на параметры транзисторов, поэтому исследование свойств различных конструкций

буферного слоя и изучение их влияния на параметры транзисторов имеют большое значение при выборе СВЧ транзисторов на основе $(\text{InAlGa})\text{N}/\text{GaN}$ для мм-диапазона. Было проведено исследование свойств различных конструкций буферного слоя, изготовленных на основе нелегированного, легированного углеродом и легированного железом слоев. Исследование включало изучение влияния выбранных параметров конструкции на напряжение пробоя буферного слоя, электрофизические параметры гетероструктуры, напряжение пробоя исток-сток транзистора, эффекты короткого канала, коллапса тока, сдвига напряжения насыщения, «kink» эффекта.

Для исследованных типов буферных слоев были проведены измерения спектра ловушек и профилей залегания примесей. Для характеристики буферных слоев измерялось напряжение пробоя в тесте для контроля межприборной изоляции (рисунок 2.8), в котором контролируется пробой между лежащими на расстоянии 5 мкм омическими контактами с периферией 900 мкм, разделенными вытравленной канавкой глубиной $150\div 200$ нм. Пробой в этой конструкции не зависит от выбранной гетероструктуры, а за счет неглубокой канавки проводимость буферного слоя, толщина которого составляет $1,5\div 1,7$ мкм, остается практически неизменной. Поскольку расстояние между истоком и стоком в СВЧ транзисторах составляет $2\div 4$ мкм, такой тест хорошо воспроизводит режим утечки и, в меньшей степени, пробоя по буферному слою в транзисторе. Измерения проводились при токе в тесте, соответствовавшем плотности тока 1 мА/мм либо по факту пробоя. Влияние выбранной конструкции буферного слоя на электрофизические параметры гетероструктур наблюдалось на тесте для контроля слоевого сопротивления полупроводниковой структуры методом Ван дер Пау.

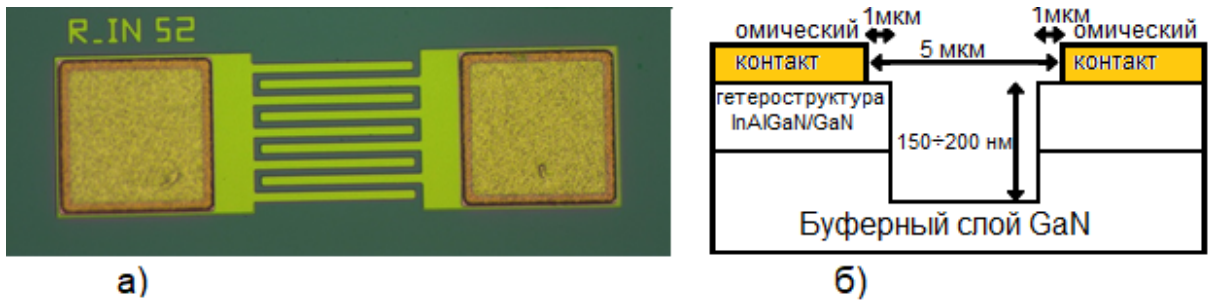


Рисунок 2.8 – Тест для контроля межприборной изоляции

Для анализа влияния конструкции буферного слоя на параметры транзисторов анализировались ВАХ, измеренные в импульсном режиме (для исследования максимального тока и эффекта коллапса тока) и статическом режиме (для исследования напряжения пробоя). Измерялись транзисторы с шириной затвора 100 мкм или 200 мкм и расстоянием исток-сток $3,5 \div 4$ мкм. Длина затвора составляла $0,2 \div 0,25$ мкм для большинства образцов, за исключением экспериментов по изучению короткоканальных эффектов. Верхняя часть затвора была с асимметрично сдвинута к стоку, формируя затворный полевой электрод. Для исследования коллапса тока, «kink» эффекта и эффекта дрейфа напряжения насыщения ВАХ транзистора измерялись в импульсном режиме с длительностью импульса 250 нсек. Такая длительность импульса позволяет снизить влияние резистивного разогрева на форму ВАХ транзистора. Измерительный стенд был собран на основе системы для импульсных измерений AMCAD Pulse IV System.

2.2.2 Буферные слои на основе нелегированного GaN

Можно ожидать, что буферный слой из нелегированного, или, что более точно, непреднамеренно легированного (англ. unintentionally doped - UID) GaN, должен обеспечивать наибольшую подвижность электронов в 2DEG за счет наименьшей концентрации ионов примеси в канале транзистора. Однако на практике необходимость подавления фоновой проводимости без использования преднамеренно вводимой примеси приводит к режимам роста, не способствующим

получению максимальных электрофизических параметров. Электронная проводимость в UID слоях GaN создается 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 для получения высокой чистоты GaN отличаются от режимов для изготовления изолирующих пленок GaN. Для случая роста изолирующих слоев методом MOCVD требуется режимы роста, способствующие внедрению углерода из метильных групп, к ним относятся высокие скорости роста, низкие соотношения V/III, низкое давление и пониженные температуры во время эпитаксиального роста. Все эти факторы ухудшают кристаллическое совершенство выращиваемой структуры и не способствуют улучшению электрофизических параметров гетероструктур. Помимо непосредственно режимов роста буферного слоя, на его проводимость оказывает влияние режим роста зародышевого слоя на подложке.

На образцах AlGaN/GaN гетероструктур, выращенные на подложках сапфира и карбида кремния диаметром 2 дюйма, были проведены исследования транзисторов и свойств буферных слоев [182,183]. В ходе экспериментов варьировались режимы роста буферного и зародышевого слоя, а также состав и толщина зародышевого слоя, в качестве которого использовался AlN и AlGaN с мольной долей алюминия от 35 до 50%. Использование зародышевого слоя AlN вместо AlGaN и уменьшение толщины буферного слоя GaN с 3 мкм до 1,7÷2 мкм в сочетании с выбором условий роста, обеспечивающих повышенный уровень акцепторных дефектов в слое GaN позволяет повысить напряжение пробоя в буферном слое. Данные о напряжении пробоя, полученные в последовательно изготавливаемой серии экспериментальных гетероструктур, представлены на рисунке 2.9. Особенности используемых для эпитаксиального роста подложек SiC оказывает сильное влияние на фоновой концентрации в буферном слое, и, как следствие, на напряжениях пробоя. Различия в качестве материала подложки приводят к раз-

бросу напряжений пробоя по пластине и между разными пластинами (в том числе выращенными в одном ростовом процессе), что также отражено в приведенных на рисунке 2.9 данных.

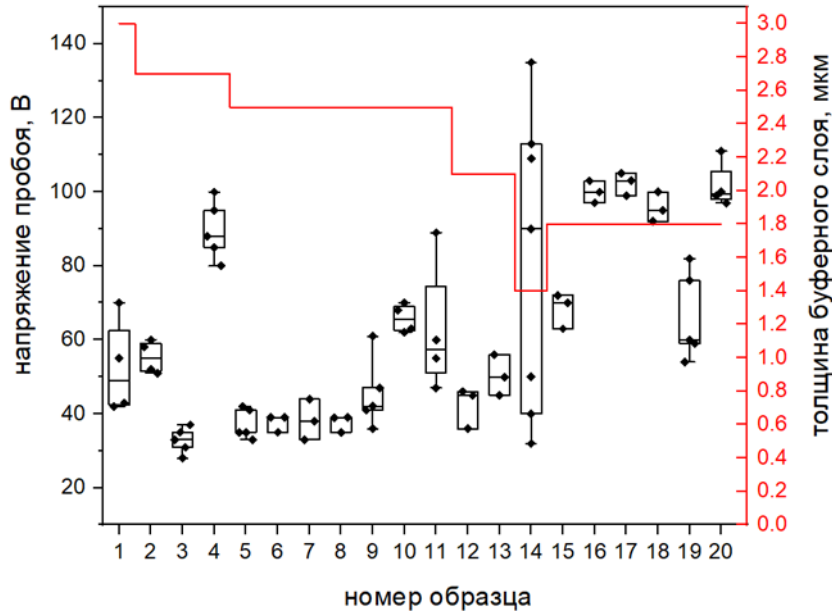
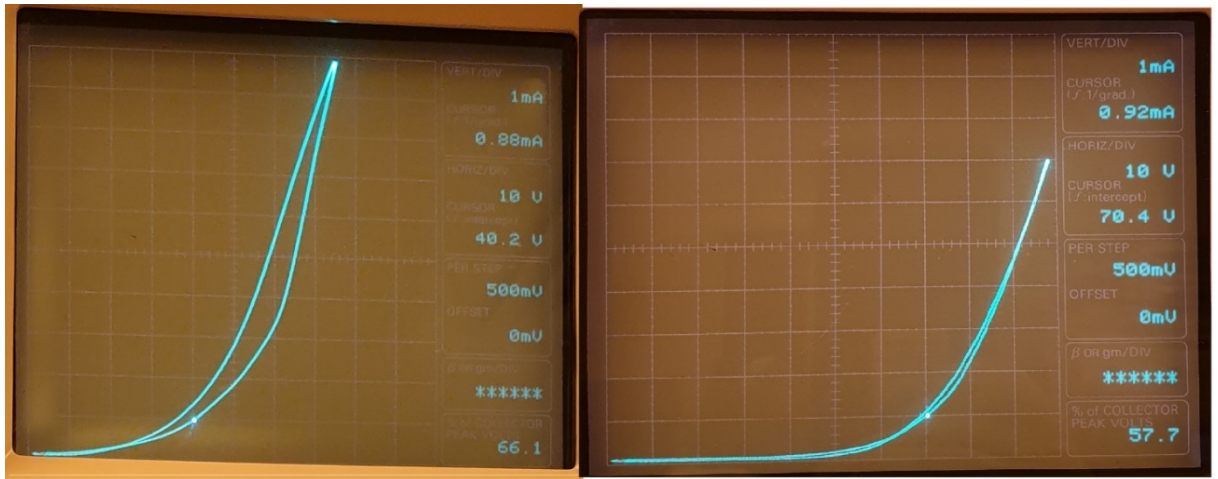


Рисунок 2.9 – Напряжения пробоя и данные по толщине буферного слоя GaN в серии образцов с нелегированным буферным слоем

На рисунке 2.10 показаны типичные ВАХ тестов до и после оптимизации режимом роста нелегированного буферного слоя. Проведенная оптимизация режимов роста позволила добавить примерно 30÷40 В к исходному диапазону напряжений пробоя, увеличив его с 30÷50 В до 60÷90 В и привела к уменьшению токов утечки (рисунок 2.10 а, б). Толщина буферного слоя была выбрана равной 1,7÷1,8 мкм, был изменен также состав и режим роста зародышевого слоя AlGaN на подложке. Для скорректированной конструкции буферного слоя характерны значительные токи утечки ($>1\text{А/мм}$) в тестовой структуре без наступления необратимого пробоя, что позволяет изготавливать на них транзисторы, работающие при напряжении питания 25 В [183].



a)

б)

Рисунок 2.10 – ВАХ тестов для контроля изоляции с неоптимизированным (а) и оптимизированным (б) нелегированным буферным слоем GaN

Транзисторы, изготовленные на AlGa_N/Ga_N гетероструктурах с нелегированным буферным слоем, имеют ВАХ в области высоких напряжения на стоке, показанную на рисунке 2.11 (а). Сравнение с импортными транзисторами, изготовленными на гетероструктурах AlGa_N/Ga_N с легированным буферным слоем (рисунок 2.11, б), показывает низкое (около 50 В по сравнению с 160 В) напряжение пробоя и характерный для утечки через буферный слой слабо управляемый затворным напряжением ток. При напряжении 40÷50 В неуправляемый ток, протекающий в нелегированном буферном слое транзисторной гетероструктуры, составляет >1 мА/мм.

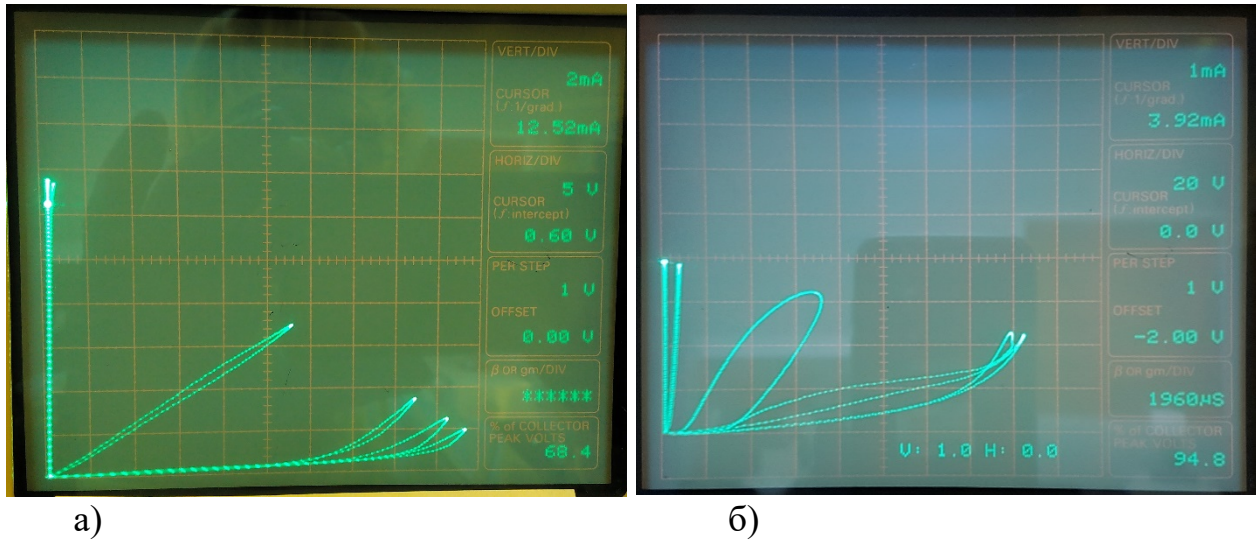


Рисунок 2.11 ВАХ AlGaIn/GaN HEMT вблизи напряжения для образца с нелегированным буферным слоем GaN толщиной 1,8 мкм, изготовленного в оптимизированных режимах роста (а) и транзистора Triquint TGF2023-2-20 (б)

Импульсные ВАХ транзистора, изготовленного на AlGaIn/GaN гетероструктурах с оптимизированным буферным слоем GaN, показаны на рисунке 2.12. Выбор режимов для точек покоя обусловлен имеющимся для данного транзистора напряжением отсечки (для измерений выбирается напряжение на затворе несколько меньше напряжения отсечки) и рабочим напряжением транзистора (25-30 В). Коллапс тока в транзисторах с нелегированным буферным слоем 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. При напряжениях на стоке выше 20 В становятся заметны плохо управляемые токи утечки по буферному слою.

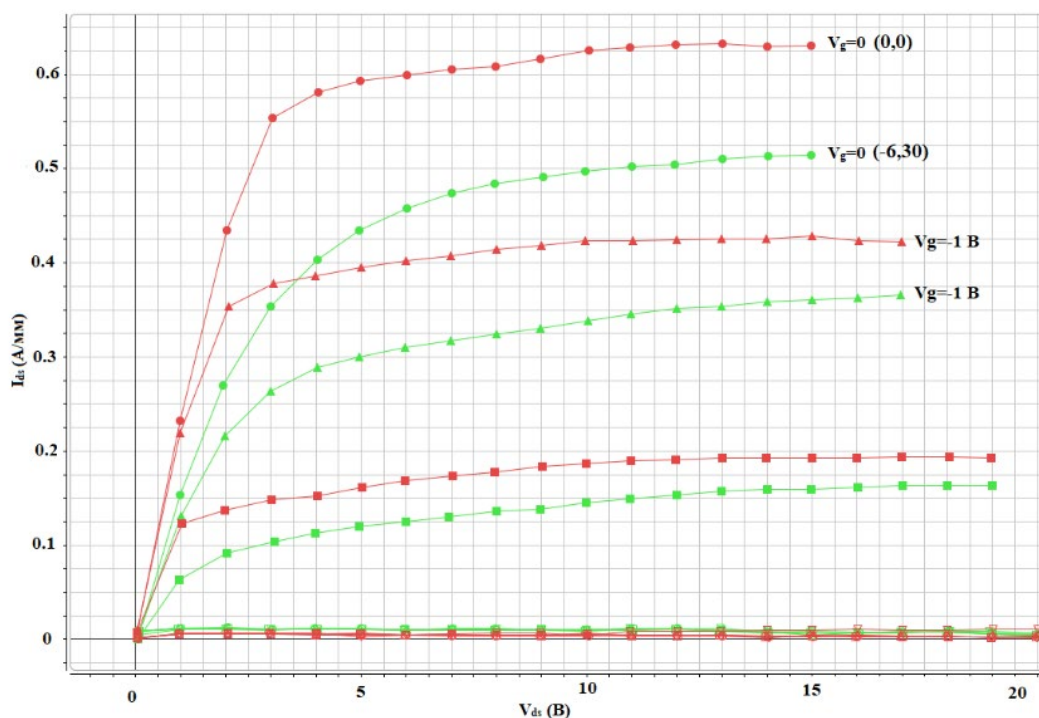


Рисунок 2.12 – Импульсные ВАХ AlGaIn/GaN НЕМТ с нелегированным буферным слоем GaN толщиной 1,8 мкм, измеренные для точек покоя ($V_g=0$, $V_{ds}=0$) (красные кривые) и ($V_g=-6$ В, $V_{ds}=30$ В) (зеленые кривые)

Для исследования причин появления эффекта коллапса тока были проведены измерения спектра ловушек в нелегированных слоях GaN. Измерения проводились методом фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS – photo-induced current transient spectroscopy). На образцах изготавливались омические контакты и полупрозрачные контакты с барьером Шоттки. Исследовался нелегированный слой GaN толщиной 1 мкм, выращенный на Al_2O_3 подложке в типичных для транзисторных гетероструктур режимах роста буферного слоя. Измерение ёмкости показало полное обеднение всего образца. Спектр PICTS (рисунок 2.13) указывает на присутствие одного доминирующего глубокого центра с энергией ионизации 1 эВ на котором закреплён уровень Ферми и который виден также и в температурной зависимости тока. Полученные данные не позволяют однозначно определить, электронная ли это ловушка в верхней половине запрещённой зоны или дырочная ловушка в нижней половине запрещённой зоны. 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.

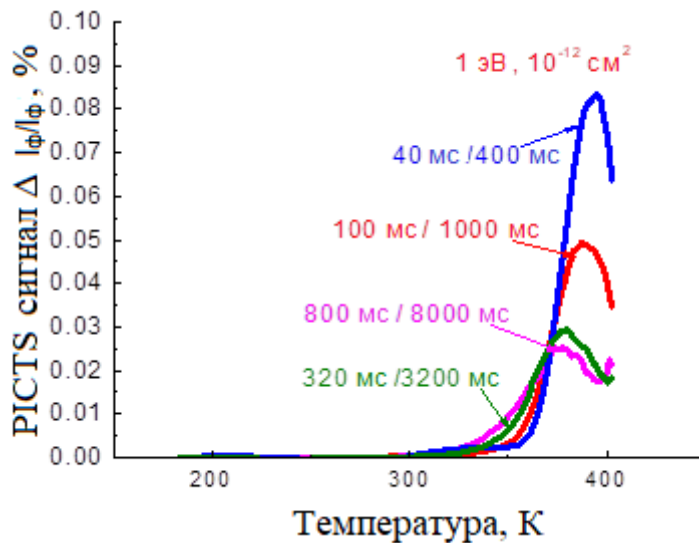


Рисунок 2.13 – Спектры PICTS, измеренные на нелегированном образце GaN при возбуждении светом с длиной волны 365 нм (длительность импульса 5 с) и напряжении -3В. Спектры показаны для нескольких значений временных окон, приведённых на графике

Для надежной работы транзистора в режиме усилителя мощности его напряжение пробоя должно быть в 2÷3 раза больше рабочего напряжения. Для таких задач нужна гетероструктура с буферным слоем, обеспечивающим значительно большее значение напряжения пробоя. Для транзисторов мм-диапазона необходим буферный слой, обеспечивающий минимальный ток утечки транзистора в закрытом состоянии, поскольку эта утечка, наряду с короткоканальными эффектами, ограничит выходную мощность и КПД транзистора. Возможный путь получения таких структур – легирование буферного слоя.

2.2.3 Буферные слои на основе GaN, легированного углеродом

Использование легированных углеродом буферных слоев позволяет подавить фоновую проводимость и обеспечить высокие значения напряжения пробоя в транзисторе. Верхнюю часть буферного слоя, образующую канал транзистора, оставляют 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 была выбрана на уровне $N_d \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Легирование буферного слоя снимает используемые при его росте технологические ограничения. Благодаря компенсации электронной проводимости появляется возможность изменить режим роста GaN, выбирая параметры роста, обеспечивающие более высокое кристаллическое совершенство буферного слоя. Это позволяет несколько улучшить подвижность двумерного электронного газа в гетероструктуре. Наиболее заметно это улучшение наблюдается для гетероструктур InAlN/GaN. На рисунке 2.14 приведены концентрации и подвижности электронов в гетероструктурах InAlN/GaN, измеренных при комнатной температуре и температуре жидкого азота с помощью метода Ван дер Пау и эффекта Холла для серии образцов с нелегированным и легированным углеродом буферным слоем. Подвижность двумерного электронного газа InAlN/GaN гетероструктуры с легированным углеродом буферным слоем при температуре 77°K почти в 2 раза больше, чем для структуры с нелегированным буферным слоем. При этой температуре подвижность носителей не ограничена рассеянием на оптических фононах (как на комнатной температуре), а ограничена несколькими механизмами рассеяния, связанными, в частности, с совершенством кристаллической структуры материала (рассеяние на шероховатости гетерограницы, на фоновых примесях, на дислокациях). Небольшие отличия в слоевой концентрации между этими гетероструктурами (рисунок 2.14,б) объясняются отличиями в форме потенциальной ямы двумерного газа и вкладом фоновой проводимости в слоевую концентрацию электронов для нелегированного образца.

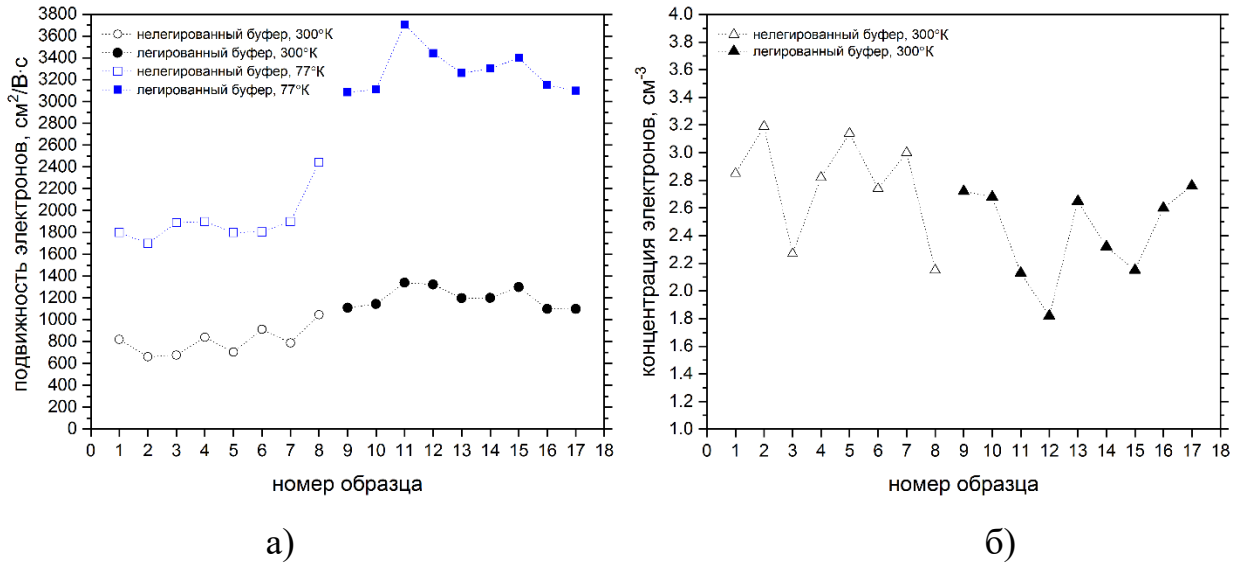


Рисунок 2.14 – Подвижность (а) и концентрация (б) электронов в InAlN/GaN гетероструктурах с нелегированным и легированным углеродом буферным слоем GaN, измеренные при $T=300^\circ\text{K}$ и $T=77^\circ\text{K}$

Параметрами процесса легирования, требующими правильного выбора, являются толщины легированной и нелегированной (канал) областей буферного слоя и поток прекурсора углерода, определяющий концентрацию легирования. Результаты, полученные на серии образцов, выращенных на карбидных и сапфировых подложках, приведены на рисунке 2.15. Из полученных результатов следует, что для повышения напряжения пробоя до 120-140 В необходимо, чтобы толщина нелегированного слоя GaN была снижена до $0,2\div 0,5$ мкм. Однако такое приближение легированного углеродом слоя к каналу приводит к ухудшению параметров импульсных ВАХ транзисторов. При расширении области легирования концентрация глубоких центров увеличивается, а сама область, содержащая эти центры, приближается к каналу транзистора. В результате увеличивается количество электронов, которые могут быть ими захвачены.

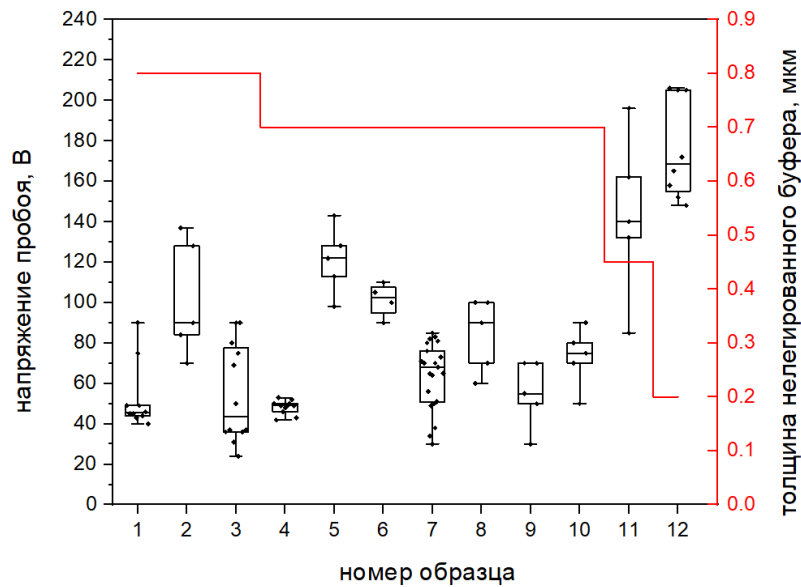
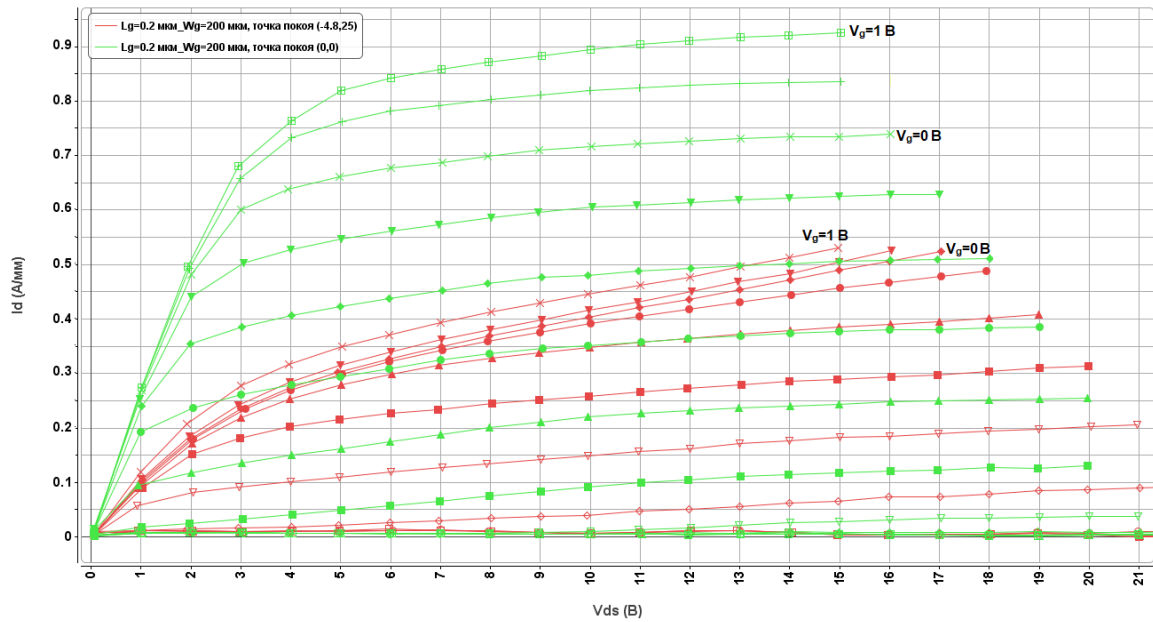


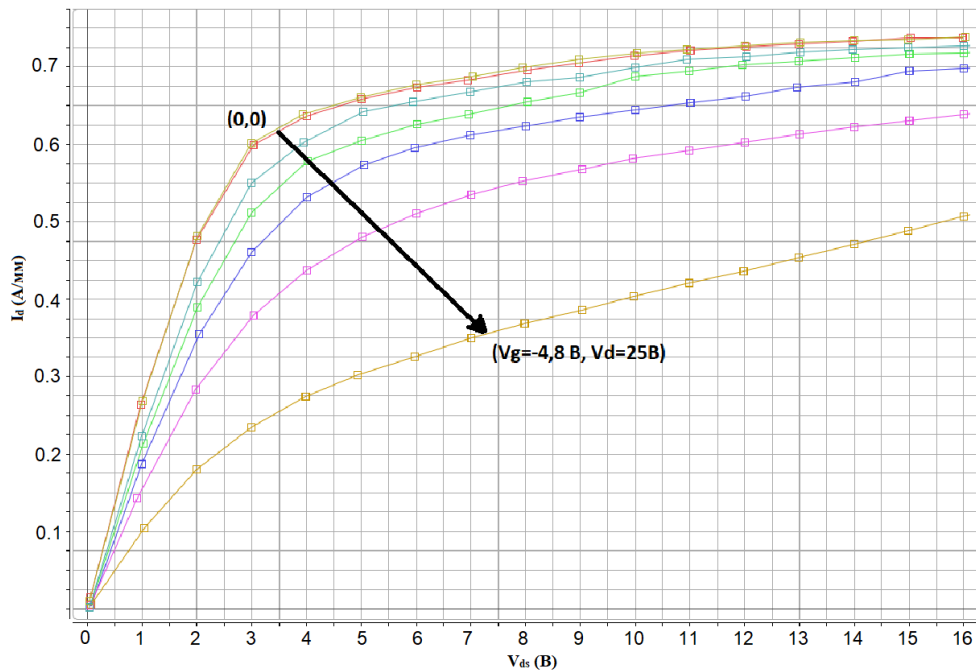
Рисунок 2.15 – Напряжения пробоя для различных толщин нелегированной части буферного слоя GaN (толщины канала) в серии образцов с С-легированным буферным слоем

На рисунке 2.16 приведена импульсная ВАХ AlGaIn/GaN HEMT с С-легированным буферным слоем и толщиной канала GaN 0,7 мкм. Коллапс тока, рассчитанный по формуле 1.7 для $V_{ds}=10$ В, увеличивается с ростом напряжения на стоке в точке покоя, достигая 55%, что значительно выше, чем для образцов с нелегированным буферным слоем. Сопротивление R_{on} транзистора также возрастает более чем в 2 раза (рисунок 2.16, б), что говорит о значительном увеличении слоевого сопротивления полупроводника между затвором и стоком. Приближение легированного углеродом слоя к каналу привело к увеличению коллапса по сравнению с нелегированными образцами, однако толщины нелегированного слоя равной 0,7 мкм недостаточно для достижения высоких напряжений пробоя в транзисторе. Характер зависимости коллапса тока от напряжения в точке покоя говорит о преимущественном влиянии ловушек в буферном слое на величину коллапса тока. Импульсные ВАХ AlGaIn/GaN HEMT для точки покоя ($V_g=-6$ В, $V_{ds}=0$ В) (режим измерения «gate lag»), это подтверждают, поскольку отсутствие значи-

тельного эффекта «gate lag» характерно для образцов с подавленными эффектами захвата носителей на поверхностных глубоких центрах.



а)



б)

Рисунок 2.16 – Импульсные ВАХ AlGaN/GaN НЕМТ с С-легированным буферным слоем GaN и каналом толщиной 0,7 мкм: а) ВАХ для точки покоя ($V_g=0$, $V_{ds}=0$) (зеленые кривые) и для ($V_g=-4,8 \text{ В}$, $V_{ds}=25 \text{ В}$) (красные кривые), б) ВАХ при $V_g=0$ при увеличении V_{ds} в точке покоя от 0 до 25 В

Сильный коллапс тока в сочетании с короткоканальными эффектами делают AlGaN/GaN НЕМТ с С-легированным буферным слоем GaN и каналом толщиной 0,7 мкм непригодным для изготовления мощных транзисторов мм-диапазона. Коллапс тока, наблюдаемый в транзисторах на InAlN/GaN гетероструктурах, однако, значительно меньше, чем в AlGaN/GaN транзисторах, и составляет около 10%. Эти различия можно объяснить различием гетероструктур на основе слоев InAlN и AlGaN. В InAlN/GaN толщина барьерного слоя составляет 5-7 нм, в то время как толщина AlGaN – 22 нм. Поскольку в данном случае коллапс тока обусловлен зарядом ловушек в буферном слое, то приближение затвора и шляпы затвора, образующей полевой электрод, а также пассивированной нитридом кремния поверхности к каналу должно снижать электрическое поля под затвором и влияние отрицательных зарядов в буферном слое на проводимость канала. Сдвиг напряжения насыщения наблюдается, и в импульсных характеристиках InAlN/GaN транзисторов (рисунок 2.17).

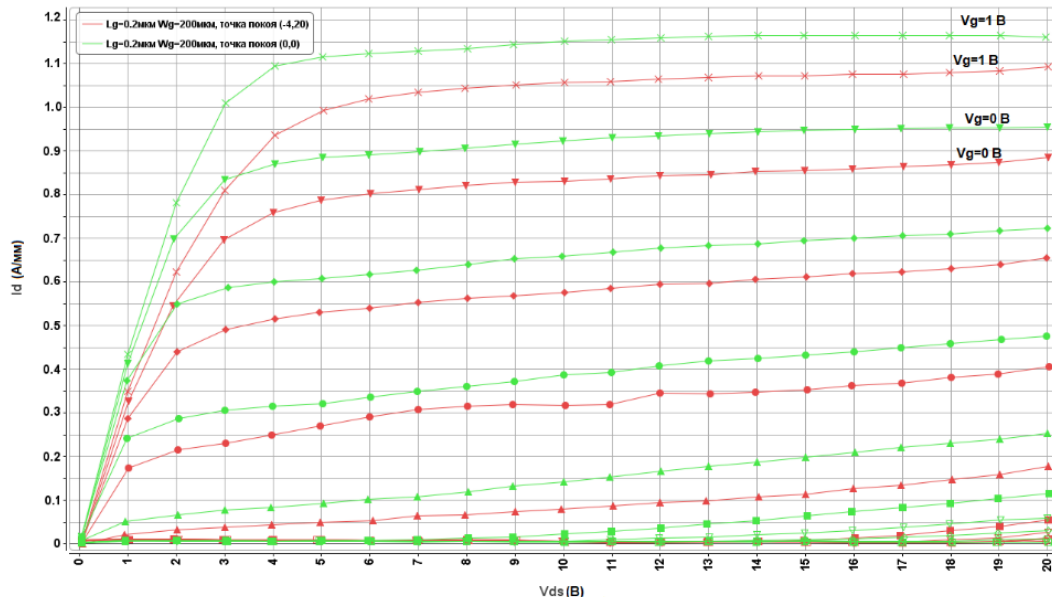


Рисунок 2.17 – Импульсные ВАХ InAlN/GaN транзистора с легированным углеродом буферным слоем и толщиной нелегированного канала 0,7 мкм, измеренные для точек покоя ($V_g=0$, $V_{ds}=0$) (зеленые кривые) и ($V_g=-4,0$ В, $V_{ds}=25$ В) (красные кривые)

Дальнейшее приближение легированного углеродом буферного слоя к каналу транзистора позволяет увеличить напряжение пробоя до $150 \div 200$ В, однако приводит к катастрофическому увеличению коллапса тока. На ВАХ AlGaN/GaN НЕМТ с толщиной нелегированного слоя $0,2$ мкм в импульсном режиме с точкой покоя $V_g = -8$ В, $V_{ds} = 30$ В ток в транзисторе снижается почти до нуля при низких напряжениях на стоке.

Результаты измерений профиля залегания углерода в буферном слое, проведенные методом вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС), приведены на рисунке 2.18. В исследуемом образце легирование было остановлено за $0,5$ мкм от поверхности. Из полученных результатов следует, что концентрация углерода резко падает сразу после выключения подачи прекурсора углерода в камеру роста и влияние углерода на концентрацию в канале будет незначительным. За счет этого можно использовать конструкции буферного слоя, в которых легированный слой приближен к каналу на расстояние до $0,1$ мкм.

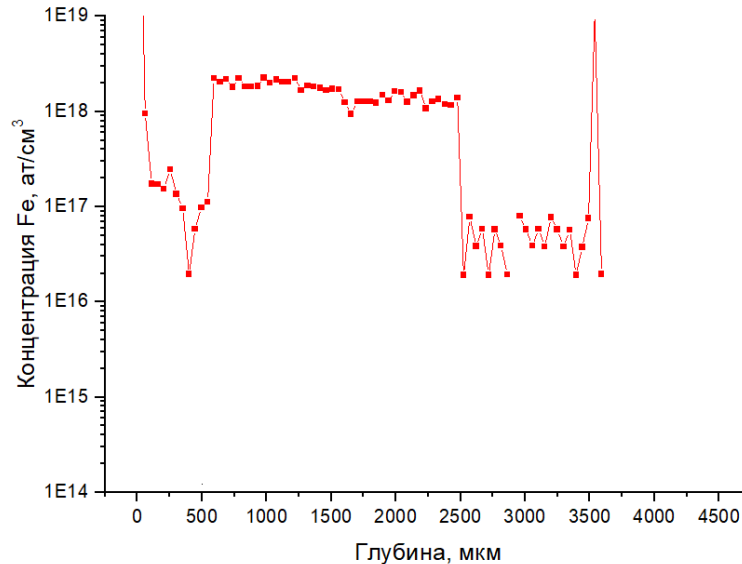


Рисунок 2.18 – ВИМС профиль концентрации атомов углерода в легированном углеродом буферном слое

Для легированных углеродом образцов проведено исследование спектра ловушек методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) с опти-

ческим возбуждением. В качестве образцов для РСГУ были использованы легированные кремнием ($N_d=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) слои толщиной 2 мкм, выращенные на легированных углеродом ($N_d=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) буферных слоях с толщинами 2 и 3 мкм. За счет оптического возбуждения на них получен большой сигнал фотоёмкости, возникающий за счет заполнения глубоких акцепторов дырками. Пороговая энергия фотонов, для которой появляется заметная фотоёмкость, близка к 3.1 эВ (длина волны 400 нм). Это означает, что уровни, с которых идёт генерация электронов, находятся в нижней половине запрещённой зоны и на них закреплён уровень Ферми, а образец является высокоомным с р-типа проводимостью. На рисунке 2.19 представлен спектр РСГУ, измеренный при возбуждении интенсивным светом с длиной волны 365 нм при приложении к образцу -2 В напряжения.

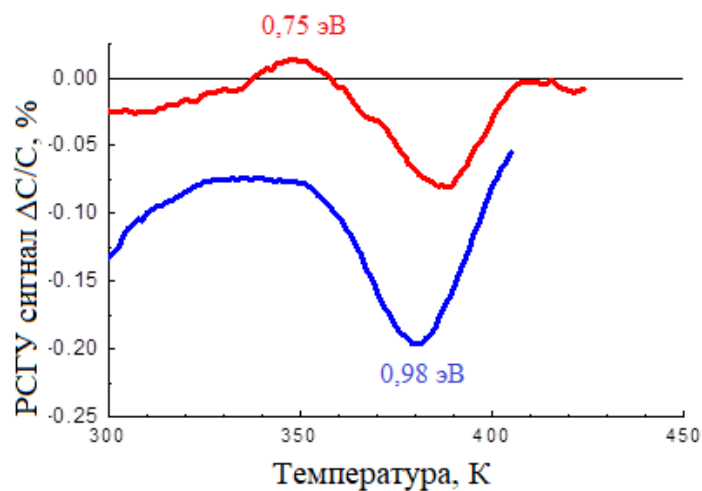


Рисунок 2.19 – Сравнение спектров оптической РСГУ для двух С-легированных образцов GaN толщиной 3 мкм (синяя кривая) и 2 мкм (красная кривая)

При температуре выше комнатной хорошо виден пик дырочных ловушек, для него получены значения энергии активации $E_a=0,94 \div 0,98 \text{ эВ}$ и сечения 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. Образец с большей толщиной С-легированного слоя показал больший сигнал с этим уровнем энергии активации, поэтому можно связать обнаруженный уровень с легированием углеродом. В спектре также наблюдались

электронные ловушки с энергией $E_c=0,57$ эВ и $E_c=0,75$ эВ. Полученный результат объясняет значительные изменения величины коллапса тока в импульсных ВАХ по сравнению с образцами НЕМТ с нелегированным буферным слоем. Появление в спектре РСГУ большого сигнала связанных с С-легированием дырочных ловушек с энергией активации $E_a=0,94\div 0,98$ эВ говорит о их значительной концентрации в буферном слое. Захват электронов на них приводит к возрастанию коллапса тока.

Полученные данные о ловушках были использованы при электрофизическом моделировании AlGaIn/GaN НЕМТ с С-легированным буферным слоем. Расчет зонной диаграммы показал, что для концентрации углерода в буферном слое GaN на уровне $5\cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$ уровень Ферми закрепляется в запрещенной зоне на уровне $E_v+0,9$ эВ, создавая барьер для проникновения электронов вглубь буферного слоя.

Для оценки короткоканальных эффектов в транзисторах с легированным углеродом буферным слоем было проведено сравнение выходной проводимости и напряжения пробоя в InAlIn/GaN НЕМТ с различными длинами затворов. Конструкция гетероструктуры состояла из выращенного на подложке SiC зародышевого слоя AlN, легированного углеродом буферного слоя GaN толщиной 0,8 мкм, нелегированного буферного слоя GaN толщиной 0,8 мкм, промежуточного слоя AlN толщиной 1 нм, барьерного InAlIn толщиной 5 нм с 15% индия и *in situ* SiN толщиной 5 нм. За счет тонкого барьерного слоя InAlIn должны быть сведены к минимуму короткоканальные эффекты, связанные с соотношением длины затвора к толщине барьерного слоя. В самых короткоканальных ($L_g=0,1$ мкм) из исследуемых транзисторов оно было больше 16. Из полученных данных о напряжении пробоя (рисунок 2.15) следует, что напряжение пробоя в буферном слое такой конструкции составляет более 110 В. Для сравнения выбирались ветки ВАХ вблизи напряжения отсечки, при напряжении на стоке равном $18\div 20$ В. С уменьшением длины затвора выходная проводимость начинает возрастать, что связано с короткоканальными эффектами в канале транзисторов (Таблица 2.3). Напряжение

пробоя в InAlN/GaN и AlGaIn/GaN HEMT с длиной затвора $0,2 \div 0,25$ мкм соответствует напряжению пробоя в буферном слое ($100 \div 120$ В).

Таблица 2.3– Выходная проводимость и напряжение пробоя в InAlN/GaN HEMT с С-легированным буферным слоем, каналом толщиной 0,8 мкм и различной длиной затворов

Параметры транзисторов	Длина затвора, мкм		
	Lg=0,1	Lg=0,15	Lg=0,2
Выходная проводимость g_d в InAlN/GaN HEMT, мСм/мм	≤ 6	≤ 4	≤ 3
Напряжение пробоя V_{ds} , В	50	70	110

Данные, приведенные в таблице 2.3, показывают, что профиль С-легирования буферного слоя, выбранный на основании данных о зависимости напряжения пробоя от глубины залегания примеси под каналом транзистора не обеспечивает необходимого для транзисторов мм-диапазона подавления короткоканальных эффектов. С помощью легирования углеродом можно значительно повысить напряжение пробоя в транзисторе, однако вместе с углеродом в структуре появляется глубокий акцепторный уровень, расположенный на 0,9 эВ выше валентной зоны. Захват электронов на этот уровень приводит к значительной деградации импульсных характеристик транзистора ВАХ [179,184]. Это означает, что мощностные свойства транзистора в СВЧ диапазоне также будут ухудшаться: из-за эффектов коллапса тока и сдвига напряжения насыщения уменьшится амплитуда выходного тока и напряжения, и, следовательно, снизится выходная мощность транзистора. Для устранения короткоканальных эффектов необходимо приближать легированный углеродом слой к каналу на расстояние менее 0,7 мкм, что вызывает рост коллапса тока. Возможным решением проблемы является выбор режимов роста канала, аналогичный режимам роста нелегированного буфера, обеспечивающий подавление фоновой проводимости за счет ростовых дефектов. Однако в этом случае можно ожидать ухудшения электрофизических параметров

двумерного газа и снижения надежности из-за увеличения концентрации дефектов кристаллической решетки.

2.2.4 Буферные слои на основе GaN, легированного железом

Использование легированных железом буферных слоев в СВЧ транзисторах является широко применяемой альтернативой легированию углеродом. Отличительной особенностью легирования железом является значительная сегрегация железа на поверхности при эпитаксиальном росте, приводящая к постепенному снижению концентрации железа в слое GaN. Предварительные эксперименты показали, что для компенсации фоновой электронной проводимости в GaN буфере требуется введение железа с объемной концентрацией $N_d \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При такой концентрации после остановки легирования железо будет присутствовать в значительных концентрациях ($\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$) в канале транзистора, даже если легирование остановлено на расстоянии 0,5 мкм от гетерограницы с 2DEG. Данные о влиянии толщины канала на подвижность и концентрацию 2DEG, приведены на рисунках 2.20 и 2.21, соответственно.

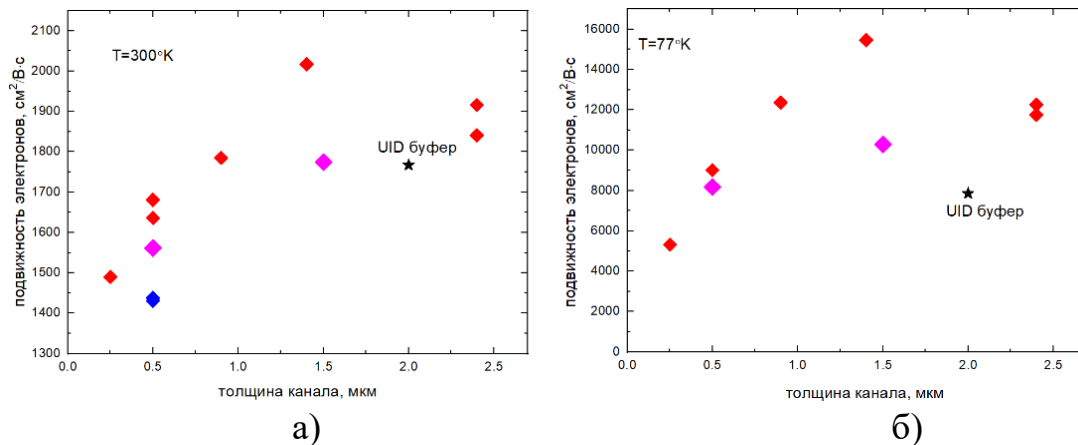


Рисунок 2.20 – Подвижность электронов в гетероструктуре AlGaIn/GaN при 300°K (а) и 77°K (б) для различной толщины нелегированной части буферного слоя (толщины канала) для образцов с легированным железом буферным слоем.

Данные для нелегированного буферного слоя обозначены «UID буфер»

Несмотря на различия в данных между образцами, на графике видно снижение подвижности при расстоянии 0,5 мкм и менее от канала до легированного железом буферного слоя. Снижение концентрации в канале также наблюдается уже при толщине канала 0,5 мкм.

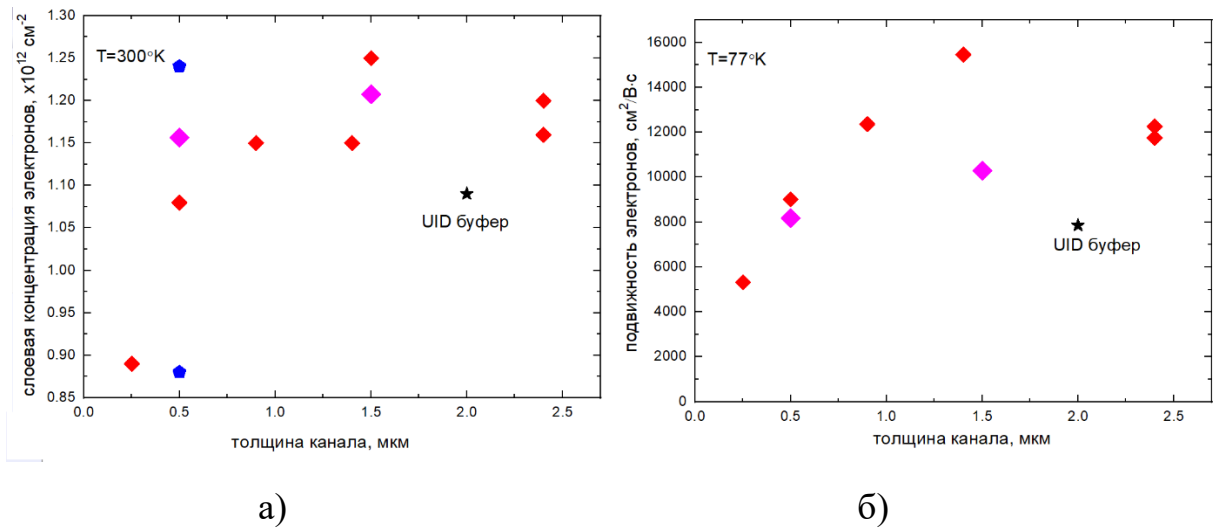


Рисунок 2.21 – Концентрация электронов в гетероструктурах AlGaN/GaN с различной толщиной канала при 300°K (а) и 77°K (б) для серии образцов с Fe-легированием буферным слоем. Данные для нелегированного буферного слоя обозначены «UID буфер»

Снижение подвижности и концентрации в канале транзистора объясняется сегрегацией железа на поверхности при росте Fe-легированного буферного слоя, за счет чего его профиль концентрации не имеет резкой границы после выключения подачи в камеру эпитаксиального роста прекурсора железа. Для уточнения профиля залегания железа в буферном слое были проведены измерения методом вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС), их результаты приведены на рисунке 2.22. В исследуемом образце легирование было остановлено за 1,5 мкм от поверхности. Концентрация железа уменьшается до 10^{16} cm^{-3} на толщине GaN $0,5 \div 0,6$ мкм. Из это следует, что если для получения требуемого напряжения пробы легированный слой надо приближать к каналу на расстояние от 0,5 мкм, то

при выборе легирующей примеси железа это может быть сделано только ценой ухудшения электрофизических параметров гетероструктуры.

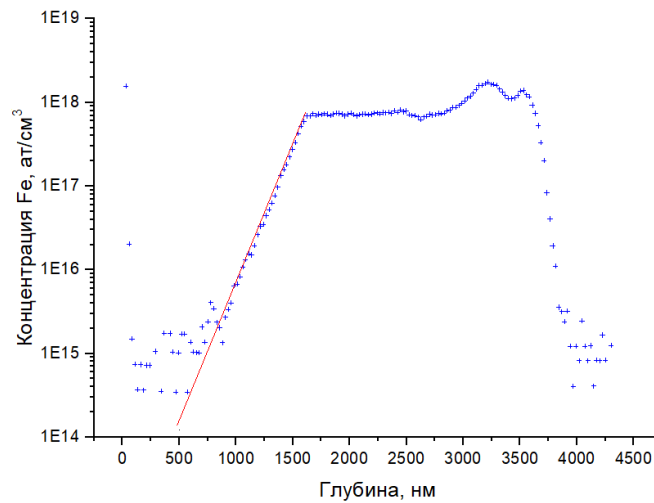


Рисунок 2.22 – ВИМС профиль концентрации атомов железа в легированном железом буферном слое

Результаты, полученные на серии образцов, выращенных на карбидных и сапфировых подложках, приведены на рисунке 2.23. При толщине нелегированного канала $1 \div 1,5$ мкм на большей части образцов напряжение пробоя находится в диапазоне $35 \div 70$ В при небольшом разбросе значений напряжения по пластине. Высокие значения напряжений пробоя (более 100 В), полученные на двух образцах с толщиной канала 1,5 мкм, вероятно связаны особенностями использованных подложек (оба образца изготовлены одного слитка). Нестабильное качество подложек, влияющее на фоновую концентрацию электронов в буферном слое, заставляют выбирать профиль легирования, позволяющий получать полуизолирующий нитрид галлия вне зависимости от присущих материалам подложек от различных производителей отличий в уровне дефектов. Поэтому для подавления фоновой проводимости в буферных слоях для большинства подложек необходимо уменьшить толщину нелегированной части буферного слоя до $0,5 \div 1$ мкм. Выбирая равным 0,5 мкм расстояние от канала до слоя, в котором заканчивается легирование GaN железом, можно получить напряжение пробоя выше 120 В на всей пластине.

Концентрация примеси в верхней части канала транзистора толщиной 0,5 мкм может достигать нескольких единиц 10^{16}см^{-3} , что неизбежно приводит к уменьшению на 10÷20% концентрации электронов в канале (рисунок 2.20, 2.21).

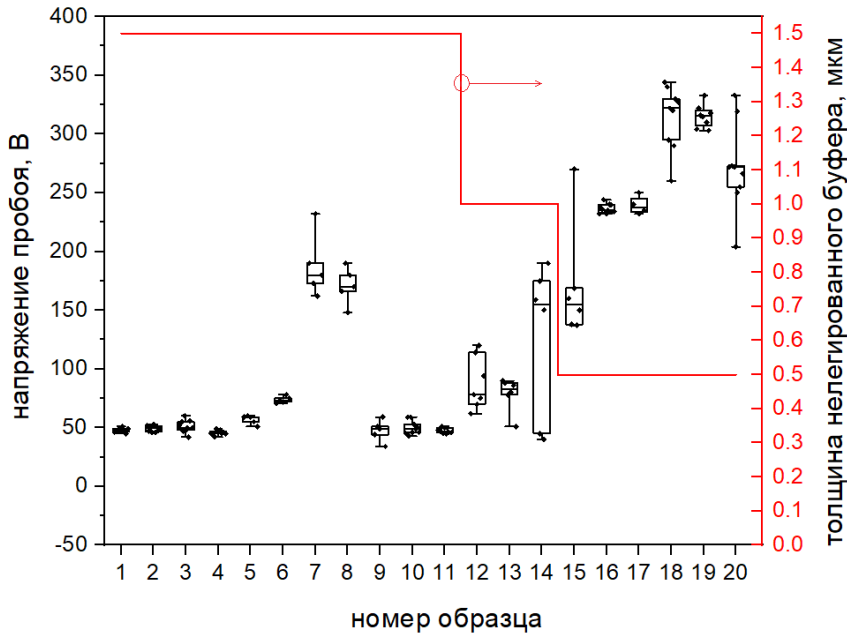


Рисунок 2.23 – Напряжение пробоя для различных толщин нелегированной части буферного слоя (толщины канала) в серии образцов с легированным железом буферным слоем

Импульсные ВАХ AlGaIn/GaN HEMT с толщиной канала 1 мкм приведены на рисунке 2.24. Коллапс тока в транзисторах с такой конструкцией буферного слоя, измеренный при напряжении на стоке, равном 10 В, находится в диапазоне 12-22%. Приближение легированного буферного слоя к каналу слабо влияет на величину коллапса, но влияет на сдвиг напряжения насыщения и величину R_{on} транзистора. Последние два эффекта увеличиваются с уменьшением толщины канала.

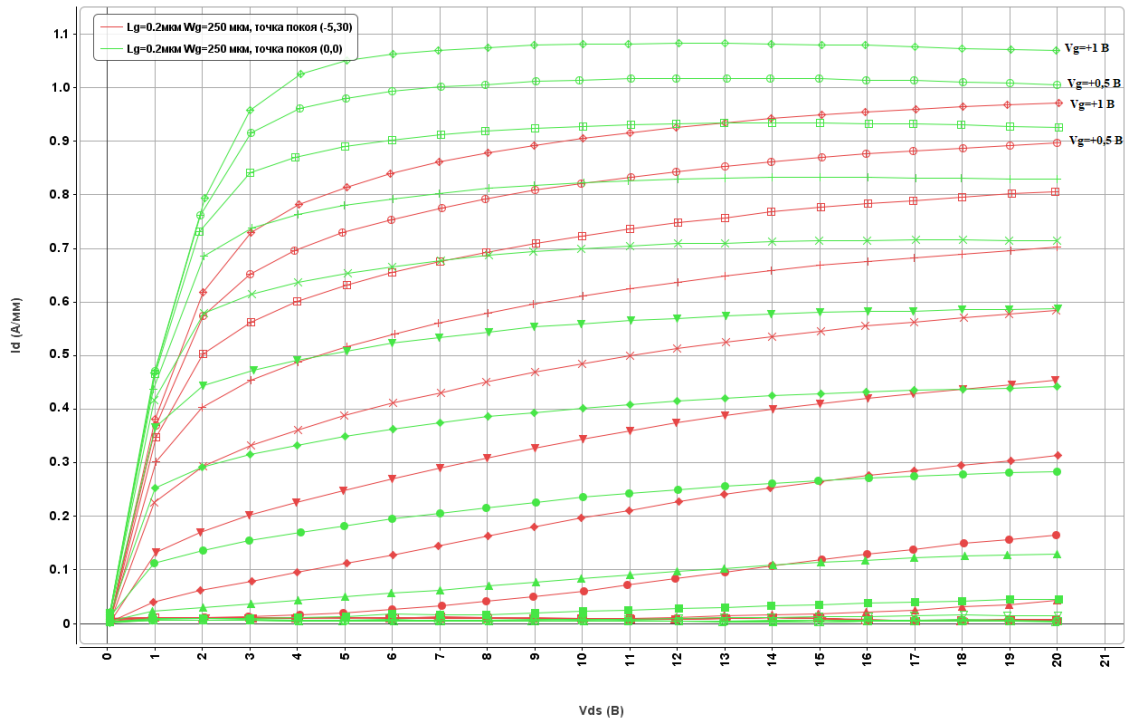


Рисунок 2.24 – Импульсные ВАХ AlGaN/GaN НЕМТ с Fe-легированным буферным слоем и каналом толщиной 1 мкм, измеренные для точек покоя ($V_g=0$, $V_{ds}=0$) (зеленые кривые) и ($V_g=-5$ В, $V_{ds}=30$ В) (красные кривые)

В отличие от AlGaN/GaN транзисторов, на ВАХ InAlN/GaN НЕМТ с легированным железом буферным слоем и толщиной канала 0,5 мкм, приведенных на рисунке 2.24, коллапс тока ограничен $5 \div 20\%$. Наблюдается небольшой (до 1 В) сдвиг напряжения насыщения и также небольшой (менее 0,04 А/мм) «kink» эффект.

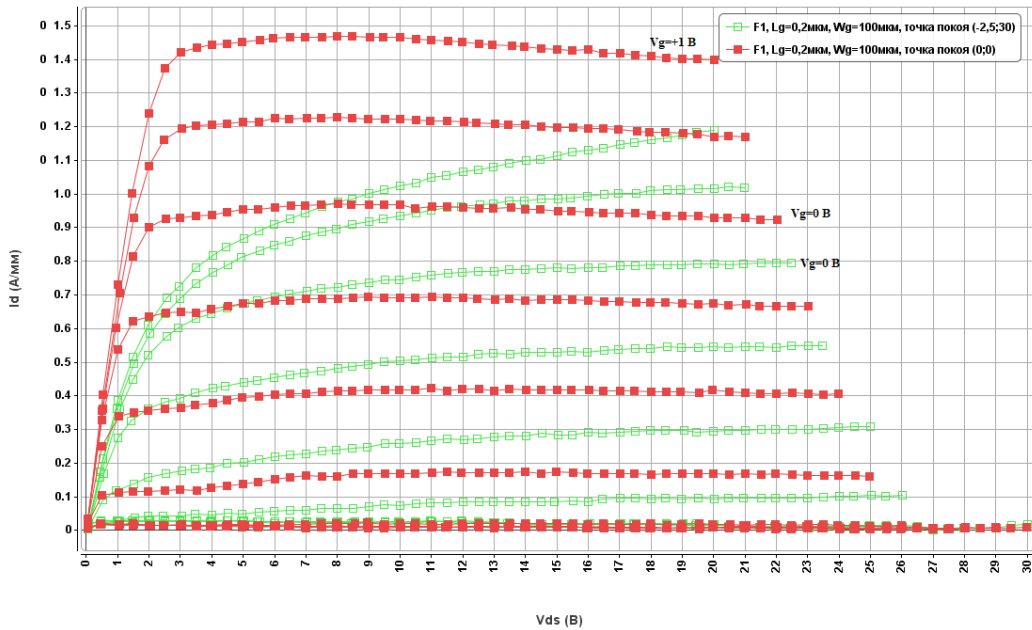


Рисунок 2.25 – Импульсные ВАХ InAlN/GaN транзисторов с Fe-легированным буферным слоем и толщиной канала 0,5 мкм, измеренные для точки покоя ($V_g=0$, $V_{ds}=0$) (красные кривые) и для точки покоя ($V_g=-2,5$ В, $V_{ds}=30$ В) (зеленые кривые)

В Таблице 2.4 приведены параметры InAlN/GaN и AlGaIn/GaN транзисторов, полученные из измерений их импульсных ВАХ. Полученные для обоих типов транзисторов параметры позволяют рассчитывать на получение высоких значений мощности в тех диапазонах СВЧ, для которых требуются длины затворов 200 и более нм. Несмотря на очень тонкий барьерный слой, величина напряжения пробоя в InAlN/GaN транзисторах оказалась больше, чем в AlGaIn/GaN. Одной из вероятных причин большое аспектное соотношение длины затвора к толщине барьера в InAlN/GaN, что обеспечивает более низкий уровень максимальных электрических полей в области между стоком и истоком транзистора.

Таблица 2.4 – Параметры транзисторов с различным профилем легирования железом буферного слоя.

Параметры транзисторов	Толщина нелегированной части буферного слоя, мкм		
	0,5	1	1,5
AlGaIn/GaN HEMT			
коллапс тока в (для $V_{ds}=10$ В), %	14÷29	22	–
сдвиг напряжения насыщения, В	2	0	–
выходная проводимость g_d , мСм/мм	0	<4	–
напряжение пробоя исток-сток V_{ds} , В	>150	>90	–
InAlIn/GaN HEMT			
коллапс тока (для $V_{ds}=10$ В), %	5÷22	–	<26
сдвиг напряжения насыщения, В	<1	–	<2
выходная проводимость g_d , мСм/мм	0	–	15
напряжение пробоя исток-сток V_{ds} , В	>200	–	<50

Для оценки короткоканальных эффектов в транзисторах с легированным железом буферным слоем было проведено сравнение выходной проводимости в AlGaIn/GaN транзисторов с различными длинами затворов. Конструкция гетероструктуры состояла из выращенного на подложке SiC зародышевого слоя AlN, легированного железом буферного слоя GaN толщиной 0,8 мкм, нелегированного буферного слоя GaN толщиной 1 мкм, промежуточного слоя AlN толщиной 1 нм, барьерного AlGaIn толщиной 22 нм с 24% алюминия и in situ SiN толщиной 5 нм. Выбранная толщина барьерного слоя AlGaIn должна увеличить наблюдаемые короткоканальные эффекты, связанные с аспектным соотношением длины затвора к толщине барьерного слоя. Для самых короткоканальных ($L_g=0,1$ мкм) из исследуемых транзисторов оно было равно 23. Напряжение пробоя в буферном слое данного образца составляло 120 В. Для сравнения выбирались ветки ВАХ вблизи напряжения отсечки, при напряжении на стоке равном 18÷20 В. С уменьшением длины затвора выходная проводимость в транзисторах начинает возрастать, что связано с короткоканальными эффектами в канале транзисторов (Таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Выходная проводимость ВАХ и напряжение пробоя AlGaIn/GaN транзисторов с различными длинами затворов и толщиной нелегированного буферного слоя GaN 1 мкм.

Длина затвора, мкм	$L_g=0,1$	$L_g=0,15$	$L_g=0,2$
Выходная проводимость g_d , мСм/мм	≤ 5	$\leq 4,5$	≤ 4
Напряжение пробоя V_{ds} , В	> 80	> 120	> 150

Несмотря на вклад в короткоканальные эффекты высокого аспектного соотношения длины затвора к толщине барьерного слоя, выходная проводимость в образце с легированным буферным слоем не имеет больших отличий от наблюдаемых значений в InAlN/GaN транзисторах (Таблица 2.5 и Таблица 2.3). Таким образом, при легировании буферного слоя железом и толщине канала $0,5 \div 1,0$ мкм возможно получение короткоканальных ($L_g < 0,15$ мкм) транзисторов с умеренными по сравнению с альтернативными конструкциями эффектами короткого канала, коллапса тока, «kink» эффекта и эффекта сдвига напряжения насыщения. Среди негативных эффектов на первый план для такой конструкции выходит ухудшение электрофизических параметров гетероструктуры из-за фоновой концентрации железа в канале. Полностью устранить такое влияние в рамках однослойной конструкции буферного слоя невозможно, поскольку удаление легированного слоя от канала и снижение концентрации железа приводит к повышению разброса значений получаемых параметров гетероструктуры.

Измерение спектра ловушек на Fe-легированных образцах проводились методом РСГУ с оптическим возбуждением и методом PICTS. В качестве образцов был использован легированный кремнием ($N_d = 1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и железом частично компенсированный слой GaN толщиной 1 мкм, лежащий на нелегированном слое нитрида галлия толщиной 1 мкм. Все слои были выращены на сапфировой подложке. В отличие от образцов, легированных углеродом, фотоны с энергией 2 эВ создают заметную фотоёмкость, что свидетельствует о том, что уровень Ферми закреплён в верхней половине запрещённой зоны на уровне железа. В нормированных на стационарный фототок спектрах PICTS (рисунок 2.26), наблюдались

два пика: один, соответствующий энергии ионизации центра 0,52 эВ с сечением захвата $9,2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, скорее всего, связанный с железом, и второй, соответствующий энергии ионизации 1 эВ, судя по сечению захвата дырок (10^{-13} см^2), связанный с выбросом дырок с уровня двухзарядных акцепторов, образованных комплексами вакансий галлия и кремния, $(V_{\text{Ga-Si}})^{2-}$ [185], хотя нельзя исключить возможную связь этих дефектов и с углеродом (т.к. параметры центров близки). В большинстве случаев амплитуда пиков должна быть пропорциональна концентрации дефектов [186]. Однако концентрация железа в образце составляет более 10^{18} см^{-3} , что не соответствует величине наблюдаемого пика. Измеряемые методами РСГУ концентрации акцепторов с уровнем около 1 эВ от края валентной зоны никогда не бывают настолько высокими [185], если образец не легируется специально углеродом. Причиной заниженной концентрации уровней железа в спектре является, по-видимому, то, что железо – очень эффективный центр безызлучательной рекомбинации в нитриде галлия [186] и на нём трудно создать с помощью собственного света большую концентрацию неравновесных электронов. Для уточнения полученных параметров глубоких центров в легированном железом нитриде галлия измерения были проведены также на образце с легированным железом высокоомным слоем GaN толщиной 2 мкм, выращенным на сапфировой подложке. Для него в спектре РСГУ обнаружено присутствие центров с энергией ионизации 0,5 эВ, связанных с железом, и глубоких ловушек с энергией ионизации около 1 эВ. Для центра с энергией активации 0,5 эВ получено сечение захвата электронов $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$. Этот центр-акцепторный уровень железа, на котором закреплён уровень Ферми. Ловушки с энергией ионизации около 1 эВ принадлежат акцепторам в нижней половине запрещённой зоны. Это либо комплексы вакансий галлия с кремнием, либо углеродные акцепторы.

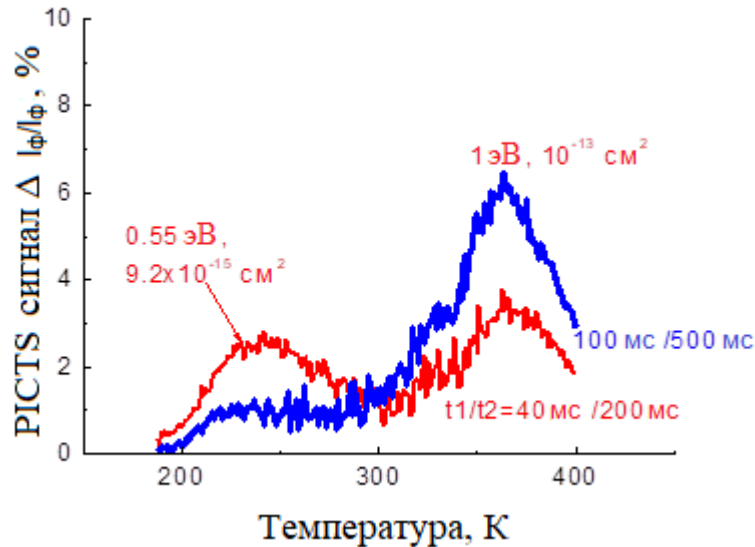


Рисунок 2.26 – Спектры PICTS для образца с легированным железом слоем GaN толщиной 1 мкм, снятые при возбуждении светом с длиной волны 365 нм (длительность импульса 5 с) для разных временных окон, значения которых приведены рядом со спектрами

Полученные данные о ловушках были использованы при электрофизическом моделировании AlGaN/GaN HEMT с Fe-легированным буферным слоем. Расчет зонной диаграммы показал, что для концентрации железа в буферном слое GaN на уровне $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ уровень Ферми закрепляется в запрещенной зоне на уровне $E_c - 0,5 \text{ эВ}$, создавая барьер для проникновения электронов вглубь буферного слоя.

Полученные для легированных железом буферных слоев результаты показывают эффективность легирования железом для получения высоких напряжений пробоя и низких значений коллапса тока [179,184]. Важным негативным последствием использования легирования железом буферного слоя является ухудшение электрофизических параметров двумерного электронного газа.

2.2.5 Буферные слои на основе GaN, легированного железом и углеродом

Результаты, полученные на образцах с высокоомными буферными слоями, полученными на основе нелегированных и легированных углеродом или железом, показали, что, выбирая соответствующие режимы роста буферного слоя, можно получать напряжение пробоя в буферных слоях в диапазоне 100÷200 В. Однако такой способ повышения напряжения пробоя может приводить, в зависимости от выбора конструкции буферного слоя, к снижению концентрации и подвижности электронов в канале, увеличению коллапса тока и проявлению на ВАХ других эффектов, связанным с ловушками в буферном слое. Легирование железом является оптимальным решением проблемы, позволяющим минимизировать потери параметров транзисторов от этих эффектов. Но необходимость удалять легированный железом слой как минимум на 0,5 мкм от канала не дает требуемой в короткоканальных транзисторах пространственной локализации зарядов в двумерном электроном газе, а также снижает подвижность и концентрацию электронов в двумерном газе. Использование легированного железом буферного слоя в транзисторах мм-диапазона приводит к тому, что короткоканальные эффекты становятся основным фактором, ограничивающим получение высоких значений мощности, усиления и КПД. ВАХ InAlN/GaN и AlGaN/GaN транзисторов, приведенные на рисунках 2.24 и 2.25, имеют значительный (≈ 2 В) сдвиг порогового напряжения при $V_{ds}=20$ В. Возможными решениями проблемы является применение совместного легирования железом и углеродом, использование дополнительных барьерных слоев под каналом (обратный барьер - англ. backbarrier), а также использование гетероструктур, в которых поверхностью эпитаксиального роста является N-плоскость в GaN. В короткоканальных транзисторах основным наблюдаемыми эффектами являются сдвиг напряжения отсечки и рост выходной проводимости канала при увеличении напряжения. Для проверки возможностей совместного легирования буферного слоя углеродом и железом были выращены образцы, в кото-

рых менялись толщина канала, толщина и профиль легирования легированного углеродом буферного слоя, и параметры совместно легированного углеродом и железом буферного слоя. Поскольку профиль концентрации при легировании углеродом имеет резкие границы, можно расположить легированный углеродом слой на небольшом расстоянии от двумерного электронного газа. При этом появляется возможность исследовать несколько вариантов профилей легирования, отличающихся взаимным расположением и толщиной легированных железом и углеродом буферных слоев. На рисунке 2.27 показаны конструкции исследованных образцов с буферными слоями, легированными железом и углеродом. Для сравнения приведена гетероструктура с легированным железом буферным слоем, и нелегированным каналом толщиной 0,5 мкм (обозначена как F1). В образцах с конструкциями CF1, CF2 и CF3 буферные слои состоят из трех слоев разной толщины: нелегированный слой (канал) толщиной 0,1 мкм (CF1, CF3, CF4) и 0,5 мкм (CF2), легированный углеродом буферный слой толщиной 0,9 мкм (CF1), 0,5 мкм (CF2), 1,4 мкм (CF3) и 0,4 мкм (CF4). В образце CF4 легированный углеродом слой имеет неоднородный профиль легирования: в его нижней половине концентрация углерода линейно нарастает. Под этими слоями находится легированный железом (CF4) либо совместно легированный углеродом и железом (CF1, CF2, CF3) буферный слой толщиной около 2 мкм.

барьерные слои InAlGaN	барьерные слои InAlGaN	барьерные слои InAlGaN	барьерные слои InAlGaN	барьерные слои InAlGaN
2 DEG	2 DEG	2 DEG	2 DEG	2 DEG
буферный слой (канал) GaN толщина 0,5 мкм	буферный слой (канал) GaN толщина 0,1 мкм	буферный слой (канал) GaN толщина 0,5 мкм	буферный слой (канал) GaN толщина 0,1 мкм	буферный слой (канал) GaN толщина 0,1 мкм
	буферный слой GaN легирован C толщина 0,9 мкм	буферный слой GaN легирован C толщина 0,5 мкм	буферный слой GaN легирован C толщина 1,4 мкм	буферный слой GaN легирован C $N_A = 0 \dots 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ толщина 0,2 мкм
буферный слой GaN легирован Fe	буферный слой GaN легирован Fe и C	буферный слой GaN легирован Fe и C	буферный слой GaN легирован Fe	буферный слой GaN легирован Fe
подложка Al ₂ O ₃	подложка Al ₂ O ₃	подложка Al ₂ O ₃	подложка Al ₂ O ₃	подложка Al ₂ O ₃
F1	CF1	CF2	CF3	CF4

Рисунок 2.27 – Конструкции буферных слоев образцов, легированных железом и углеродом

Анализируя полученные данные о напряжении пробоя в этих образцах, надо учитывать, что гетероструктура в тесте была вытравлена на глубину $0,15 \div 0,2$ мкм, поэтому у образцов CF1, CF3 и CF4 легированный углеродом слой после травления находился на поверхности. Сравнение напряжений пробоя образцов, приведенное на рисунке 2.28, показывает, что изменение толщины нелегированного углеродом буферного слоя слабо влияет на измеренные напряжения пробоя. Основным фактором, определяющим диапазон напряжения пробоя, является толщина нелегированного железом буферного слоя: при толщине $0,5$ мкм напряжение пробоя становится выше 200 В. Использование совместного легирования углеродом и железом буферных слоев не оказывает заметного влияния на напряжение пробоя, при этом образцы с нелегированным каналом толщиной $0,5$ мкм имеют на $20 \div 30$ В меньше напряжение пробоя.

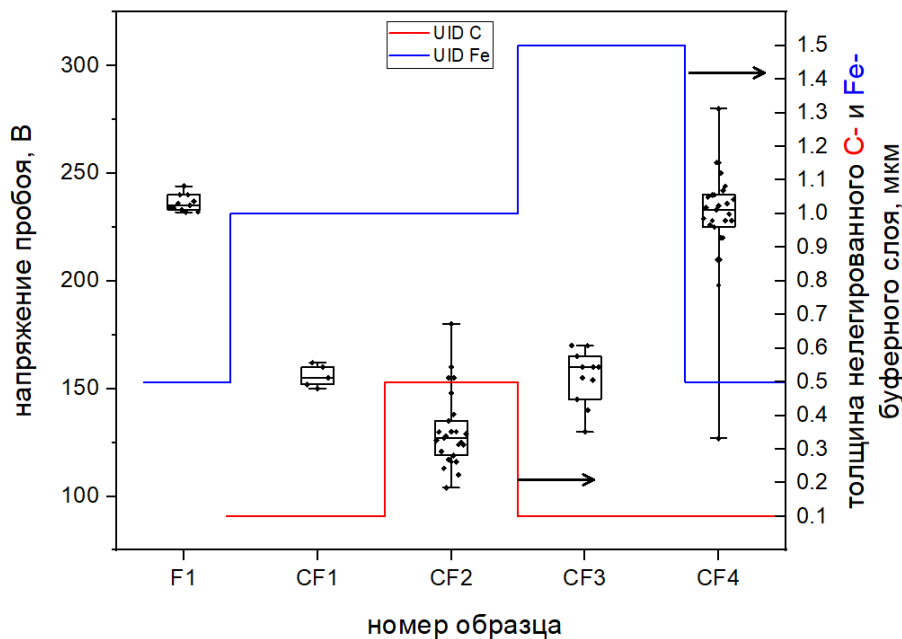


Рисунок 2.28 – Напряжение пробоя буферных слоев образцов, легированных железом и углеродом. Толщины нелегированных углеродом и железом областей буферного слоя обозначены как UID C и UID Fe соответственно

Для всех образцов на измеренных ВАХ тестов для контроля напряжения пробоя отсутствовали токи утечки вплоть до наступления пробоя. Для выяснения влияния профилей легирования буферного слоя на коллапс тока и напряжение пробоя в транзисторах на образцах с конструкциями CF2, CF3, CF4 были изготовлены транзисторы с длиной затвора 0,2 мкм и шириной 100 мкм.

Результаты измерения ВАХ транзисторов вблизи максимального напряжения на стоке и минимальных токов исток-сток приведены на рисунке 2.29. Для сравнения приведена характеристика транзистора с конструкцией буферного слоя F1. В отличие от Fe-легированного НЕМТ, вблизи отсечки транзистор с конструкцией CF3, в которой расстояние до легированного железом слоя составляет 1,5 мкм, демонстрирует токи, уменьшающиеся при приложении напряжения на затвор токи утечки. Приложение дополнительных 10 В к напряжению отсечки позволяет значительно уменьшить ток утечки в транзисторе, что говорит о наличии небольшой концентрации электронов в канале транзистора, остающейся несмотря на легирование остальной части буферного слоя углеродом. Аналогичный эффект наблюдается и для структуры CF2.

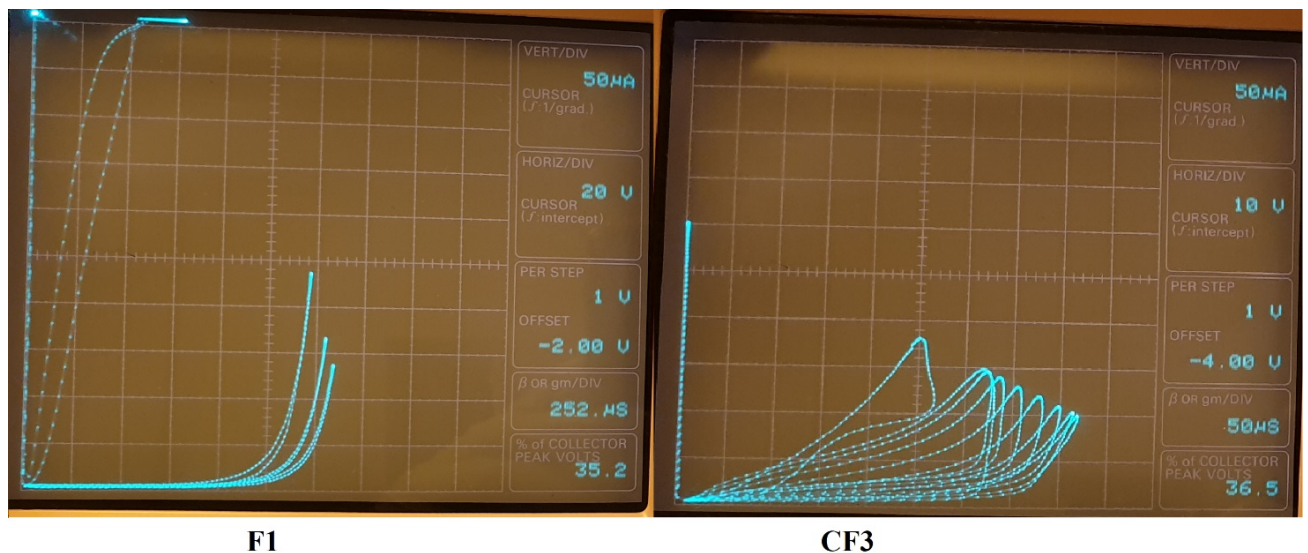


Рисунок 2.29 – Сравнение ВАХ AlGaIn/GaN НЕМТ вблизи напряжения пробоя: с Fe-легированным конструкции F1 и с Fe-/C-легированным буферным слоем конструкции CF3

Сравнение слоевого сопротивления двумерного газа в гетероструктурах Al-GaN/GaN, приведенное в Таблице 2.6, показывает, что включение в конструкцию слоя, легированного углеродом и расположенного над легированным железом буферным слоем, не вызывает увеличения слоевого сопротивления гетероструктуры. Более того, для обоих типов гетероструктур наблюдается уменьшение слоевого сопротивления AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур до уровня, получаемого в образцах с легированным железом буферным слоем, удаленным на $1 \div 1,5$ мкм от канала (обозначены в Таблице 2.6 как F1 и F2). Таким образом, использование многослойной конструкции буферных слоев, включающей легированные железом и углеродом слои, позволяет удалить легированный железом слой буфера на расстояние $0,5 \div 1,5$ мкм от канала без катастрофического снижения напряжения пробоя и сохранением слоевого сопротивления двумерного электронного газа.

Таблица 2.6– Параметры гетероструктур и транзисторов с $L_g=0,2$ мкм в образцах с различным легированием буферного слоя

Параметры гетероструктур и транзисторов	Конструкция буферного слоя					
	CF1	CF2	CF3	CF4	F1	F2
толщина нелегированного углеродом слоя, мкм	0,1	0,5	0,1	0,1	–	–
AlGaN/GaN						
толщина нелегированного железом слоя, мкм	1	1	1,5	0,5	0,5	1,0
слоевое сопротивление, Ом/□	–	304	326	346	342	300÷340
максимальный ток, А/мм (при $V_g = +1$ В)	–	–	1,2	1,0	1,1	1,1÷1,2
коллапс тока, % (при $V_d=10$ В)	–	–	68	52	14÷29	12÷22
выходная проводимость g_d , мСм/мм	–	–	0	0	0	4.5
напряжение пробоя V_{ds} , В	–	–	85	>150	>150	–
InAlN/GaN						
толщина нелегированного железом слоя, мкм	1	1	1,5	0,5	0,5	1,5
слоевое сопротивление, Ом/□	239	24	–	–	255	220÷240
максимальный ток, А/мм (при $V_g = +1$ В)	–	0,95	–	–	1,4	1,44
коллапс тока в, % (при $V_d=10$ В)	–	5÷9	–	–	5÷22	27
выходная проводимость g_d , мСм/мм	–	7÷10	–	–	0	<6
напряжение пробоя V_{ds} , В	–	100	–	–	>200	–

Импульсные измерения образцов транзисторов с такой конструкцией буферного слоя показали увеличение коллапса тока из-за приближения легированного углеродом слоя к каналу (на 0,1 мкм). Падение тока для минимальных тол-

щин нелегированного канала оказывается большим как в образцах с чисто углеродным легированием, так и с легированием углеродом и железом. С другой стороны, используя С- и Fe- легирование в InAlN/GaN НЕМТ, можно добиться сочетания высокого напряжения пробоя с умеренным коллапсом тока, небольшими токами утечки в транзисторе (образцы с конструкцией буферного слоя типа CF2) и минимальной деградацией электрофизических свойств 2DEG. Несмотря на небольшой коллапс тока, рассчитанный при $V_g=0$ В, максимальный ток в таких транзисторах ниже, чем в транзисторах без легированного углеродом буферного слоя. На рисунке 2.30 приведены импульсные ВАХ транзисторов с конструкциями буферных слоев CF2 и CF3. Ток верхних ветвей ВАХ зависит от последовательности измерений (из закрытого в открытое положение или обратно), что является признаком захвата электронов на связанные с углеродной примесью ловушки («kink» эффекта). Этот эффект сильнее проявляется в гетероструктуре InAlN/GaN (рисунок 2.30 а) и в структурах AlGaN/GaN с близко расположенным к каналу С-легированным слоем (рисунок 2.30 б).

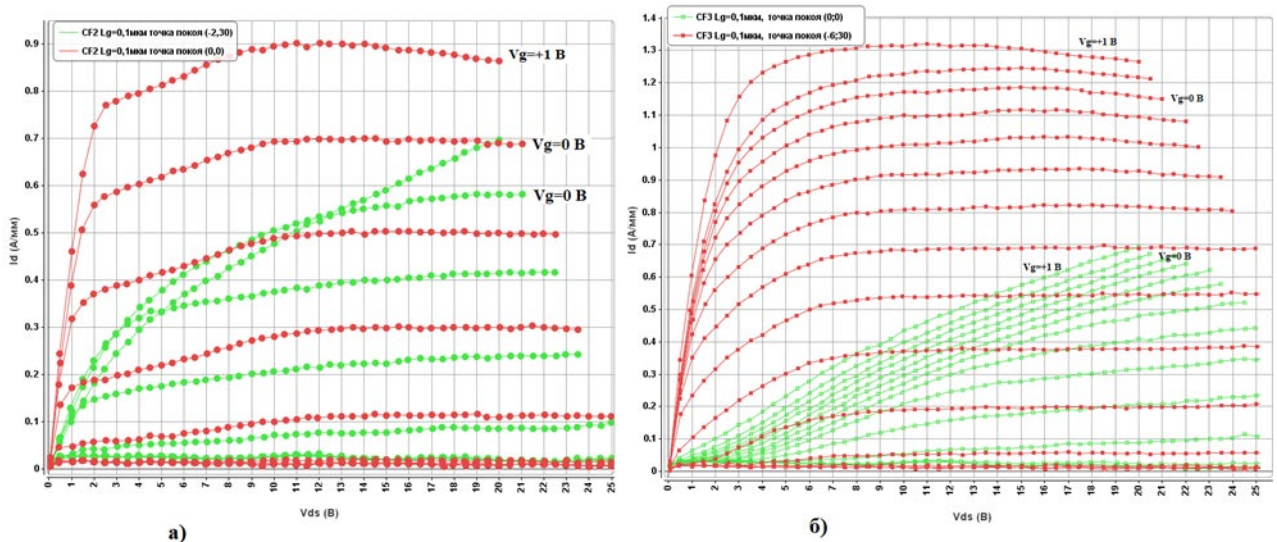


Рисунок 2.30 – Импульсные ВАХ InAlN/GaN (а) и AlGaN/GaN (б) НЕМТ с легированным железом и углеродом буферных слоев с конструкциями CF2 (а) и CF3 (б), измеренные для точек покоя ($V_g=0$, $V_{ds}=0$) (красные кривые) и ($V_g=-2$ В (а) и -6В (б), $V_{ds}=30$ В) (зеленые кривые)

На импульсных ВАХ транзисторов с легированными углеродом и железом буферными слоями короткоканальный эффект, вызванный растеканием тока в области сильных электрических полей между затвором и стоком, значительно уменьшается. Это происходит за счет формирования высокоомного легированного углеродом буферного слоя под каналом транзистора. Однако 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 резкому увеличению коллапса тока. Напряжение пробоя в транзисторах с удаленным от канала Fe-легированием ниже, чем в структурах с C-легированным буферным слоем, что показывает, что для конструкций с C- и Fe-легированием концентрация углерода должна быть выше, чем в случае чисто углеродного легирования.

2.2.6 Буферные слои на основе AlGaN и GaN

Модернизация конструкции буферных слоев GaN, легированных железом, возможна за счет вставки AlGaN слоя с переменным составом под каналом транзистора. Такая вставка создает дополнительный «обратный» барьер (англ. - back barrier) для проникновения электронов из канала в буферный слой. На рисунке 2.31 приведены исследованные конструкции буферных слоев образцов с барьерными слоями AlGaN под каналом. Конструкции отличаются толщиной канала, нелегированного барьерного слоя GaN под ним и наличием углеродного легирования в буферном слое GaN под каналом (образец VCF1). Конструкция барьерного слоя AlGaN выбиралась на основании электрофизического моделирования. Толщина барьерного слоя AlGaN в мощных транзисторах должна быть минимальной, поскольку AlGaN имеет значительно меньшую теплопроводность, что может привести к увеличению температуры в рабочей области транзистора и ускорению деградационных процессов в нем.

барьерные слои AlGaN	барьерные слои AlGaN	барьерные слои AlGaN	барьерные слои AlGaN	барьерные слои InAlGaN
2 DEG	2 DEG	2 DEG	2 DEG	2 DEG
барьерный слой (канал) GaN толщина 0,5 мкм	канал GaN толщина 50 нм	канал GaN толщина 100 нм	канал GaN толщина 50 нм	канал GaN толщина 50 нм
	барьерный слой AlGaN $X_{Al}=0...7\%$ толщина 150 нм	барьерный слой AlGaN $X_{Al}=0...7\%$ толщина 150 нм	барьерный слой AlGaN $X_{Al}=0...7\%$ толщина 150 нм	барьерный слой AlGaN $X_{Al}=0...7\%$ толщина 150 нм
	буферный слой GaN толщина 0,3 мкм	буферный слой GaN толщина 0,25 мкм	буферный слой GaN толщина 0,6 мкм	буферный слой GaN толщина 0,7 мкм легирован С
буферный слой GaN легирован Fe	буферный слой GaN легирован Fe	буферный слой GaN легирован Fe	буферный слой GaN легирован Fe	буферный слой GaN легирован Fe
подложка SiC или Al ₂ O ₃	подложка SiC или Al ₂ O ₃	подложка SiC или Al ₂ O ₃	подложка SiC или Al ₂ O ₃	подложка SiC или Al ₂ O ₃
образец F1	образец BF1	образец BF2	образец BF3	образец BCF1

Рисунок 2.31 – Конструкции буферных слоев образцов с барьерными слоями AlGaN под каналом. Образец F1 приведен для сравнения

Линейное нарастание мольной доли алюминия в составе барьерного слоя AlGaN должно предотвратить образование двумерного газа на границе буферного слоя GaN и барьерного слоя AlGaN. Условия роста и толщина GaN слоя, выращиваемого на AlGaN, а также состав AlGaN, выбирались с учетом необходимости избежать появления сильных упругих напряжений, приводящих к изгибу пластины и образованию трещин в GaN [187]. Al_{0,07}Ga_{0,93}N был выбран исходя из минимального напряжения и низкой концентрации прорастающих дислокаций.

Сравнение слоевого сопротивления двумерного газа в гетероструктурах AlGaN/GaN и некоторых образцах InAlN/GaN, приведенное в Таблице 2.7, показывает, что включение в конструкцию барьерного слоя, расположенного под каналом, приводит увеличению слоевого сопротивления гетероструктуры. Для сравнения приведены слоевые сопротивления, получаемые в образцах с легированным железом буферным слоем, с различным удалением от канала (обозначены в Таблице 2.7 как F1 и F2 соответственно). При приближении барьерного слоя к каналу транзистора происходит изменение формы квантовой ямы, энергия электронных уровней и максимальная концентрация в них уменьшаются, что приводит к увеличению слоевого сопротивления гетероструктур. Однако даже при толщине канала равной 50 нм использование двух буферных слоев – легированного железом на удалении от канала равном 0,85 мкм и легированного углеродом вблизи канала

под барьером позволяет получить минимальное (<10%) увеличение слоевого сопротивления канала. Это показывает, что увеличенное слоевое сопротивление в образцах BF1 и BF2 вызвано в первую очередь компенсацией электронной проводимости из-за проникновения железа из близко расположенного (0,45 мкм в BF1 и 0,4 мкм в BF2) легированного буферного слоя.

Таблица 2.7– 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)	Конструкция буферного слоя					
	BF1	BF2	BF3	BCF1	F1	F2
толщина нелегированного железом слоя, мкм	0,5	0,5	0,8	0,8	0,5	1,0
слоевое сопротивление AlGaIn/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	1,44
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	–

Все образцы с барьерными слоями имели высокие значения напряжения пробоя в буферных слоях (рисунок 2.32). Образец BCF1 имеет толщину нелегированного железом слоя 0,8 мкм и легированный углеродом слой между каналом и легированным железом буферным слоем. 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 напряже-

ние пробоя не уменьшается (в отличие от BF3, имеющего самые низкие напряжения пробоя среди данных образцов).

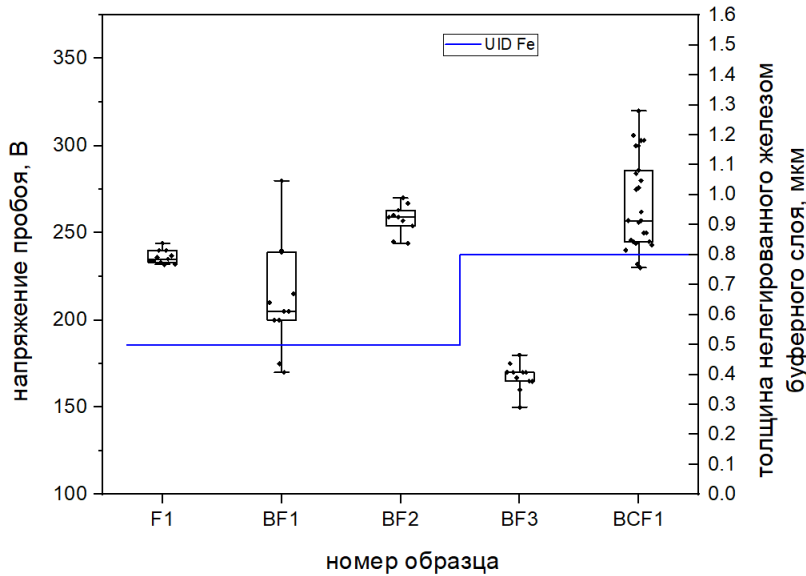
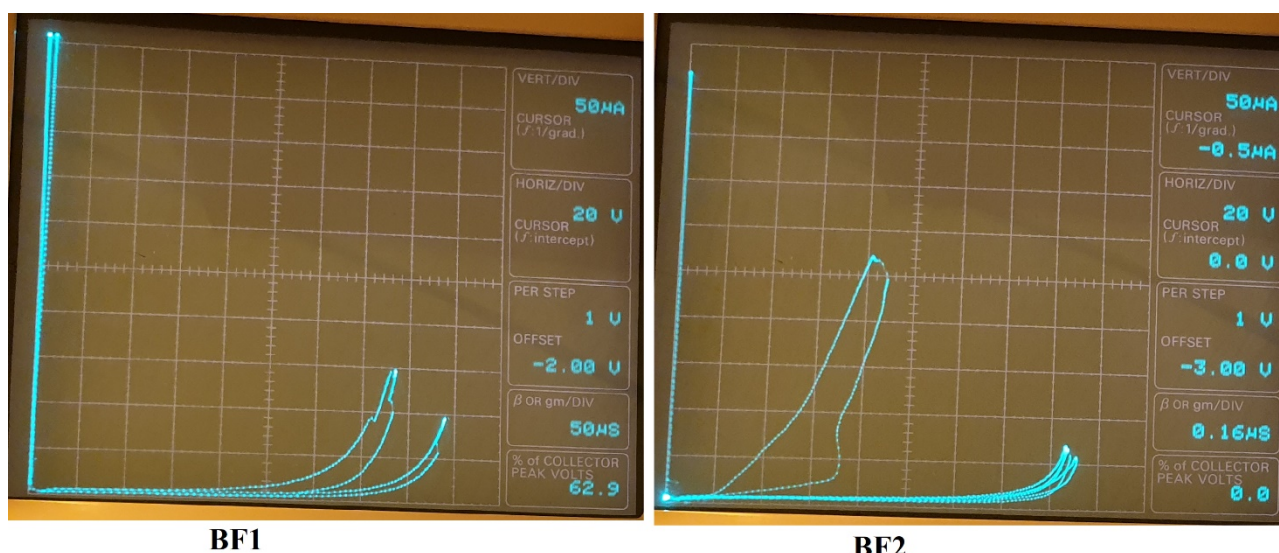


Рисунок 2.32 – Напряжение пробоя буферных слоев образцов, легированных железом содержащих AlGaN барьер под каналом. Толщины нелегированных железом областей буферного слоя обозначены «UID Fe»

ВАХ транзисторов, изготовленных на гетероструктурах, имеют высокие напряжения пробоя (>160 В), при этом транзисторы на образце BF3 демонстрируют высокие напряжения пробоя только при приложении дополнительных -10 В на затворе, что свидетельствует о наличии слабо управляемой проводимости в нелегированной части буферного слоя GaN, под нижним слоем AlGaN барьера. Для того чтобы проверить возможность подавления проводимости в этой области был изготовлен образец BCF1, в котором этот слой легирован углеродом на всей своей толщине вплоть до легированного железом буферного слоя. Полученные для этого образца напряжения пробоя сопоставимы с образцами BF1 и BF2. Увеличение толщины канала GaN с 50 до 100 нм не приводит к увеличению утечки и падению напряжения пробоя (рисунок 2.33), которые остаются высокими.



BF1 **BF2**
 Рисунок 2.33 – Напряжение пробоя в AlGaIn/GaN HEMT с конструкциями BF1 и BF2: с Fe-легированным буферным слоем, обратным AlGaIn барьером под каналом, толщиной канала 50 нм (BF1) и 100 нм (BF2)

Импульсные ВАХ AlGaIn/GaN HEMT с обратным барьером под каналом имеют типичный вид ВАХ, представленный на рисунке 2.34. Для напряжения 10 В коллапс тока составляет 27%. 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 С-легирования буферного слоя, конструкция BCF1 приводит к значительному увеличению коллапса тока. В отличие от HEMT с Fe-легированным буферным слоем, коллапс тока в InAlN/GaN HEMT с обратным барьером оказался выше, чем в AlGaIn/GaN HEMT, что может быть связано с вызванными изменениями в напряжениях в GaN слое, выращенном на AlGaIn и последующими изменениями в спектре ловушек в GaN канале и барьерном слое InAlN.

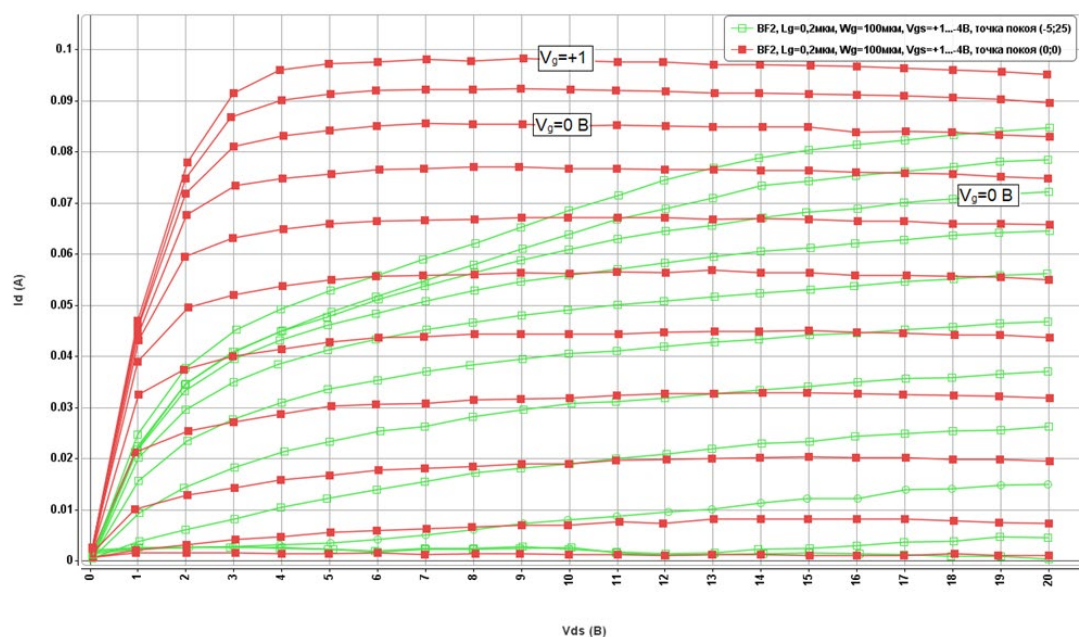


Рисунок 2.34 – Импульсные ВАХ AlGaIn/GaN транзисторов с конструкцией BF2 (Fe-легирование – на расстоянии 0,5 мкм от канала, обратный AlGaIn барьер, канал толщиной 100 нм), измеренные для точек покоя ($V_g=0$, $V_{ds}=0$) (красные кривые) и ($V_g=-5$ В, $V_{ds}=25$ В) (зеленые кривые)

В отличие от AlGaIn/GaN HEMT с Fe-легированным буферным слоем, с уменьшением длины затвора выходная проводимость в InAlIn/GaN HEMT транзисторах с обратным барьерным слоем не начинает возрастать, что показывает эффективность подавления короткоканального эффекта (Таблица 2.5, Таблица 2.8).

Таблица 2.8– Выходная проводимость ВАХ и напряжение пробоя InAlIn/GaN транзисторов обратным барьером с различными длинами затворов

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

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 AlGaIn.

2.3 Исследование пассивирующих покрытий

2.3.1 Выбор режимов осаждения и методика исследования

При выборе пассивирующих покрытий для СВЧ транзисторов нужно учитывать необходимость с помощью слоев пассивации решить задачи по устранению утечки по поверхности и ограничению перезарядки ловушек на поверхности полупроводника, обеспечению снижения электрического поля между электродами затвора и стока, обеспечению высокого напряжения пробоя в приборе и защите рабочей области прибора от разрушающего воздействия внешней среды, прежде всего от паров воды. Покрытий, позволяющих с равной эффективностью решить все эти задачи, в настоящее время нет, поэтому основным решением является использование многослойных пассиваций.

При выборе диэлектрического покрытия для каждого из слоев пассивации было проанализировано изменение химического состава диэлектрических покрытий в результате воздействия факторов температуры и влажности. Наиболее распространенным диэлектриком, используемым для пассивации СВЧ приборов, является нитрид кремния, поэтому для исследования были взяты образцы Si_3N_4 , осажденные различными методами, а также образцы SiO_2 и Al_2O_3 – материалов, которые также могут использоваться для пассивации.

Распределение химических элементов по глубине образцов было получено методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Исследуемые образцы выдерживали 200 часов в камере влажности при температуре 85°C и влажности 80%. Этот режим используется для ускоренных климатических испытаний полупроводниковых приборов. Для исследования были взяты образцы пленок SiO_2 , Si_3N_4 и Al_2O_3 , полученные методом химического осаждения из газовой

фазы (Chemical Vapour Deposition - CVD), методом плазмохимического осаждения (Plasma Enhanced Chemical Vapour deposition - PECVD), методом плазмохимического осаждения с источником индуктивно связанной плазмы (Inductively Coupled Plasma Enhanced Chemical Vapour deposition - ICPECVD) и методом атомно-слоевого осаждения (Atomic Layer Deposition - ALD). В качестве подложек были использованы GaAs, Si и Al₂O₃. Параметры экспериментальных образцов приведены в Таблица 2.9. Образцы пленки Si₃N₄, осажденные методом CVD были изготовлены *in situ* по окончании роста GaN в установке газовой эпитаксии (MOCVD).

Таблица 2.9 - Методы получения исследованных диэлектрических покрытий

Наименование образца	Тип диэлектрика	Метод и режим получения	Толщина диэлектрика, мкм	Подложка
HL-5	Si ₃ N ₄	PECVD	0,1	GaAs
HL-8	Si ₃ N ₄	PECVD	0,1	GaAs
S-10	Si ₃ N ₄	PECVD	0,1	GaAs
I-2	Si ₃ N ₄	ICPECVD	0,1	GaAs
011 FE	SiO ₂	CVD	0,5	GaAs
A9361	SiO ₂	PECVD	0,5	GaAs
ALD	Al ₂ O ₃	ALD	0,064	Si
CW236	Si ₃ N ₄	<i>in situ</i> CVD	0,2 мкм	AlGaN/GaN/Al ₂ O ₃

Все образцы Si₃N₄ были получены с использованием моносилана (SiH₄) в качестве источника кремния. В качестве источника азота для всех процессов, кроме ICPECVD, использовался аммиак (NH₃). В процессе ICPECVD для этой цели использовался азот. Соотношение потоков SiH₄:NH₃ в образцах, осажденных методом PECVD, было 1:1. Соотношение потоков SiH₄:N₂ в образце I-2, осажденном методом ICPECVD, было 37:33.

Все исследуемые образцы диэлектрических пленок были получены в типичных для соответствующих процессов температурных режимах. В частности, *in situ* Si₃N₄ осаждался при температуре около 1000°C, температуры в процессах

PECVD и ICPECVD были 200 и 300°C соответственно. Образцы HL-5 и HL-8 осаждены в режиме поочередной подачи ВЧ мощности от высокочастотного (HF) и низкочастотного (LF) генератора, при этом соотношение времени HF к LF больше в образце HL-5. Образец S-10 осаждался при подаче ВЧ мощности только от HF генератора. Для изучения распределения концентрации элементов по глубине образца необходимо проводилось ионное травление в потоке ионов аргона, чередовавшееся с РФЭС анализом поверхности.

2.3.2 Профиль элементов в диэлектрических пленках нитрида кремния

Типичный профиль элементов по глубине Si_3N_4 , полученного методами PECVD и ICPECVD до и после испытаний, показан на рисунках 2.35, 2.36. Профили элементов, полученные на образцах осажденного в плазменных установках нитрида кремния, имеют схожий вид. На всех образцах в пленке наблюдается избыток Si, а соотношение Si:N находится в диапазоне 50÷55%:40÷45%. Это может быть связано с особенностями роста в стимулированном плазмой процессе осаждения, для которых характерен недостаток атомов азота (особенно если для осаждения в качестве источника азота используется азот, а не аммиак), а также избыток кремния, в качестве источника которого используется легко разлагающийся при нагреве и в плазме моносилан. Ошибка в соотношении мышьяка и галлия ($\text{Ga:As} \approx 65\%:35\%$), наблюдаемая в профилях на всех образцах с GaAs в качестве подложки, объясняется обеднением поверхности арсенида галлия мышьяком при аргонной бомбардировке. Все образцы осажденного в плазме нитрида кремния имеют высокое содержание атомов кислорода на поверхности ($\approx 35\%$), что может говорить о большом количестве адсорбированных молекул H_2O , CO_2 и O_2 на поверхности или о значительном количестве окисленных атомов кремния.

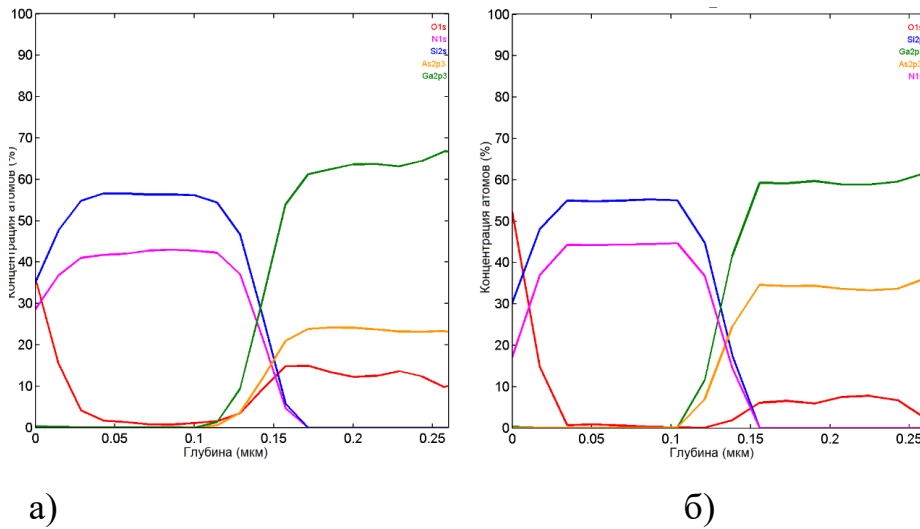


Рисунок 2.35 – РФЭС профиль образца HL-5 с PECVD Si_3N_4 до (а) и после (б) выдержки в климатической камере

Несмотря на отличия в методах осаждения, профиль элементов на рисунках 2.35, 2.36 имеет лишь незначительные отличия. Значительное увеличение атомов кислорода после выдержки в климатической камере во всех осажденных плазменными методами образцах нитрида кремния свидетельствует об адсорбции воды и, возможно, об окислении атомов кремния.

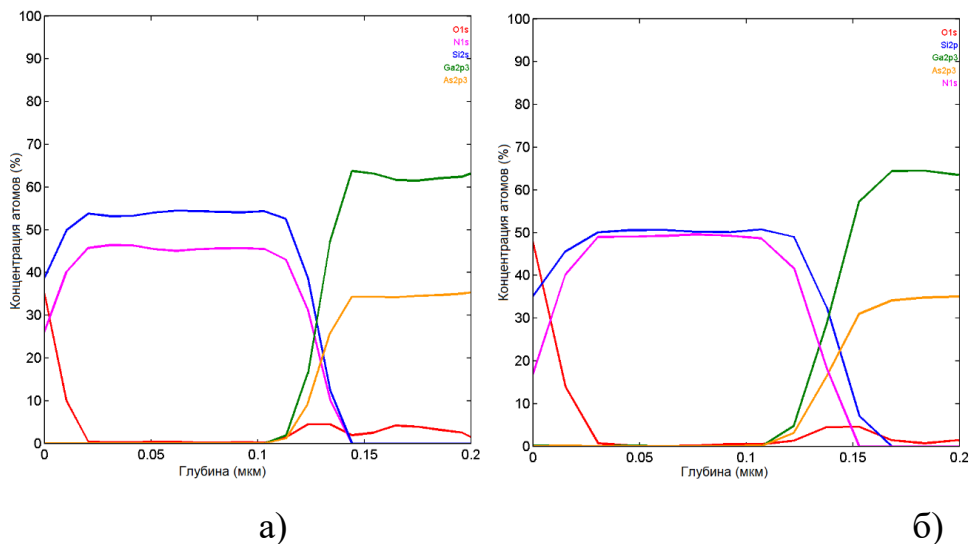


Рисунок 2.36 – РФЭС профиль образца I-2, (Si_3N_4 , ICPECVD) до (а) и после (б) выдержки в климатической камере

По сравнению образцами нитрида кремния, осажденными в плазменных установках, *in situ* Si_3N_4 , осажденный в эпитаксиальной камере при высокой температуре (около 800°C) методом CVD, имеет соотношение азота к кремнию, близкое к 1:1 (рисунок 2.37).

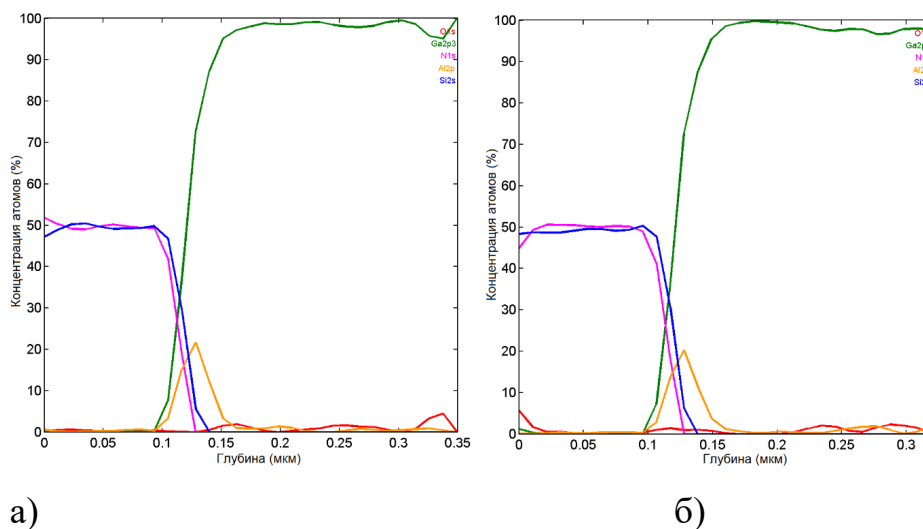


Рисунок 2.37 – РФЭС профиль образца CW336, с *in situ* CVD Si_3N_4 до (а) и после (б) выдержки в климатической камере

Из РФЭС профиля видно, что на поверхности образца кислород отсутствует. После выдержке в климатической камере на поверхности наблюдается не более 5% кислорода, при этом внутри пленки нитрида кремния кислород отсутствует. В GaN, расположенном под пленкой *in situ* Si_3N_4 на образце CW336, спектр азота наслаивается на спектр галлия, поэтому на графике он не показан. Отсутствие кислорода на поверхности до выдержки в климатической камере в сочетании минимальной концентрации кислорода на поверхности после выдержки в климатической камере позволяет сделать вывод о хороших защитных свойствах осажденного методом *in situ* CVD нитрида кремния от воздействия влажности. Значительное отличие свойств осажденного методом CVD нитрида кремния от пленок, осажденных плазменными методами, объясняется высокой температурой осаждения, дающей возможность для медленного роста пленки при хороших условиях для десорбции продуктов реакции, а также более высокой чистотой дан-

ного процесса, как в части используемых материалов, так и в отношении загрязнений в камере роста.

Полученные результаты показывают, что для исследованных методов и режимов осаждения полученный методом CVD in situ Si_3N_4 является лучшим защитным покрытием от воздействия влажности, обладающим хорошей устойчивостью к нагреву во влажной среде.

2.3.3 Анализ химических связей в нитриде кремния

Для уточнения характера изменений химических связей в результате выдержки в климатической камере были проанализированы фотоэлектронные спектры линий кремния для поверхности, середины пленки Si_3N_4 и границы раздела с подложкой. Результаты для образцов осажденных методами PECVD, ICPECVD и CVD приведены на 2.38, 2.39 и 2.40 соответственно. Соотношение связей Si-Si, Si-O и Si-N подбиралось коэффициентами таким образом, чтобы результирующий спектр совпал с полученным экспериментально. Несмотря на невысокую точность определения соотношений в связях элементов при таком подходе, для значительных (>5%) изменений в химических связях кремния изменения в результирующем спектре достаточно заметны, что дает возможность оценить их химическую природу. По сравнению со спектром от связи Si-N, при образовании связи Si-Si энергия фотоэлектронов уменьшается, а при образовании связи Si-O возрастает, что вызывает расширение или сдвиг спектра в ту или иную сторону и также достаточно хорошо заметны.

Спектры для образцов Si_3N_4 , осажденных методом PECVD в разных режимах, имеют лишь количественные отличия, поэтому на рисунок 2.38 приведен спектр только для одного образца (HL-8). Все спектры имеют значительное (7-17%) количество связей Si-O (рисунок 2.38). При этом содержание кислорода на поверхности в них также значительно (>30%). Можно предположить, что большая часть атомов кислорода на поверхности принадлежит молекулам воды, которые

постепенно вступают в реакцию, окисляя кремний в перенасыщенной кремнием пленке S_3N_4 . Заметное уменьшение концентрации атомов кремния со связями Si-Si на поверхности по сравнению с объемом пленки S_3N_4 позволяет предполагать, что окислению подвергаются прежде всего атомы кремния, имеющие связи Si-Si. Отсутствие окислов в глубине пленок говорит о том, что при комнатной температуре пленки не пропускают внутрь достаточное для окисления кремния количество водяных паров. Сопоставление профиля элементов и спектра кремния для пленки S_3N_4 , осажденной методом ICPECVD (рисунок 2.39), показывает, что, несмотря на вероятную гидрофильность поверхности (около 35% кислорода), окисления кремния на поверхности практически не происходит. Невысокая доля связей Si-Si в глубине пленки, вероятно, является одной из основных причин этого. Как и в S_3N_4 , осажденных методом PECVD, наблюдается отсутствие окислов в глубине пленки, что свидетельствует о достаточно хороших защитных свойствах пленки для данных условий (комнатная температура, небольшое время выдержки при ней).

Наилучшей чистотой состава отличается образец с S_3N_4 , осажденный *in situ* методом CVD (рисунок 2.40). В нем поверхность, граница раздела с полупроводником и состав внутри пленки отличаются высокой чистотой и отсутствием значительного количества загрязнений.

Результаты, полученные после воздействия температуры и влажности, указывают на то, что основным источником появления связей Si-O является влага из окружающей среды. На всех образцах с S_3N_4 , осажденным плазменными методами, наблюдается уменьшение поверхностной концентрации атомов кремния, имеющих связи с азотом (на 15÷50%), и одновременное увеличение концентрации связей Si-O на поверхности (на 22÷40%). Можно предположить, что избыток влаги на поверхности образцов с S_3N_4 , приводит к значительному окислению атомов кремния, связанных с атомами азота.

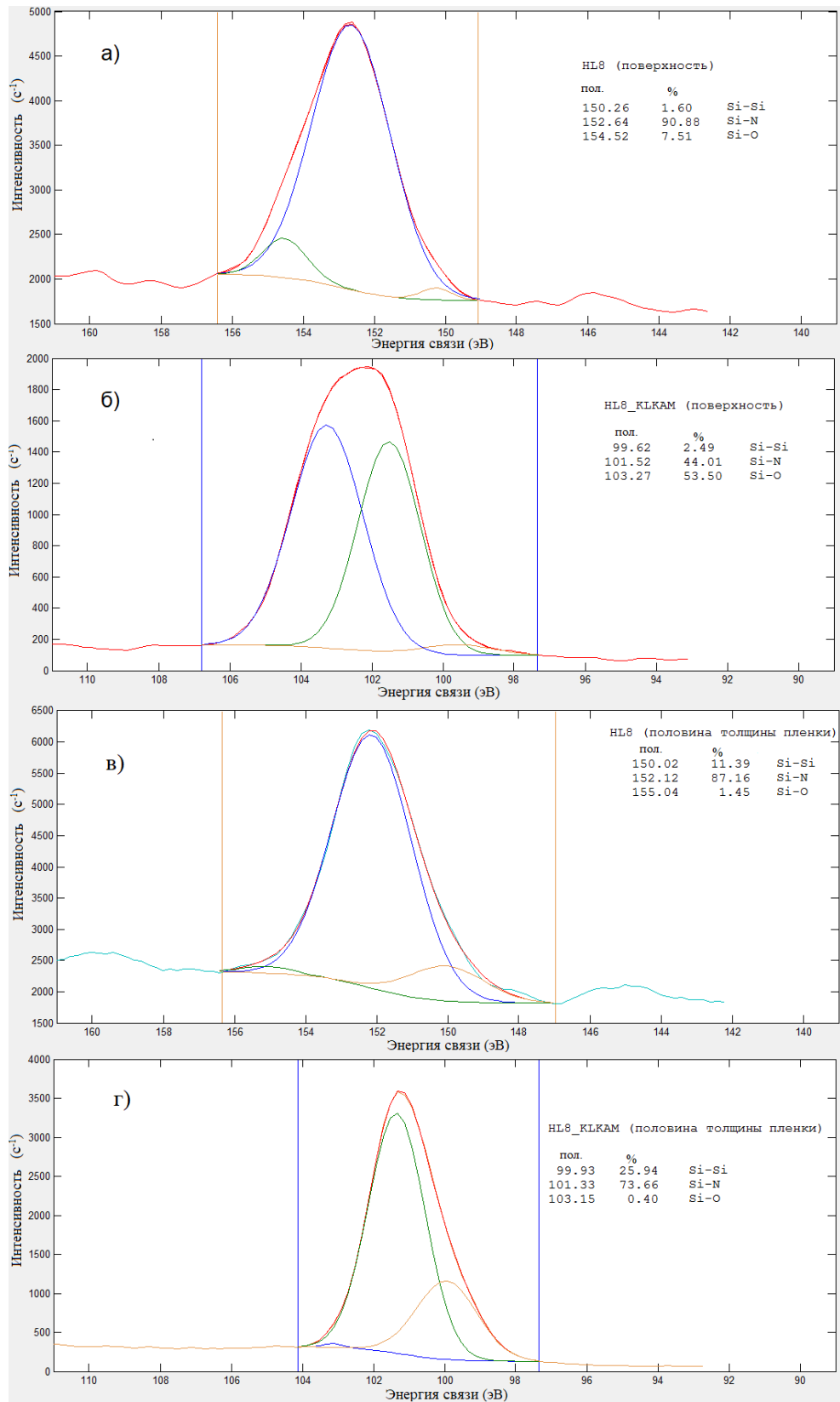


Рисунок 2.38 – Спектр кремния на поверхности до (а) и после (б) выдержки в климатической камере, на половине толщины Si_3N_4 до (в) и после (г) выдержки в климатической камере для образца HL-8

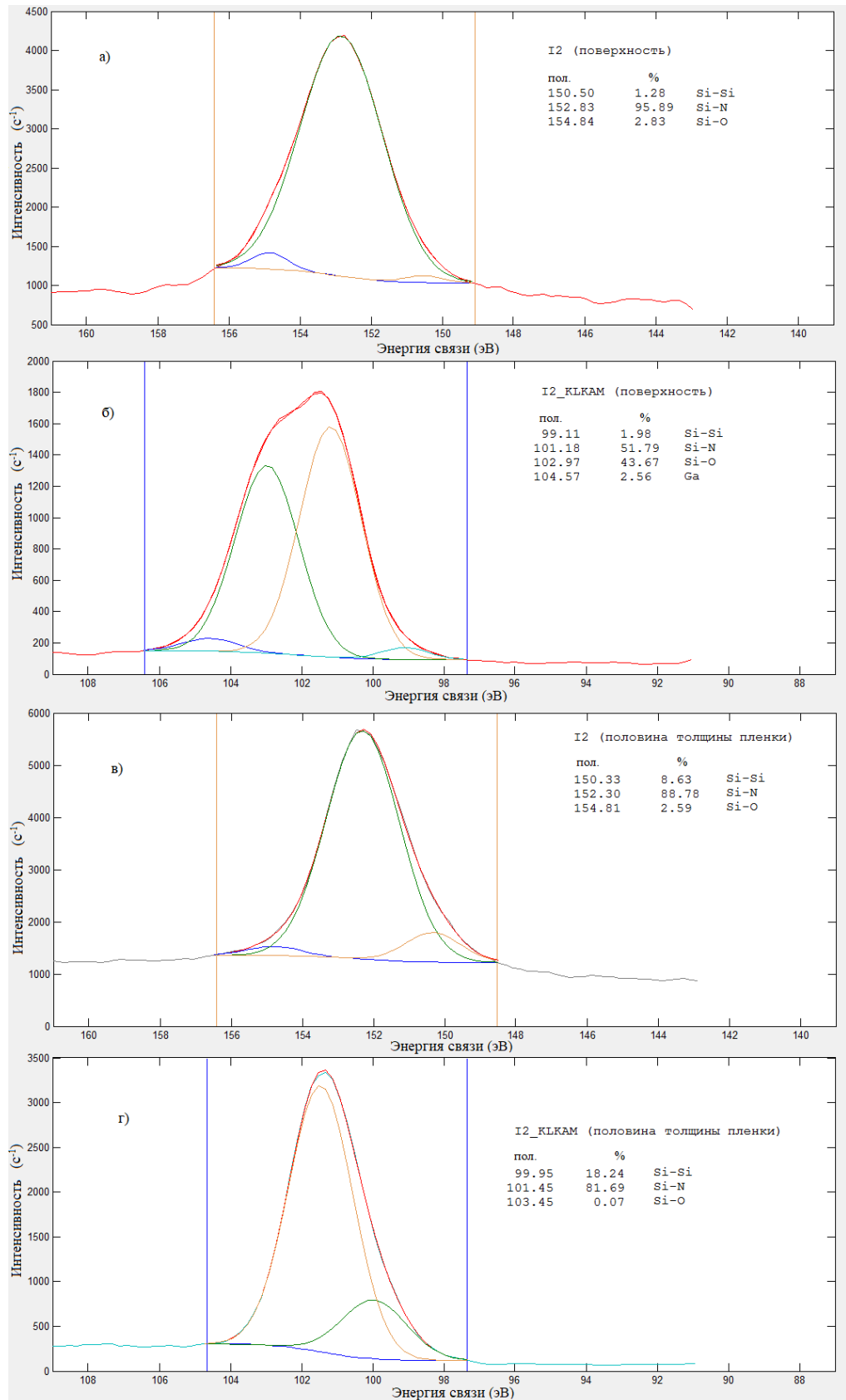


Рисунок 2.39 – Спектр кремния на поверхности до (а) и после (б) выдержки в климатической камере, на половине толщины Si_3N_4 до (в) и после (г) выдержки в климатической камере для образца I-2

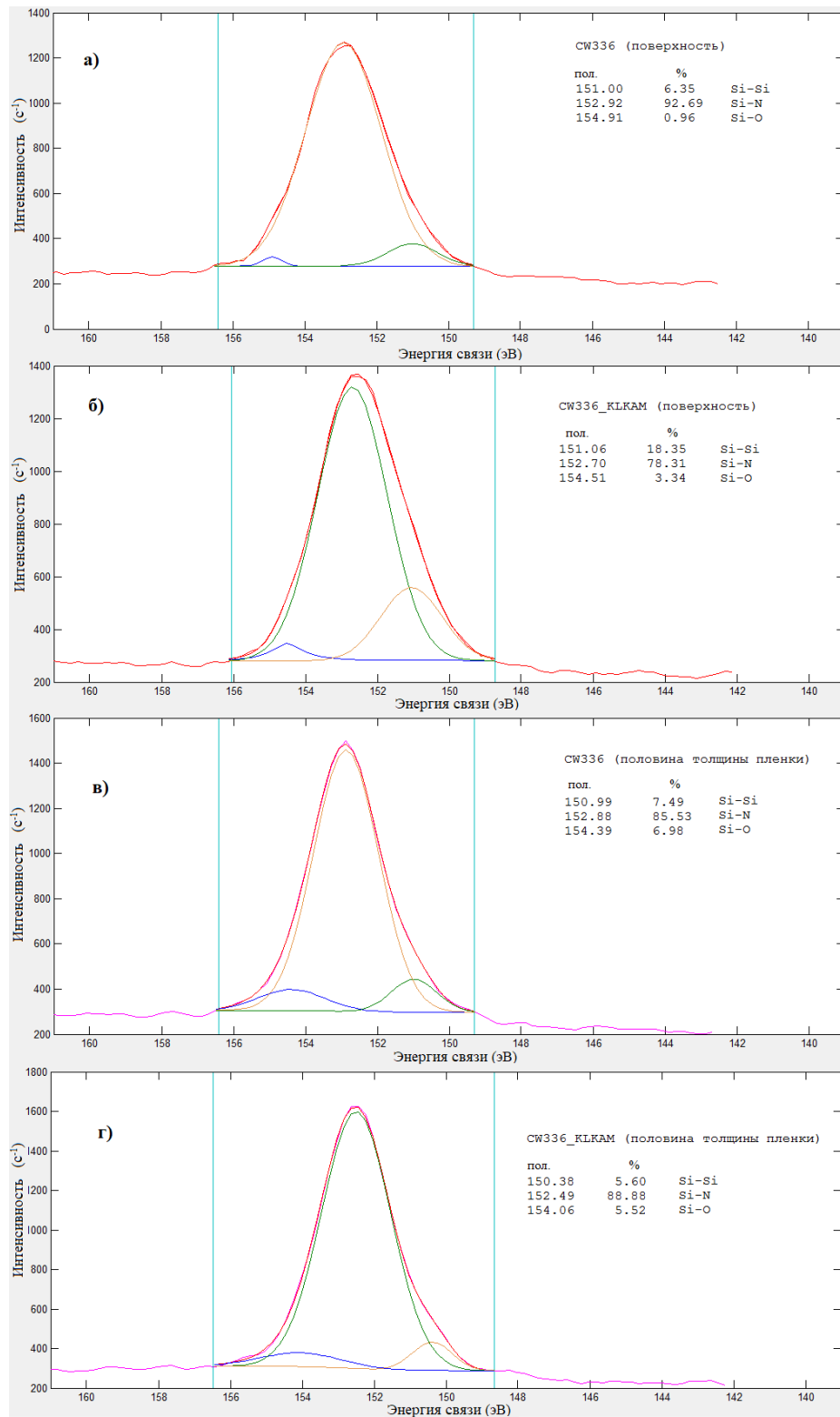


Рисунок 2.40 –Спектр кремния на поверхности до (а) и после (б) выдержки в климатической камере, на половине толщины Si_3N_4 до (в) и после (г) выдержки в климатической камере для образца CW336

Наименее подверженной окислению также является пленка S_3N_4 , полученная *in situ* CVD, в то время как на образцах с полученным плазменными методами S_3N_4 концентрация атомов кислорода на поверхности увеличивается до 50%, и доля связей Si-O на поверхности также достигает 50%. Такая высокая концентрация Si-O говорит о низкой чистоте полученных плазменными методами пленок, в которых значительная часть атомов кремния не соединена с азотом. Значительные изменения происходят и внутри пленок S_3N_4 , осажденных методами PECVD и ICPECVD: там образуется до 30% связей Si-Si. Такое изменение химических соединений в диэлектрической пленке может привести к снижению напряжения пробоя транзистора и росту токов утечки в МДМ конденсаторах, изготовленных на таких диэлектрических пленках. Внутри пленок увеличение концентрации кислорода не наблюдается, что может свидетельствовать о сохранении защитных свойств данных покрытий. Профилирование показало увеличение содержания кислорода в глубине образцов после выдержки в климатической камере, что может свидетельствовать о диффузии кислорода с поверхности через диэлектрик в полупроводник.

Параметры процессов осаждения влияют на состав и химические связи в плазменных процессах осаждения S_3N_4 . Сравнивая результаты анализа образцов (HL-5, HL-8, S-10, I-2) и параметров процессов осаждения S_3N_4 на них можно заметить, что уменьшение ВЧ мощности плазмы приводит к сдвигу соотношения Si:N в образцах в сторону увеличения содержания кремния (образец S-10 по сравнению с HL-5 и HL-8). Это относится также к соотношению времени включения высокочастотного и низкочастотного (LF и HF) генераторов в процессе плазменного осаждения в реакторе PECVD (образец HL-8 по сравнению с образцом HL-5). Более низкочастотный генератор обеспечивает большее время ускорения частиц в плазме, за счет чего, вероятно, увеличивается концентрация ионов азота в плазме и в осаждаемой пленке. При этом сам процесс осаждения с использованием чередования подачи ВЧ мощности от двух генераторов с разной частотой не

приводит к заметному уменьшению образования связей Si-Si в пленке, как без нагрева в климатической камере, так и после нагрева.

2.3.4 Профиль элементов в диэлектрических пленках диоксида кремния и оксида алюминия

Профили элементов, полученные на образцах пленок SiO₂ (рисунок 2.41) и Al₂O₃ (рисунок 2.42), как до, так и после испытаний, показывают близкий к стехиометрическому состав. В отличие от плазменных процессов осаждения S₃N₄, плазменные и химические процессы осаждения Al₂O₃ и SiO₂ показали высокую устойчивость к внешним воздействиям.

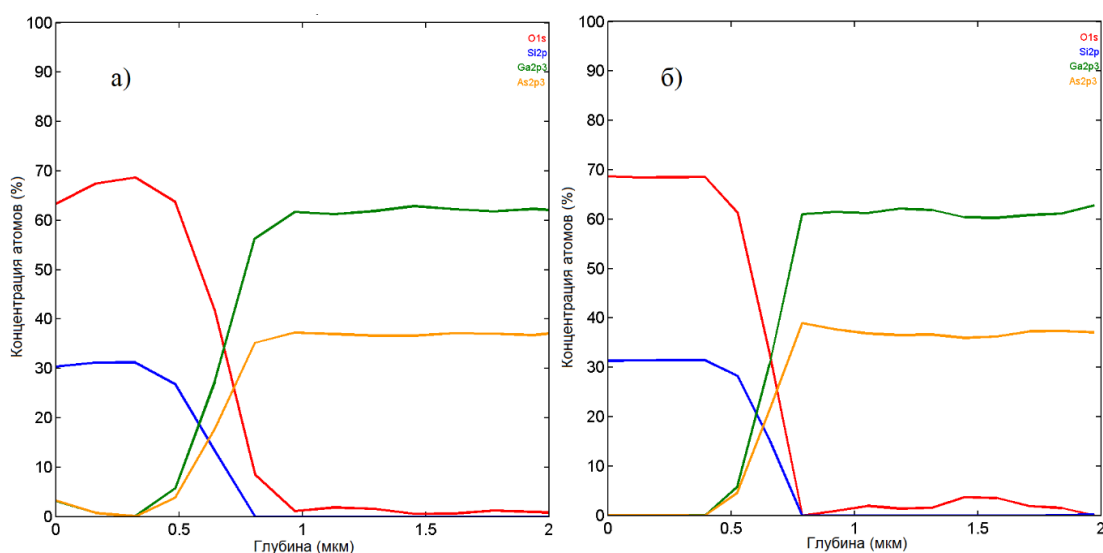


Рисунок 2.41 – РФЭС профиль образца A9361, SiO₂ (PECVD) до (а) и после (б) выдержки в климатической камере

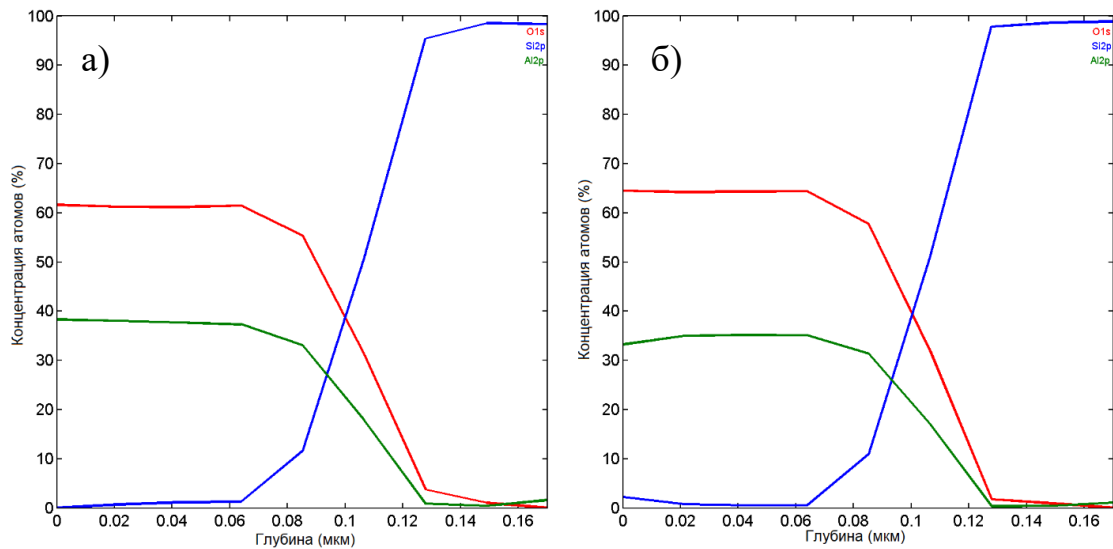


Рисунок 2.42 – РФЭС профиль образца Al₂O₃ (ALD) до (а) и после (б) испытаний

Обе пленки обладают достаточно гидрофобной поверхностью, а Al₂O₃, полученный методом ALD, сохраняет такие свойства даже при малой толщине (64 нм).

2.3.5 Влияние *in situ* пассивации на напряжение пробоя и токи утечки затвора в InAlN/AlN/GaN HEMT

Увеличение тока утечки барьера Шоттки в короткоканальных транзисторах с тонким барьерным слоем происходит из-за роста электрического поля в барьерном слое транзистора при уменьшении его толщины, что приводит к увеличению компоненты тока утечки, связанной с туннелированием – автоэлектронной эмиссии (эмиссии Фаулера-Нордгейма) [188,189]. Поскольку толщина барьерного слоя в InAlN/AlN/GaN HEMT меньше по сравнению с AlGaN/AlN/GaN HEMT, InAlN/AlN/GaN HEMT также имеют более высокую плотность тока через барьер, которая снижается по мере увеличения толщины барьерного слоя. Однако в барьерном слое InAlN, не покрытом пассивирующим диэлектрическим слоем, утечка может происходить по поверхности гетероструктуры, значительно увеличивая суммарный ток утечки. Проведенное сравнение токов затвор-сток при обратном

смещении барьера Шоттки в транзисторах, сформированных на $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ гетероструктурах с пассивацией *in situ* SiN с толщиной 3, 5 нм и без пассивации, а также на $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ транзисторах с пассивацией *in situ* SiN толщиной 5 нм, показало, что использование пассивации толщиной 5 нм снижает ток утечки в транзисторах по сравнению аналогичными приборами с пассивацией толщиной 3 нм примерно на порядок (рисунок 2.43). Толщина слоев $\text{In}_{0,12}\text{Al}_{0,88}\text{N}$ в гетероструктурах, использованных при сравнении, составляла 5 нм. Использованные при сравнении токи в $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ с барьерными слоями $\text{In}_{0,14\div 0,18}\text{AlN}$ толщиной более 15 нм без *in situ* пассивации оказались выше либо близкими по величине токам в транзисторах с пассивацией толщиной 3 нм.

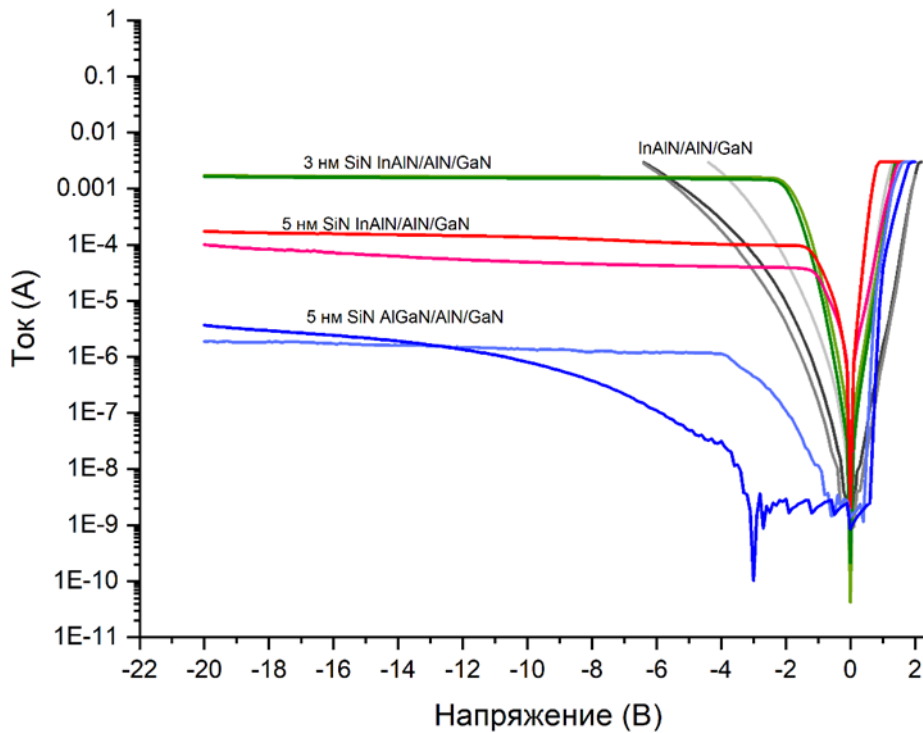


Рисунок 2.43 – ВАХ затвор-сток в $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ транзисторах с пассивацией *in situ* SiN толщиной 3 нм (зеленые кривые), 5 нм (красные кривые), а также без пассивации (серые кривые) и в $\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ транзисторах с пассивацией *in situ* SiN толщиной 5 нм (синие кривые)

Сравнение токов утечки между затвором и стоком в InAlN/AlN/GaN транзисторах с пассивацией *in situ* SiN толщиной 3 нм и отличающейся в 2 раза толщиной барьерного InAlN слоя, показало, что с ростом толщины InAlN ток утечки уменьшается примерно в 2 раза, что значительно меньше, чем при увеличении в толщину *in situ* SiN пассивации с 3 нм до 5 нм. Ток утечки барьера Шоттки в InAlN/AlN/GaN может значительно отличаться в разных областях пластины, а также между пластинами, однако характер зависимостей от этого не меняется.

Сравнение токов утечки в диодах с барьером Шоттки различного диаметра также показывает, что в $Al_{0,24}Ga_{0,76}N/AlN/GaN$ и $In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN$ гетероструктурах с пассивацией *in situ* SiN с толщиной 5 нм токи утечки также отличаются более чем на порядок по величине. По величине ток в диодах и транзисторах при большом обратном смещении напряжений пропорционален, соответственно, периметру диода и ширине затвора транзистора. Несмотря на более чем на порядок больший ток при обратном смещении барьера Шоттки, напряжение пробоя диода Шоттки в InAlN/AlN/GaN составляет больше 300 В (рисунок 3.1,б).

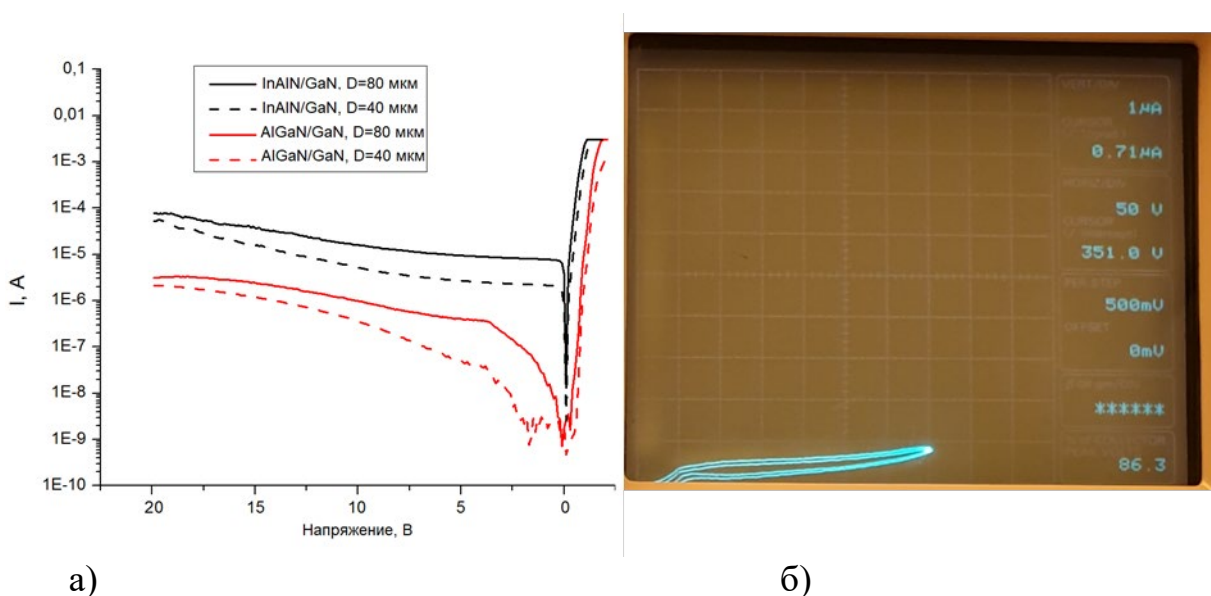


Рисунок 2.44 – ВАХ барьеров Шоттки диаметром 40 и 80 мкм в гетероструктурах InAlN/AlN/GaN и AlGaIn/AlN/GaN (а) и вблизи напряжения пробоя в InAlN/AlN/GaN.

Таким образом, пассивация $\text{In}_{0,14}\text{AlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ *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 и получить высокое напряжение пробоя в барьере Шоттки. Принимая во внимание полученные при измерениях импульсных ВАХ транзисторов значения коллапса тока при выборе точки покоя, соответствующей измерению «gate lag», т.е. при напряжении на затворе, большем напряжения отсечки и нулевом напряжении на стоке, можно сделать вывод что *in situ* пассивация не только снижает утечку затвора, но и ограничивает коллапс тока, вызванный поверхностными ловушками.

2.3.6 Выводы

Многослойная пассивация СВЧ транзисторов позволяет обеспечить наилучшее сочетание свойств пассивирующих покрытий. 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 $(\text{InAlGa})\text{N}/\text{GaN}$ НЕМТ. Пассивация $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ *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, подавить эффект «gate lag» и получить высокое напряжение пробоя в барьере Шоттки. В $\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ транзисторах *in situ* SiN толщиной 5 нм также позволяет подавить эффект «gate lag» и получить низкие токи утечки затвора.

Среди исследованных пассивирующих покрытий Al_2O_3 и 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. Без улучшения качества полученных плазменными методами пленок S_3N_4 невозможно использование их в качестве надежных пассивирующих покрытий в СВЧ приборах и в МДМ конденсаторах. При соотношении $\text{Si}:\text{N}$ в

пленках осажденного в плазменных установках нитрида кремния близком к стехиометрическому можно ожидать уменьшение количества связей Si-Si и окисления поверхности под воздействием паров воды. Для этого можно как уменьшать соотношение моносилана к аммиаку, так и увеличивать ВЧ мощность (в PECVD процессе) и ICP мощность (в ICPPECVD процессе).

2.4 Основные результаты и выводы главы 2

1. Применение легирования буферного слоя железом позволяет получить лучший баланс зависящих от конструкции буферного слоя параметров транзистора: полностью устранить утечки в буферном слое (при условии толщины нелегированной части канала 0,5 мкм), ограничить величину коллапса в InAlN/GaN НЕМТ 22% и AlGaN/GaN НЕМТ 30%, поднять напряжение пробоя исток-сток в транзисторах с $L_g=0,25$ мкм до более чем 200 В в InAlN/GaN НЕМТ и более чем 150 В в AlGaN/GaN НЕМТ, ограничить рост выходной проводимости в транзисторах с $L_g \geq 0,15$ мкм.

2. Конструкция буферного слоя, включающая легированный железом слой 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 AlGaN/AlN/GaN гетероструктур с затвором длиной менее 0,15 мкм;

3. Применение легирования буферного слоя углеродом приводит к увеличению коллапса тока в AlGaN/GaN НЕМТ. При приближении легированного углеродом слоя к двумерному электронному газу на расстояние 0,2 и менее микрон коллапса тока увеличивается вне зависимости от толщины легированного слоя и наличия под каналом барьерного слоя AlGaN. В зависимости от толщины нелегированной области, максимум падения тока доходит до 45÷70%. Отдаление легированного углеродом слоя от канала приводит к снижению напряжения пробоя и росту тока утечки через буферный слой.

4. 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;

5. Использование пассивации на основе слоев Al_2O_3 или SiO_2 позволяет сформировать устойчивое к температурному нагреву и воздействию влаги пассивирующее покрытие.

6. Осажденные методами стимулированного плазмой химического вакуумного осаждения из газовой фазы образцы нитрида кремния имели соотношение $\text{Si}:\text{N}$ близкое к 5:4 и высокое ($\approx 35\%$) содержание атомов кислорода на поверхности, которое увеличивалось до $\approx 50\%$ 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 $40\div 50\%$, а в глубине пленки до $18\div 25\%$ 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.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

3.1 Технология изготовления транзисторов

Последовательность технологических операций, использовавшаяся для изготовления СВЧ транзисторов на (InAlGa)N/GaN гетероструктурах, обусловлена доступным при проведении работы оборудованием и в целом соответствует последовательности, используемой другими разработчиками и производителями СВЧ МИС, в частности компанией «III-V lab» [190].

В ходе экспериментов был обоснован 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 [191,192].

Последовательность операций изготовления СВЧ транзисторов на (InAlGa)N/GaN гетероструктурах была следующей:

- 1) Формирование меток совмещения для проекционной и электронно-лучевой литографии
- 2) Формирование межприборной изоляции имплантацией
- 3) Формирование сплавных омических контактов
- 4) Формирование 1-й пассивации SiN
- 5) Формирование ножки затвора электронно-лучевой литографией и плазменным травлением
- 6) Формирование шляпы затвора
- 7) Формирование слоя металлизации

- 8) Формирование 2-й пассивации
- 9) Формирование металлизации мостов
- 10) Формирование 3-й пассивации
- 11) Шлифовка и полировка
- 12) Формирование сквозных отверстий и металлизации обратной стороны пластины

Особенностями (InAlGa)N/GaN технологии СВЧ транзисторов для миллиметрового частотного диапазона является использование технологических приемов, позволяющих уменьшить расстояние исток-сток, а также изготовление ножки затвора транзистора с помощью электронно-лучевой литографии в качестве основного инструмента создания элементов топологии с критическими размерами не более 0,15 мкм.

3.2 Исследование импульсных и СВЧ характеристик транзисторов

3.2.1 Параметры гетероструктуры InAlN/AlN/GaN и их влияние на СВЧ характеристики

Исследование влияние толщины и состава барьерного слоя на статические и малосигнальные СВЧ параметры показало, что увеличение толщины слоя $\text{In}_{0,12}\text{Al}_{0,88}\text{N}$ в InAlN/AlN/GaN НЕМТ в с 5 до 13 нм приводит к снижению f_{max} и практически не меняет f_t транзистора (рисунок 3.1). Максимальный ток при этом возрастает на 0,35 А/мм. При этом от содержания индия в диапазоне 12÷18% f_{max} практически не зависит, в то время как внешняя крутизна g_m транзистора снижается. Изготовленные транзисторы имели длину затвора 0,5 мкм, ширину 200 мкм и расстояние исток-сток 4 мкм.

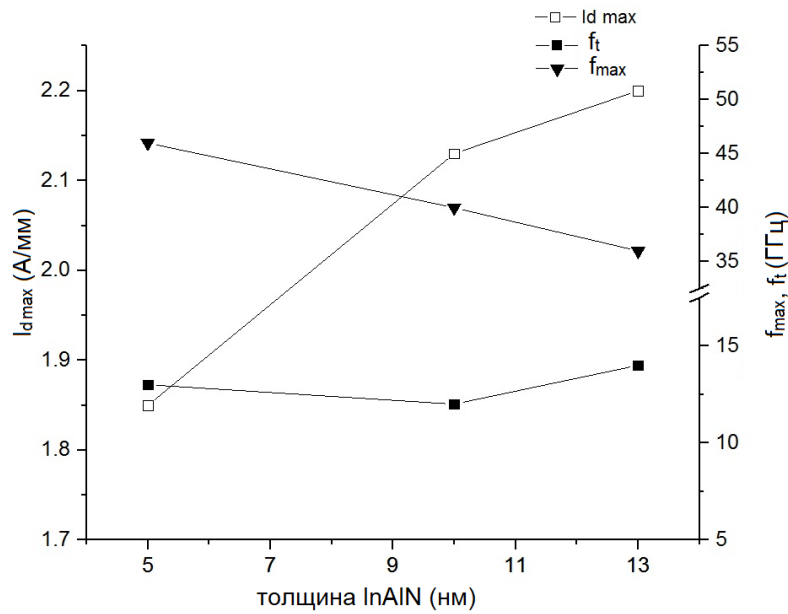


Рисунок 3.1 – Зависимость максимального тока $I_{d \max}$, граничных частот усиления по мощности f_{\max} и по току f_t от толщины InAlN в InAlN/GaN HEMT с длиной затвора 0,5 мкм

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 [193,194].

3.2.2 Сравнение импульсных ВАХ транзисторов

На основании проведенных экспериментов для затворов длиной 0,1 и 0,15 мкм были выбраны оптимизированные конструкции буферных слоев и конструкции гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaIn/AlN/GaN. Для транзисторов с затворами длиной 0,1 мкм она включала нелегированный канал GaN толщиной 0,05 мкм, расположенный под каналом обратный барьерный слой $Al_{0...0,07}GaN$ переменного состава толщиной 0,15 мкм и расположенный на расстоянии 0,5 мкм от гетероперехода AlN/GaN легированный железом буферный слой. Для транзисторов с затворами длиной 0,15 мкм конструкция буферного слоя включала нелегированный канал GaN толщиной 0,5 мкм и расположенный под каналом легиро-

ванный железом буферный слой. Конструкции гетероструктур включали $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}$ (5нм)/AlN (1нм)/GaN и $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}$ (22нм)/AlN (1нм)/GaN.

На рисунке 3.2 приведены ВАХ и передаточные характеристики транзисторов с $L_g=0,15$ мкм и неоптимизированной (С-легирование) и оптимизированной конструкцией буферного слоя (с Fe-легированием) с подавленными короткоканальными эффектами на ВАХ. Толщина *in situ* SiN составляла 5 нм для обеих конструкций, эпитаксиальные структуры были выращенный методом MOCVD на 4H SiC подложке. Снижение максимального тока в результате применения легирования буферного слоя $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ составило около 16%. Для данного типа транзисторов с характерно увеличение коллапса тока при уменьшении длины затвора (с $5\div 22\%$ до $30\div 40\%$ при изменении L_g с 0,25 до 0,15 мкм). В то же время «kink» эффект на ВАХ транзистора с оптимизированным буферным слоем снижен примерно в 2 раза, что дополнительно подтверждает связь данного эффекта с появляющимися при легировании углеродом буферного слое ловушками.

ВАХ $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}$ (22нм)/AlN (1нм)/GaN НЕМТ с $L_g=0,15$ мкм с оптимизированным и неоптимизированным буферным слоем отличаются похожим образом. На рисунке 3.3 приведены импульсные ВАХ для двух точек покоя (0,0) и (-4,30) и передаточные характеристики $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}$ (22нм)/AlN (1нм)/GaN НЕМТ с оптимизированным буферным слоем. На ВАХ отсутствует «kink» эффект, а коллапс тока составляет 19%.

Полученные результаты показывают, что для транзисторов с $L_g=0,15$ мкм для подавления короткоканального эффекта на ВАХ достаточно включения в конструкцию легированного железом буферного слоя. Для AlGaN/AlN/GaN НЕМТ с $L_g=0,15$ мкм были получены значения $I_{d\max}\approx 1,0$ А/мм, $V_t\approx 3,8$ В, $g_m\approx 290$ мСм/мм, в то время как для InAlN/AlN/GaN НЕМТ $I_{d\max}\approx 1,6$ А/мм, $V_t\approx 2,4$ В, $g_m\approx 520$ мСм/мм.

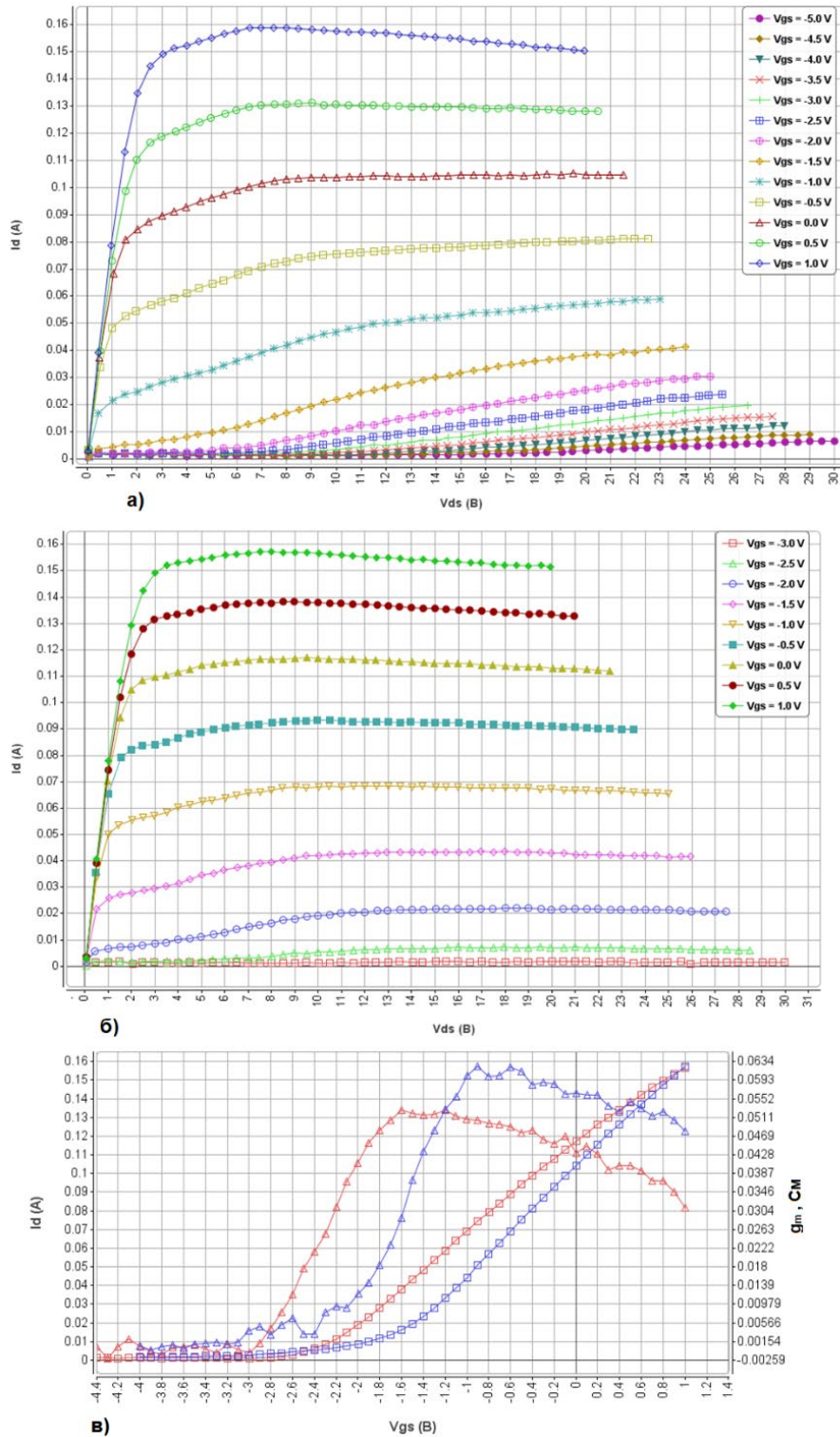


Рисунок 3.2 – Импульсные ВАХ $\text{In}_{0.14}\text{Al}_{0.86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ с $L_g=0,15$ мкм, $W_g=100$ мкм с неоптимизированной (а) и оптимизированной (б) конструкцией буферного слоя и их передаточных характеристики (в) с неоптимизированной (синие кривые) и оптимизированной (красные кривые) конструкцией

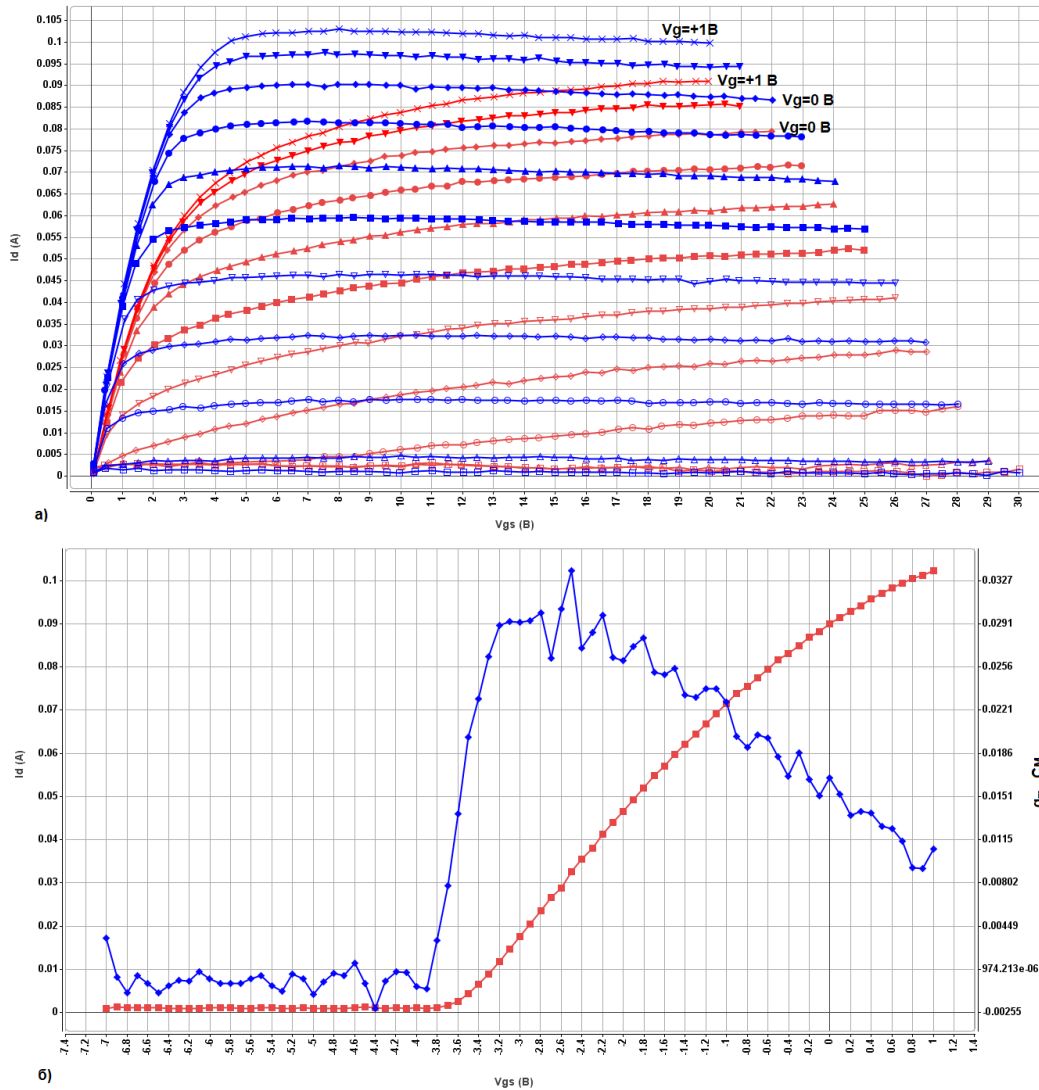
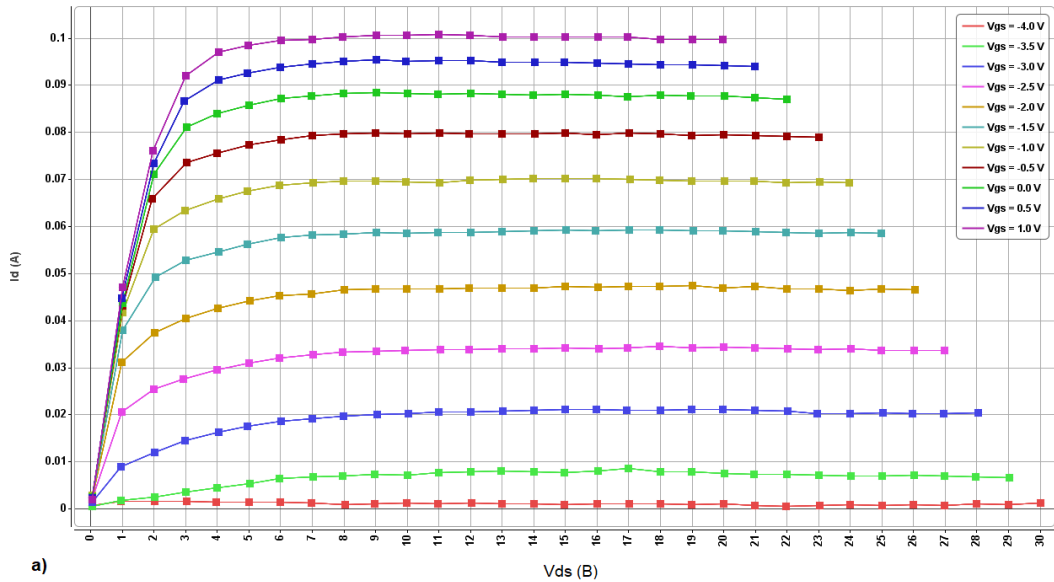
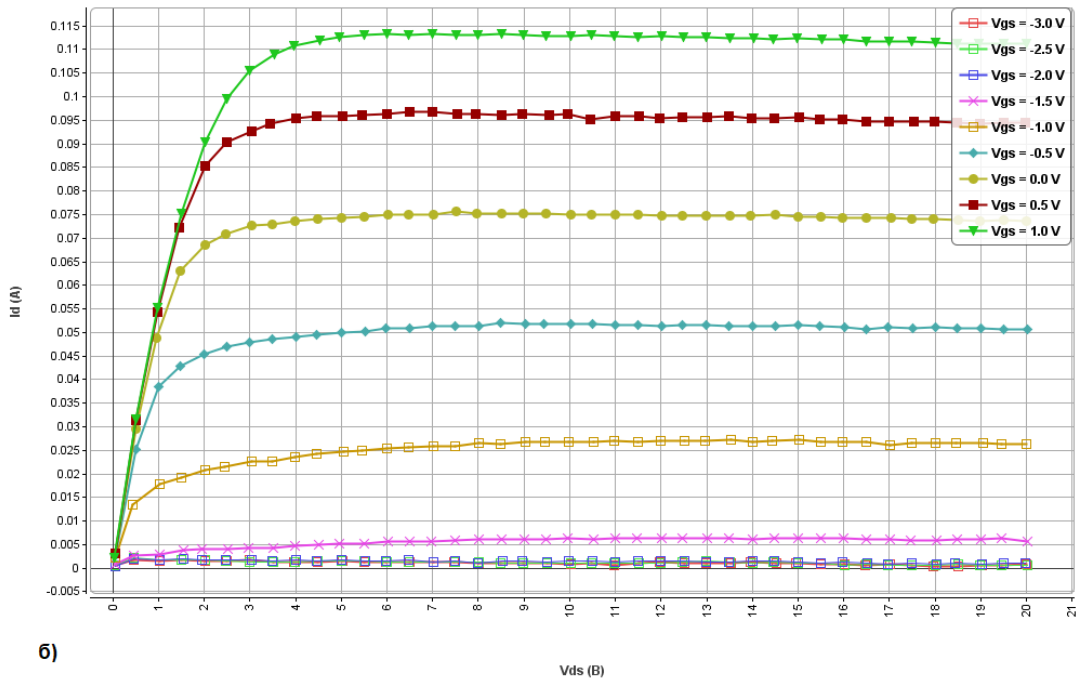


Рисунок 3.3 – Импульсные ВАХ $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ с $L_g=0,15$ мкм, $W_g=100$ мкм с оптимизированной конструкцией буферного слоя: а) $I_d(V_{ds})$ для точек покоя ($V_g=0, V_{ds}=0$) (синие кривые) и ($V_g=-4$ В, $V_{ds}=30$ В) (красные кривые); б) передаточные характеристики транзистора для $V_{ds}=10$ В

ВАХ $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ и $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$ транзисторов с $L_g=0,1$ мкм приведены на рисунке 3.4. Включение в конструкцию расположенного под GaN каналом толщиной 0,05 мкм обратного барьерного слоя AlGaIn толщиной 0,15 мкм подавляет короткоканальный эффект и «kink» эффект, однако приводит к снижению тока в $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ на 26%. Коллапс тока в $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ и $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$ транзисторах возрастает до 30÷40%.



a)



б)

Рисунок 3.4 – Импульсные ВАХ $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ (а) и $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ (б) с $L_g=100$ нм, $W_g=100$ мкм и буферного слоя с Fe-легированием на расстоянии 0,5 мкм от канала, обратным AlGaIn барьером и каналом толщиной 50 нм

Подавление короткоканальных эффектов в транзисторах с затвором длиной 0,1 мкм возможно, при этом происходит снижение тока и рост коллапса, в наибольшей степени проявляющееся в $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ транзисторах.

3.2.3 Влияние расстояния исток-сток на СВЧ характеристики

Малосигнальные СВЧ параметры транзисторов измерялись на расположенных на пластинах транзисторах с шириной затвора 100 мкм и различной длиной затвора (длина затвора контролировалась на стадии изготовления транзистора с помощью сканирующей электронной микроскопии) и расстоянием исток-сток. Напряжение и ток в рабочей точке транзисторов задавались источниками постоянного напряжения, поэтому на измеренные параметры влиял разогрев рабочей области транзисторов, который менялся при выборе рабочих точек для измерения. Процедура деэмбеддинга для исключения паразитных влияний контактных площадок на результаты измерений не проводилась. Несмотря на данные факторы, приводящие к снижению измеряемых параметров приборов, разработанные СВЧ транзисторы показали высокие СВЧ параметры. Сравнение малосигнальных СВЧ характеристик InAlN/AlN/GaN HEMT и AlGaN/AlN/GaN HEMT с неоптимизированной конструкцией буферного слоя, длиной затвора $0,1 \div 0,12$ мкм и различным расстоянием истоком-сток, показывает, что, изготовленные по идентичным технологическим процессам, схожей топологии и одинаковых режимах по току и напряжению, AlGaN/AlN/GaN HEMT демонстрирует более высокий коэффициент усиления, чем InAlN/AlN/GaN HEMT [184]. При уменьшении расстояния между истоком и стоком в InAlN/AlN/GaN HEMT с 4 до 3 мкм изменения в зависимости MAG/MSG от частоты сводятся главным образом к сдвигу в область более высоких частот, при этом величина сдвига составляет, в зависимости от рабочего напряжения, $5 \div 10$ ГГц (рисунок 3.5).

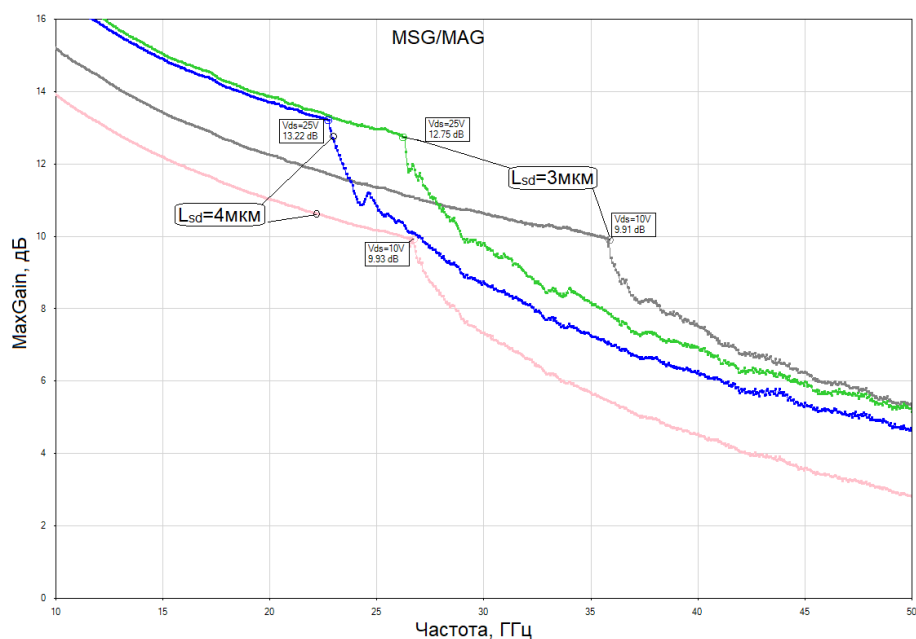


Рисунок 3.5 – Сравнение MSG/MAG InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN транзисторов с длиной затвора 0,1 мкм и расстоянием между истоком и стоком L_{sd} 3 и 4 мкм.

Изменение конструкции буферного слоя позволило получить в СВЧ-транзисторах на основе InAlN/AlN/GaN HEMT и AlGaN/AlN/GaN HEMT с $L_g=0,15$ мкм более высокие значения MSG/MAG, чем у транзисторов с $L_g=0,1\div 0,12$ мкм с неоптимизированным вариантом буферного слоя. На рисунке 3.6 показаны MSG/MAG для InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN транзисторов с длиной затвора 0,15 мкм, шириной 100 мкм и разным расстоянием между истоком и стоком (3, 2,5 и 2 мкм). Уменьшение расстояния исток-сток на 0,5 мкм для InAlN/AlN/GaN HEMT позволяет поднять MSG в транзисторе, при этом частота, при которой коэффициент стабильности равен 1, снижается. В AlGaN/AlN/GaN HEMT сокращение расстояния исток-сток с 2,5 до 2 мкм не приводит к значительному увеличению MSG, в то время как снижение расстояния с 4 до 3 в InAlN/AlN/GaN приводит к значительному росту MSG и расширению частотного диапазона транзистора.

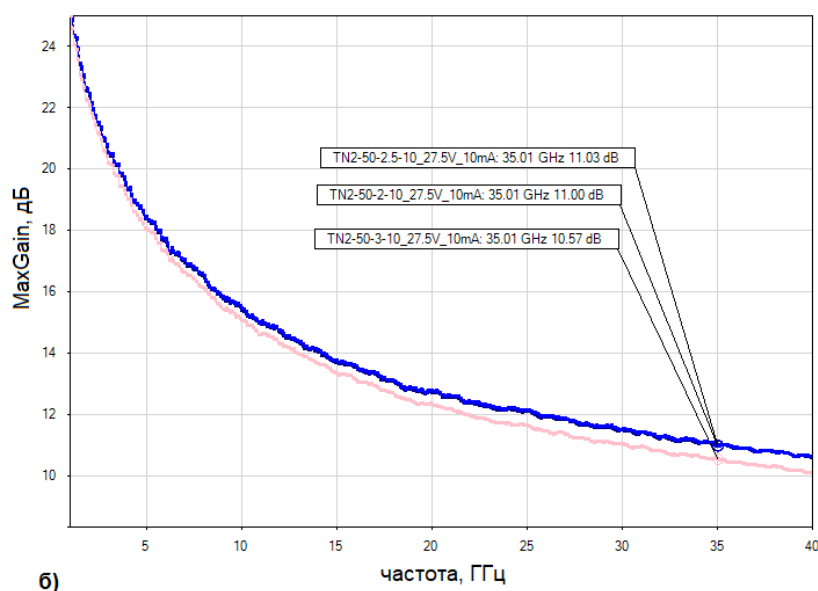
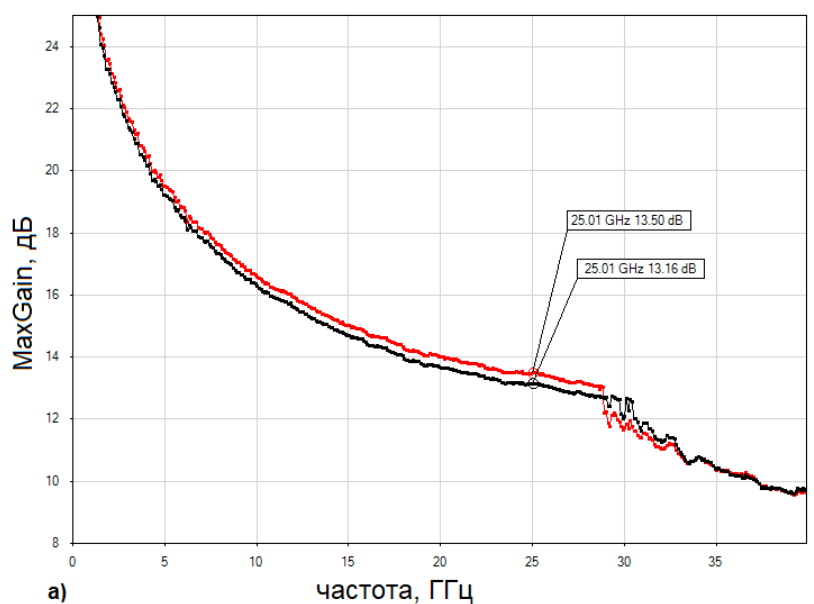


Рисунок 3.6 – Зависимости MSG/MAG от частоты для НЕМТ с длиной затвора 0,15 мкм, шириной 100 мкм и расстоянием исток-сток, измеренная при $I_d=10\text{мА}$, $V_{ds}=27,5\text{ В}$: а) в InAlN/AlN/GaN НЕМТ 2,5 мкм (красная кривая) и 2 мкм (черная кривая), (б) в AlGaIn/AlN/GaN НЕМТ 3 мкм (розовая кривая), 2,5 и 2 мкм (синие кривые)

Полученные данные позволяют выбрать следующие параметры конструкции транзистора для работы в диапазоне 30÷40 ГГц: расстояние исток-сток не более 2÷2,5 мкм и длину затвора не более 0,15 мкм.

3.2.4 Влияние длины затвора на усиление (InAlGa)N/AlN/GaN HEMT

Влияние длины затвора InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN транзисторов на величину MAG/MSG показано на рисунке 3.7.

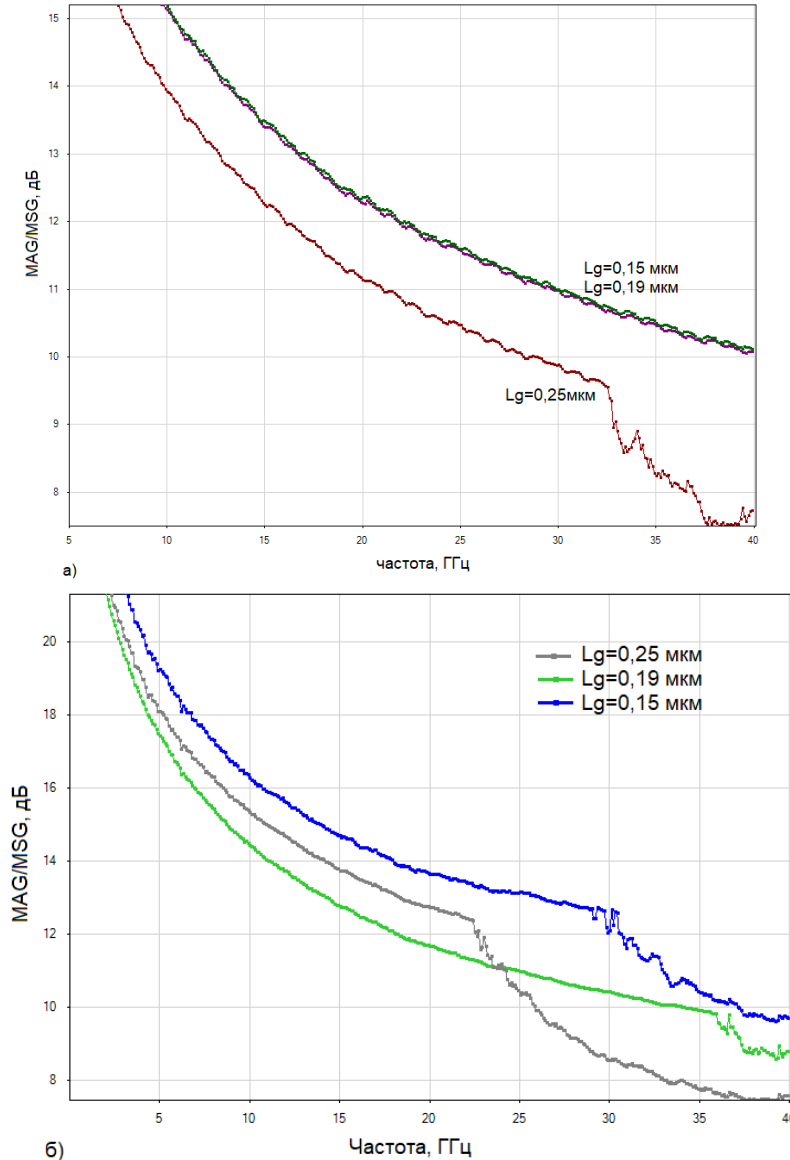


Рисунок 3.7 – Сравнение MSG/MAG AlGaN/AlN/GaN (а) и InAlN/AlN/GaN (б) транзисторов с длиной затвора 0,25 , 0,19 и 0,15 мкм, $W_g=100$ мкм для рабочей точки $V_{ds}=25$ В, $I_d=15$ мА.

С уменьшением длины затвора до 0,15 мкм в обоих типах транзисторов MAG/MSG становится больше (в AlGaN/AlN/GaN) или приближается (в In-

AlN/AlN/GaN) на 40 ГГц к 10 дБ – уровню усиления, позволяющему создавать усилительные СВЧ МИС на основе таких транзисторов.

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 [195].

3.2.5 Сравнение граничных частот усиления AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN транзисторов

На рисунке 3.8 показаны частотные зависимости основных усилительных параметров транзистора - MSG/MAG, h_{21} и U , определенные для InAlN/AlN/GaN (зеленые кривые) и AlGaN/AlN/GaN (красные и черные 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. Из рассчитанных значений MSG, h_{21} и U можно оценить f_t и f_{max} транзисторов.

С повышением тока и рабочего напряжения с 10 до 15 мА MSG/MAG в транзисторах увеличивается, а коэффициент стабильности для InAlN/AlN/GaN НЕМТ снижается. При этом до 30 ГГц InAlN/AlN/GaN НЕМТ имеет больший коэффициент усиления, чем AlGaN/AlN/GaN НЕМТ. Оба типа транзисторов имеют близкие значения f_t , который из частотной зависимости $h_{21}(f)$ можно оценить равным примерно 34 ГГц. Из-за большой входной емкости InAlN/AlN/GaN НЕМТ и других отличий внутренних параметров, f_{max} у транзисторов отличается, составляя 148 и 183 ГГц для InAlN/AlN/GaN НЕМТ и AlGaN/AlN/GaN НЕМТ соответственно.

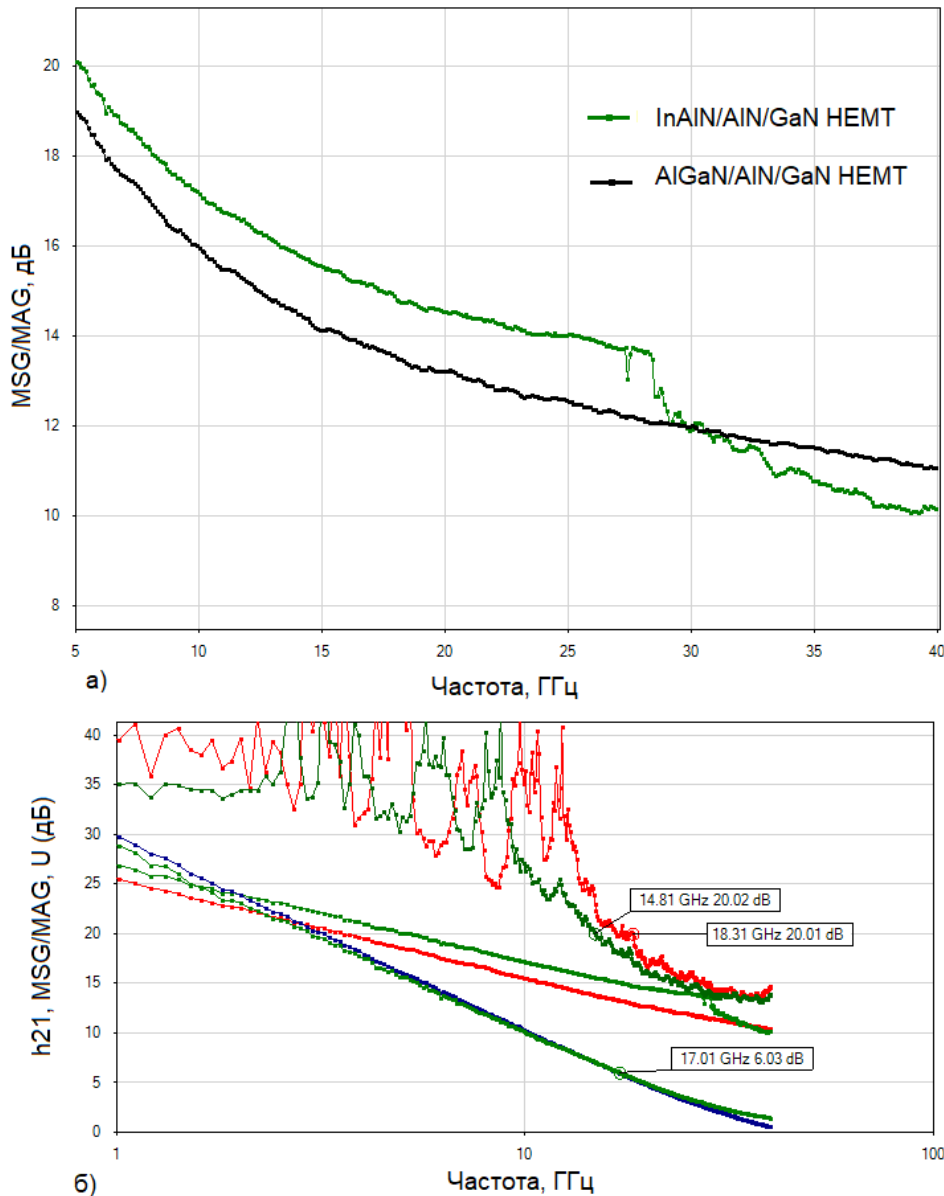


Рисунок 3.9 – Сравнение MSG/MAG, h_{21} и U для InAlN/AlN/GaN (зеленые кривые) и AlGaN/AlN/GaN (красные, синие и черные кривые) транзисторов с $L_g=0,15$, $L_{sd}=2$ мкм, $W_g=100$ мкм для рабочей точки $V_{ds}=27,5$ В, $I_d=15$ мА

3.3 Основные результаты и выводы главы 3

При толщине InAlN равной $5\div 7$ нм и мольной доли индия равной $12\div 14\%$, величина f_{max} в InAlN/AlN/GaN HEMT будет близкой к максимальной.

Для транзисторов с $L_g=0,15$ мкм для подавления короткоканального эффекта на ВАХ достаточно включения в конструкцию легированного железом буфер-

ного слоя, при этом снижение максимального тока в результате применения легирования буферного слоя в $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ составляет около 16%. «Kink» эффект на ВАХ транзистора снижается примерно в 2 раза. В $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ на ВАХ отсутствует «kink» эффект, а коллапс тока составляет 19%.

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 AlGaN. Такая конструкция приводит к снижению тока в $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ на 26%, и увеличению коллапса тока.

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

На изготовленных $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ 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 [195].

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы методы формирования высокоомного буферного слоя, обеспечивающего пространственную локализацию двумерного электронного газа в канале транзистора при максимальных напряжениях пробоя в транзисторе; исследованы конструкции гетероструктур InAlN/GaN и AlGaN/GaN, обеспечивающие наилучшее сочетание параметров гетероструктуры и транзистора; ряд конструктивных параметров гетероструктур был выбран в результате численного моделирования в программе Silvaco TCAD; изготовлены СВЧ InAlN/GaN и AlGaN/GaN с различными конструкциями буферного слоя и длиной затвора, исследованы их низкочастотные и высокочастотные характеристики, проанализирована устойчивость к воздействию температуры и влажности используемых для пассивации СВЧ транзисторов диэлектрических покрытий. В работе проведен комплекс исследований, направленных на решение проблем при создании мощных СВЧ транзисторов мм-диапазона на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN: низких напряжений пробоя, высоких значений коллапса тока и выходной проводимости, нестабильности диэлектрических покрытий, используемых для пассивации. Разработанные конструкции позволили значительно улучшить параметры изготавливаемых мощных СВЧ транзисторов на основе нитрида галлия.

Основные научные и практические результаты, полученные в работе:

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 AlGaN/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 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yole Developement. SiC, Sapphire, GaN... : what is the business evolution of the non-Silicon based semiconductor industry? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wesrch.com/electronics/sic-sapphire-gan-what-is-the-business-evolution-of-the-non-silicon-based-semiconductor-industry-PFEL1SE1000QEOS#page1>.
2. Shinohara K. Challenges & Opportunities for the Advancement of Millimeter-Wave GaN Transistors. 2017. P. 25. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/2009/2009178182.pdf>
3. Leuther A. et al. 20 nm Metamorphic HEMT technology for terahertz monolithic integrated circuits // 2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference. 2014. P. 84–87.
4. Lai R. et al. Fabrication of InP HEMT devices with extremely high F_{max} // 2008 20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. 2008. P. 1–3.
5. Hülsmann A. et al. Advanced mHEMT technologies for space applications. 2009. P. 5. // 20th International Symposium on Space Terahertz Technology, Charlottesville, 20-22 April 2009
6. Dae-Hyun Kim, del Alamo J.A. 30-nm InAs PHEMTs with $f_T = 644\text{GHz}$ and $f_{max} = 681\text{GHz}$ // IEEE Electron Device Lett. 2010. Vol. 31, № 8. P. 806–808.
7. Kuo C. et al. RF Performance Improvement of Metamorphic High-Electron Mobility Transistor Using $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})_m/(\text{InAs})_n$ Superlattice-Channel Structure for Millimeter-Wave Applications // IEEE Electron Device Lett. 2010. Vol. 31, № 7. P. 677–679.
8. OMMIC Short Form Catalog 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mrc-gigacomp.com/pdfs/OMMIC-catalogue-non-ITAR-MMICs-2016.pdf>.
9. Anwar A. GaN Market Update – Opportunities and Outlook // Power Electron. P. 155.

10. Quay R. Gallium nitride electronics. Berlin: Springer, 2008. 469 p.
11. Vendelin G.D., Pavio A.M., Rohde U.L. Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques: Vendelin/Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
12. Walker J.L.B. Handbook of RF and Microwave Power Amplifiers. Cambridge University Press, 2012. 705 p.
13. Jubadi W.M., Packeer F., Missous M. Optimization of Empirical Modelling of Advanced Highly Strained In_{0.7}Ga_{0.3}As/In_{0.52}Al_{0.48}As pHEMTs for Low Noise Amplifier // Int. J. Electr. Comput. Eng. IJECE. 2017. Vol. 7, № 6. P. 3002–3009.
14. Chung J.W. Millimeter-wave GaN high electron mobility transistors and their integration with silicon electronics // Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
15. А. И. Белоус, М. К. Мерданов. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. Книга 2. 1st ed. Техносфера. 729 p.
16. Foutz B.E. et al. Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85, № 11. P. 7727.
17. O’Leary S.K. et al. Electron Transport Within III-V Nitride Semiconductors // Springer Handb. Electron. Photonic Mater. 2017. P. 1–1.
18. Optimize a Power Scheme for these Transient Times [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <https://www.electronicdesign.com/power/optimize-power-scheme-these-transient-times> (accessed: 13.09.2019).
19. Benson K. GaN Breaks Barriers—RF Power Amplifiers Go Wide and High // Analog Dialogue 51-09, September 2017. 2017. P. 3.
20. Trew R.J. High-frequency solid-state electronic devices // IEEE Trans. Electron Devices. 2005. Vol. 52, № 5. P. 638–649.
21. Montanari S. Fabrication and characterization of planar Gunn diodes for monolithic microwave integrated circuits. Jülich: Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2005. 150 p.

22. Palacios T. Beyond the AlGa_N/Ga_N HEMT: new concepts for high-speed transistors // *Phys. Status Solidi A*. 2009. Vol. 206, № 6. P. 1145–1148.
23. Ibbetson J.P. et al. Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistors // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 77, № 2. P. 250.
24. Van de Walle C.G. et al. Theory of doping and defects in III–V nitrides // *J. Cryst. Growth*. 1998. Vol. 189–190. P. 505–510.
25. Ambacher O. et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa_N/Ga_N heterostructures // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 87, № 1. P. 334.
26. Jena D. et al. Electron Transport in III–V Nitride Two-Dimensional Electron Gases // *Phys. Status Solidi B*. 2001. Vol. 228, № 2. P. 617–619.
27. Parish G. et al. AlGa_N/Al_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors with Improved Carrier Transport // *Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices*, 2004. 2004. P. 29–32.
28. Smorchkova I.P. et al. Polarization-induced charge and electron mobility in AlGa_N/Ga_N heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86, № 8. P. 4520.
29. Hsu L., Walukiewicz W. Electron mobility in Al_xGa_{1-x}N / Ga_N heterostructures // *Phys. Rev. B*. 1997. Vol. 56, № 3. P. 1520–1528.
30. Bernardini F., Fiorentini V., Vanderbilt D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides // *Phys. Rev. B*. 1997. Vol. 56, № 16. P. R10024.
31. Stutzmann M. et al. Playing with Polarity // *Phys. Status Solidi B*. 2001. Vol. 228, № 2. P. 505–512.
32. Shur M.S., Gaska R., Bykhovski A. Ga_N-based electronic devices // *Solid-State Electron*. 1999. Vol. 43, № 8. P. 1451–1458.
33. Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. Физические свойства твёрдых растворов In_xAl_{1-x}N // *Известия Высших Учебных Заведений Физика*. 2018. Vol. 61, № 6. P. 142–147.

34. Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. Твердые растворы $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$: проблемы стабильности состава // Физика И Техника Полупроводников. 2019. Vol. 53, № 12. P. 1733–1739.
35. Великовский Л.Э. et al. Особенности радиационных изменений электрических свойств InAlN/GaN HEMT // Известия Высших Учебных Заведений Физика. 2019. Vol. 62, № 9. P. 106–111.
36. Goyal N., Fjeldly T.A. Effects of strain relaxation on bare surface barrier height and two-dimensional electron gas in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113, № 1. P. 014505.
37. Jimenez J.L., Chowdhury U. Recent advances on the understanding of the physics of failure of GaN on SiC FET technology // 2009 Reliability of Compound Semiconductors Digest (ROCS). 2009. P. 57–58.
38. Ichikawa H. et al. AlGa N/GaN HEMTs versus InAlN/GaN HEMTs fabricated by 150-nm Y-gate process // 2014 Asia-Pacific Microwave Conference. 2014. P. 780–782.
39. Higashiwaki M., Mimura T., Matsui T. AlGa N/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors on 4H-SiC Substrates with Current-Gain Cutoff Frequency of 190 GHz // Appl. Phys. Express. 2008. Vol. 1, № 2. P. 021103.
40. Osipov K.Y. et al. Current Dispersion in Short Channel AlGa N/GaN HEMTs. 2015. P. 4.
41. Hsu L., Walukiewicz W. Effect of polarization fields on transport properties in AlGa N/GaN heterostructures // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89, № 3. P. 1783.
42. Smorchkova I. et al. AlN/GaN and (Al, Ga) N/AlN/GaN two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. P. 5196–5201.
43. Umesh K. Mishra. AlGa N/GaN HEMTs and AlGa N/GaN HEMTs and HBTs. University of California in Santa Barbara, 2000.

44. Coffie R. et al. Impact of AlN Interlayer on Reliability of AlGaN/GaN HEMTS // 2006 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 2006. P. 99–102.
45. Jin D., Alamo J.A. del. Methodology for the Study of Dynamic ON-Resistance in High-Voltage GaN Field-Effect Transistors // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60, № 10. P. 3190–3196.
46. Yu E.T. et al. Schottky barrier engineering in III–V nitrides via the piezoelectric effect // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73, № 13. P. 1880.
47. Ivo P. et al. Influence of GaN cap on robustness of AlGaN/GaN HEMTs // 2009 IEEE International Reliability Physics Symposium. 2009. P. 71–75.
48. Khalil I. et al. Improving the Linearity of GaN HEMTs by Optimizing Epitaxial Structure // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, № 3. P. 361–364.
49. Wetzel C. et al. Pressure Induced Deep Gap State of Oxygen in GaN // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78, № 20. P. 3923.
50. Van de Walle C.G., Neugebauer J. Defects and Doping in III-V Nitrides [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // Materials Science Forum. 1997. URL: <https://www.scientific.net/MSF.258-263.19> (accessed: 13.09.2019).
51. Topf M. et al. Residual Donors in GaN Epitaxial Films - A Correlation of HALL Effect, SIMS and Photoluminescence Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <https://www.scientific.net/MSF.264-268.1323> (accessed: 13.09.2019).
52. Wetzel C. Strongly Localized Donor Level in Oxygen Doped Gallium Nitride // 23rd Int. Conf. Phys. Semicond. Berl. Ger. July 21 - 26 1996 Proc. 1996. Vol. 4.
53. Morkoç H. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Materials Properties, Physics and Growth. John Wiley & Sons, 2009. 1324 p.
54. Gamarra P. et al. Optimisation of a carbon doped buffer layer for AlGaN/GaN HEMT devices // J. Cryst. Growth. 2015. Vol. 414. P. 232–236.

55. Pecheux R. et al. Importance of buffer configuration in GaN HEMTs for high microwave performance and robustness // 2017 47th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). Leuven, Belgium: IEEE, 2017. P. 228–231.
56. Liu W., Balandin A.A. Thermal conduction in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys and thin films // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97, № 7. P. 073710.
57. Han T. et al. Control of short-channel effects in InAlN/GaN high-electron mobility transistors using graded AlGaIn buffer // Superlattices Microstruct. 2018. Vol. 116. P. 207–214.
58. Lee D.S. et al. 300-GHz InAlN/GaN HEMTs With InGaIn Back Barrier // IEEE Electron Device Lett. 2011. Vol. 32, № 11. P. 1525–1527.
59. Malmros A. et al. Impact of Channel Thickness on the Large-Signal Performance in InAlGaIn/AlN/GaN HEMTs With an AlGaIn Back Barrier // IEEE Trans. Electron Devices. 2019. Vol. 66, № 1. P. 364–371.
60. Mishra U.K. et al. GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers // Proc. IEEE. 2008. Vol. 96, № 2. P. 287–305.
61. Lugani L. Leakage mechanisms and contact technologies in InAlN/GaN high electron mobility transistors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/1652/4a011620ea787bd083658805a464007ac881.pdf> (accessed: 15.10.2019).
62. Bahat-Treidel E. GaN Based HEMTs for High Voltage Operation. Design, Technology and Characterization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/GaN-Based-HEMTs-for-High-Voltage-Operation.-Design%2C-Bahat-Treidel/e88699323dbfc46e22eafb766e655377001942b2> (accessed: 23.11.2019).
63. Mishra U.K., Singh J. Semiconductor Device Physics and Design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4020-6481-4> (accessed: 23.11.2019).
64. Lee D.S. et al. Impact of GaN channel scaling in InAlN/GaN HEMTs // 2011 International Electron Devices Meeting. 2011. P. 19.2.1-19.2.4.

65. Makiyama K. et al. High-Power-Density InAlGaN/GaN-HEMT Technology for W-Band Amplifier // 2016 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). 2016. P. 1–4.
66. Meneghini M. et al. Buffer Traps in Fe-Doped AlGaN/GaN HEMTs: Investigation of the Physical Properties Based on Pulsed and Transient Measurements // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. Vol. 61, № 12. P. 4070–4077.
67. Silvestria M. et al. GaN buffer design: Electrical characterization and prediction of the effect of deep level centers in GaN/AlGaN HEMTs // CS MANTECH Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2013.
68. Lo C.-F. et al. Thermal Effects between Carbon-Doped GaN and AlGaN Back-Barrier in AlGaN/GaN HEMTs on Si (111) Substrates // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2017. Vol. 6, № 11. P. S3048–S3051.
69. Ivo P. et al. Comparative study of AlGaN/GaN HEMTs robustness versus buffer design variations by applying Electroluminescence and electrical measurements // Microelectron. Reliab. 2011. Vol. 51, № 2. P. 217–223.
70. Bisi D. et al. Effects of buffer compensation strategies on the electrical performance and RF reliability of AlGaN/GaN HEMTs // Microelectron. Reliab. 2015. Vol. 55, № 9–10. P. 1662–1666.
71. Verzellesi G. et al. Influence of Buffer Carbon Doping on Pulse and AC Behavior of Insulated-Gate Field-Plated Power AlGaN/GaN HEMTs // IEEE Electron Device Lett. 2014. Vol. 35, № 4. P. 443–445.
72. Chini A. et al. Experimental and Numerical Analysis of Hole Emission Process From Carbon-Related Traps in GaN Buffer Layers // IEEE Trans. Electron Devices. 2016. Vol. 63, № 9. P. 3473–3478.
73. Verzellesi G. et al. Influence of Buffer Carbon Doping on Pulse and AC Behavior of Insulated-Gate Field-Plated Power AlGaN/GaN HEMTs // IEEE Electron Device Lett. 2014. Vol. 35, № 4. P. 443–445.
74. Hasegawa H. et al. Mechanisms of current collapse and gate leakage currents in AlGaN/GaN heterostructure field effect transistors // J. Vac. Sci. Technol. B Mi-

- croelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom. 2003.Vol.21, №4. P. 1844.
75. Subramani N.K. Physics-based TCAD device simulations and measurements of GaN HEMT technology for RF power amplifier applications. // Thesis, Université de Limoges, 2017.
 76. Optimisation of a carbon doped buffer layer for AlGaIn/GaN HEMT devices // J. Cryst. Growth. 2015. Vol. 414. P. 232–236.
 77. PCOR-SIMS Analysis | GaN HEMT Analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eag.com/resources/whitepapers/pcor-sims-analysis-of-gan-hemt-epitaxial-layers-grown-on-silicon-substrates/> (accessed: 13.09.2019).
 78. Heikman S. et al. Growth of Fe doped semi-insulating GaN by metalorganic chemical vapor deposition // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81, № 3. P. 439.
 79. Chiu H.-C. et al. Effect of various Fe-doped AlGaIn buffer layer of AlGaIn/GaN HEMTs on Si substrate // J. Vac. Sci. Technol. B Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom. 2017. Vol. 35, № 4. P. 041205.
 80. Balmer R.S. et al. On the incorporation mechanism of Fe in GaN grown by metal-organic vapour phase epitaxy // Phys. Status Solidi C. 2006. Vol. 3, № 6. P. 1429–1434.
 81. Chini A. et al. Experimental and numerical correlation between current-collapse and fe-doping profiles in GaN HEMTs // 2012 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2012. P. CD.2.1-CD.2.4.
 82. Kabouche R. et al. Comparison of C-Doped AlN/GaN HEMTs and AlN/GaN/AlGaIn Double Heterostructure for mmW Applications // 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). 2018. P. 5–8.
 83. Elsner J. et al. Deep acceptors trapped at threading-edge dislocations in GaN // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 58, № 19. P. 12571–12574.
 84. Lossy D.R. AlGaIn/GaN HEMTs on Silicon Carbide Substrates for Microwave Power Operation. 2003. P. 4.

85. Liu Z. et al. Compound semiconductor materials and devices. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2016. 65 p.
86. Khan M.A. et al. Current/voltage characteristic collapse in AlGa_N/Ga_N heterostructure insulated gate field effect transistors at high drain bias // *Electron. Lett.* 1994. Vol. 30, № 25. P. 2175–2176.
87. Binari S.C. et al. Trapping effects and microwave power performance in AlGa_N/Ga_N HEMTs // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2001. Vol. 48, №3. P. 465–471.
88. Horio K., Onodera H., Nakajima A. Analysis of backside-electrode and gate-field-plate effects on buffer-related current collapse in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109, № 11. P. 114508.
89. Joh J., Alamo J.A. del, Jimenez J. A Simple Current Collapse Measurement Technique for Ga_N High-Electron Mobility Transistors // *IEEE Electron Device Lett.* 2008. Vol. 29, № 7. P. 665–667.
90. Poblenz C. et al. Effect of carbon doping on buffer leakage in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors // *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct.* 2004. Vol. 22, № 3. P. 1145.
91. Bahat-Treidel E. et al. AlGa_N/Ga_N/Ga_N:C Back-Barrier HFETs With Breakdown Voltage of Over 1 kV and Low RON // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2010. Vol. 57, № 11. P. 3050–3058.
92. Uren M.J., Moreke J., Kuball M. Buffer Design to Minimize Current Collapse in Ga_N/AlGa_N HFETs // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2012. Vol. 59, № 12. P. 3327–3333.
93. Bahat-Treidel E. et al. AlGa_N/Ga_N/AlGa_N DH-HEMTs Breakdown Voltage Enhancement Using Multiple Grating Field Plates (MGFPs) // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2010. Vol. 57, № 6. P. 1208–1216.
94. Saito W. et al. Suppression of Dynamic On-Resistance Increase and Gate Charge Measurements in High-Voltage Ga_N-HEMTs With Optimized Field-Plate Structure // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2007. Vol. 54, № 8. P. 1825–1830.

95. Saito W. et al. Field-Plate Structure Dependence of Current Collapse Phenomena in High-Voltage GaN-HEMTs // IEEE Electron Device Lett. 2010. Vol. 31, № 7. P. 659–661.
96. Hasan M.T. et al. Current Collapse Suppression by Gate Field-Plate in Al-GaN/GaN HEMTs // IEEE Electron Device Lett. 2013. Vol. 34, № 11. P. 1379–1381.
97. Brar B. et al. Impact ionization in high performance AlGaN/GaN HEMTs // Proceedings. IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices. 2002. P. 487–491.
98. Palmateer L.F. et al. DC and RF measurements of the kink effect in 0.2 μm gate length AlInAs/GaInAs/InP modulation-doped field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54, № 21. P. 2139–2141.
99. Georgescu B. et al. New aspects and mechanism of kink effect in InAlAs/InGaAs/InP inverted HFETs // IEEE Electron Device Lett. 1998. Vol. 19, № 5. P. 154–156.
100. Mazzanti A. et al. Physics-based explanation of kink dynamics in AlGaAs/GaAs HFETs // IEEE Electron Device Lett. 2002. Vol. 23, № 7. P. 383–385.
101. Ching-Hui Lin et al. Transient pulsed analysis on GaN HEMTs at cryogenic temperatures // IEEE Electron Device Lett. 2005. Vol. 26, № 10. P. 710–712.
102. Sun H.F., Bolognesi C.R. Anomalous behavior of AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistors at cryogenic temperatures: From current collapse to current enhancement with cooling // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90, № 12. P. 123505.
103. Cuerdo R. et al. The Kink Effect at Cryogenic Temperatures in Deep Submicron AlGaN/GaN HEMTs // IEEE Electron Device Lett. 2009. Vol. 30, № 3. P. 209–212.
104. Meneghesso G. et al. Correlation between kink and cathodoluminescence spectra in AlGaN/GaN high electron mobility transistors // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96, № 26. P. 263512.

105. Fu L. et al. Field-dependent carrier trapping induced kink effect in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98, № 17. P. 173508.
106. Faqir M. Analysis of the physical mechanisms limiting performance and reliability of Ga_N based HEMTs. University of “Modena e Reggio Emilia” and the University of “Bordeaux 1,” 2009.
107. Kang Y., Sung H., Kim H. Investigation of kink effect in normally-off AlGa_N/Ga_N recessed-gate MOS-heterostructure FETs // *J. Vac. Sci. Technol. B Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom.* 2016. Vol. 34, № 5. P. 052202.
108. Killat N. et al. Fe-doped AlGa_N / Ga_N HEMTs: Kink-Effect Screening using Yellow Luminescence ? // CS MANTECH Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2013.
109. Altuntas P. et al. On the correlation between kink effect and effective mobility in InAl_N/Ga_N HEMTs // 2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference. 2014. P. 88–91.
110. Singh M. et al. “Kink” in AlGa_N/Ga_N-HEMTs: Floating Buffer Model // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2018. Vol. 65, № 9. P. 3746–3753.
111. Bergsten J. et al. Electron Trapping in Extended Defects in Microwave AlGa_N/Ga_N HEMTs With Carbon-Doped Buffers // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2018. Vol. 65, № 6. P. 2446–2453.
112. Awano Y. et al. Short-channel effects in subquarter-micrometer-gate HEMTs: simulation and experiment // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1989. Vol. 36, № 10. P. 2260–2266.
113. Medjdoub F. Gallium Nitride (Ga_N): Physics, Devices, and Technology. 1st ed. CRC Press, 2015.
114. Jessen G.H. et al. Short-Channel Effect Limitations on High-Frequency Operation of AlGa_N/Ga_N HEMTs for T-Gate Devices // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2007. Vol. 54, № 10. P. 2589–2597.

115. Uren M.J. et al. Punch-through in short-channel AlGa_N/Ga_N HFETs // IEEE Trans. Electron Devices. 2006. Vol. 53, № 2. P. 395–398.
116. Singh M., Wu Y.-R., Singh J. Velocity Overshoot Effects and Scaling Issues in III–V Nitrides // IEEE Trans. Electron Devices. 2005. Vol. 52, № 3. P. 311–316.
117. Ren J. et al. Hot electrons induced degradation in lattice-matched InAlN/GaN high electron mobility transistors // // Microelectron. Reliab. 2016. Vol. 56. P. 34–36
118. Kuzmík J. Material and device issues of InAlN/GaN heterostructures // The Ninth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Mircosystems. 2012. P. 45–50.
119. Song J. et al. High conductive gate leakage current channels induced by In segregation around screw- and mixed-type threading dislocations in lattice-matched In_xAl_{1–x}N/GaN heterostructures // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97, № 23. P. 232106.
120. Nallatamby J. et al. Méthodes avancées de caractérisation et de modélisation des transistors HEMT GaN, RF & Microwave. Paris, France, 2018.
121. Chung J.W. et al. Gate-Recessed InAlN/GaN HEMTs on SiC Substrate With Al₂O₃ Passivation // IEEE Electron Device Lett. 2009. Vol. 30, № 9. P. 904–906.
122. Tsurumi N. et al. AlN Passivation Over AlGa_N/Ga_N HFETs for Surface Heat Spreading // IEEE Trans. Electron Devices. 2010. Vol. 57, № 5. P. 980–985.
123. Harvard E., Brown R., Shealy J.R. Performance of AlGa_N/Ga_N High-Electron Mobility Transistors With AlSiN Passivation // IEEE Trans. Electron Devices. 2011. Vol. 58, № 1. P. 87–94.
124. Lee C.-S. et al. Ti_{0.5}Al_{0.5}O₂-Dielectric AlGa_N/Ga_N/Si Metal-Oxide-Semiconductor Heterostructure Field-Effect Transistors by Using Non-Vacuum Ultrasonic Spray Pyrolysis Deposition // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2016. Vol. 5, № 12. P. Q284–Q288.
125. Čičo K. et al. Electrical properties of InAlN/GaN high electron mobility transistor with Al₂O₃, ZrO₂, and GdScO₃ gate dielectrics // J. Vac. Sci. Technol. B Nano-

- technol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom. 2011. Vol. 29, № 1. P. 01A808.
126. Liu C., Chor E.F., Tan L.S. Improved DC performance of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors using hafnium oxide for surface passivation // Thin Solid Films. 2007. Vol. 515, № 10. P. 4369–4372.
127. Sato T. et al. AlGa_N-Ga_N Metal-Insulator-Semiconductor High-Electron-Mobility Transistors With Very High-k Oxynitride TaO_x\Ny Gate Dielectric // IEEE Electron Device Lett. 2013. Vol. 34, № 3. P. 375–377.
128. Lee C.-T. et al. Ga_N-Based Enhancement-Mode Metal–Oxide–Semiconductor High-Electron Mobility Transistors Using LiNbO₃ Ferroelectric Insulator on Gate-Recessed Structure // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62, № 8. P. 2481–2487.
129. Wang W.-K. et al. Low-k BCB Passivation on AlGa_N–Ga_N HEMT Fabrication // IEEE Electron Device Lett. 2004. Vol. 25, № 12. P. 763–765.
130. Gillespie J.K. et al. Effects of Sc₂O₃ and MgO passivation layers on the output power of AlGa_N/Ga_N HEMTs // IEEE Electron Device Lett. 2002. Vol. 23, № 9. P. 505–507.
131. Chiu H.-C. et al. Device Characteristics of AlGa_N/Ga_N MOS-HEMTs Using High-k Praseodymium Oxide Layer // IEEE Trans. Electron Devices. 2008. Vol. 55, № 11. P. 3305–3309.
132. Liu S.-C. et al. Effective Passivation With High-Density Positive Fixed Charges for Ga_N MIS-HEMTs // IEEE J. Electron Devices Soc. 2017. Vol. 5, № 3. P. 170–174.
133. Lee C.-S. et al. Investigations of TiO₂–AlGa_N/Ga_N/Si-Passivated HFETs and MOS-HFETs Using Ultrasonic Spray Pyrolysis Deposition // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62, № 5. P. 1460–1466.
134. Bera M.K. et al. Positive Threshold-Voltage Shift of Y₂O₃ Gate Dielectric In-Al_N/Ga_N-on-Si (111) MOSHEMTs with Respect to HEMTs // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2014. Vol. 3, № 6. P. Q120–Q126.

135. Downey B.P., Wheeler V.D., Meyer D.J. Localized phase change of VO₂ films grown by atomic-layer deposition on InAlN/AlN/GaN heterostructures // *Appl. Phys. Express*. 2017. Vol. 10, № 6. P. 061101.
136. Hampson M.D. et al. Polyimide Passivated AlGa_N–Ga_N HFETs With 7.65 W/mm at 18 GHz // *IEEE Electron Device Lett*. 2004. Vol. 25, № 5. P. 238–240.
137. Abermann S. et al. MOCVD of HfO₂ and ZrO₂ high-k gate dielectrics for InAlN/AlN/GaN MOS-HEMTs // *Semicond. Sci. Technol*. 2007. Vol. 22, № 12. P. 1272–1275.
138. Ozaki S. et al. Millimeter-Wave Ga_N HEMTs With Cavity-Gate Structure Using MSQ-Based Inter-Layer Dielectric // *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* 2016. Vol. 29, № 4. P. 370–375.
139. Liu H.-Y. et al. Temperature-Dependent Investigation of AlGa_N/Ga_N Oxide-Passivated HEMT by Using Hydrogen Peroxide Oxidation Method // *ECS J. Solid State Sci. Technol*. 2012. Vol. 1, № 4. P. Q86–Q90.
140. Fitch R.C. et al. Comparison of passivation layers for AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors // *J. Vac. Sci. Technol. B Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom*. 2011. Vol. 29, № 6. P. 061204.
141. Shearn M. et al. *Advanced Plasma Processing: Etching, Deposition, and Wafer Bonding Techniques for Semiconductor Applications* // *Semiconductor Technologies* / ed. Grym J. InTech, 2010.
142. Germain M. et al. Surface stabilization for higher performance AlGa_N/Ga_N HEMT with in-situ MOVPE Si₃N₄ // *MRS Proc*. 2004. Vol. 831. P. E6.7.
143. Heying B. et al. In situ Si₃N₄ passivation of AlGa_N/Ga_N HEMTs by molecular beam epitaxy // *Electron. Lett*. 2007. Vol. 43, № 14.
144. Higashiwaki M. et al. A comparative study of Si₃N₄ deposition methods for millimeter-wave AlGa_N/Ga_N HFETs // *2008 Device Research Conference*. 2008. P. 207–208.

145. Shinohara K. et al. Scaling of GaN HEMTs and Schottky Diodes for Submillimeter-Wave MMIC Applications // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2013. Vol. 60, № 10. P. 2982–2996.
146. Rajan S. et al. Surface Passivation of AlGaN/GaN HEMTs // *2008 Device Research Conference*. 2008. P. 131–132.
147. Makiyama K. et al. High-power GaN-HEMT with low current collapse for millimeter-wave amplifier // *Phys. Status Solidi C*. 2011. Vol. 8, № 7–8. P. 2442–2444.
148. Gao F. et al. Impact of Water-Assisted Electrochemical Reactions on the OFF-State Degradation of AlGaN/GaN HEMTs // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2014. Vol. 61, № 2. P. 437–444.
149. Lee D.S. et al. Impact of Al₂O₃ Passivation Thickness in Highly Scaled GaN HEMTs // *IEEE Electron Device Lett.* 2012. Vol. 33, № 7. P. 976–978.
150. Chung J.W. et al. Gate-Recessed InAlN/GaN HEMTs on SiC Substrate With Al₂O₃ Passivation // *IEEE Electron Device Lett.* 2009. Vol. 30, № 9. P. 904–906.
151. Makiyama K. et al. InAlGaN/GaN-HEMT device technologies for W-band high-power amplifier // *2016 Lester Eastman Conference (LEC)*. 2016. P. 31–34.
152. Hori Y., Yatabe Z., Hashizume T. Characterization of interface states in Al₂O₃/AlGaN/GaN structures for improved performance of high-electron-mobility transistors // *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 114, № 24. P. 244503.
153. Ostermaier C. et al. Reliability investigation of the degradation of the surface passivation of InAlN/GaN HEMTs using a dual gate structure // *Microelectron. Reliab.* 2012. Vol. 52, № 9–10. P. 1812–1815.
154. Zhu C. DC, microwave, and noise properties of GaN based heterojunction field effect transistors and their reliability issues // *Thesis, Virginia Commonwealth University*, 2013, [Электронный ресурс].— Режим доступа: https://pdfs.semanticscholar.org/e0c5/184672b0ba4726b128841577fcad0c7b6cb3.pdf?_ga=2.190172907.13846783.1577376326-1164358405.1577376326 (accessed: 23.11.2019).

155. Meyer D.J. Surface Passivation Studies of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors. // Thesis, The Pennsylvania State University, 2008. [Электронный ресурс]. –Режим доступа: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/1418
156. Freedman J.J. et al. Recessed gate normally-OFF Al₂O₃/InAlN/GaN MOS-HEMT on silicon // Appl. Phys. Express. 2014. Vol. 7, № 10. P. 104101.
157. Saunier P. et al. InAlN Barrier Scaled Devices for Very High fT and for Low-Voltage RF Applications // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60, № 10. P. 3099–3104.
158. Kuzmik J. et al. InAlN/GaN HEMTs: a first insight into technological optimization // IEEE Trans. Electron Devices. 2006. Vol. 53, № 3. P. 422–426.
159. Medjdoub F. et al. Status of the Emerging InAlN/GaN Power HEMT Technology // Open Electr. Electron. Eng. J. 2008. Vol. 2, № 1. P. 1–7.
160. Gamarra P. et al. In-situ passivation of quaternary barrier InAlGaIn/GaN HEMTs // J. Cryst. Growth. 2017. Vol. 464. P. 143–147.
161. Aubry R. et al. ICP-CVD SiN Passivation for High-Power RF InAlGaIn/GaN/SiC HEMT // IEEE Electron Device Lett. 2016. Vol. 37, № 5. P. 629–632.
162. Niida Y. et al. 3.6 W/mm high power density W-band InAlGaIn/GaN HEMT MMIC power amplifier // 2016 IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications (PAWR). Austin, TX, USA: IEEE, 2016. P. 24–26.
163. Makiyama K. et al. Collapse-free high power InAlGaIn/GaN-HEMT with 3 W/mm at 96 GHz // 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). 2015. P. 9.1.1-9.1.4.
164. Joh J., Xia L., Alamo J.A. del. Gate Current Degradation Mechanisms of GaN High Electron Mobility Transistors // 2007 IEEE International Electron Devices Meeting. 2007. P. 385–388.
165. Rahbardar Mojaver H., Gosselin J.-L., Valizadeh P. Use of a bilayer lattice-matched AlInGaIn barrier for improving the channel carrier confinement of en-

- hancement-mode AlInGaN/GaN hetero-structure field-effect transistors // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 121, № 24. P. 244502.
166. Herfurth P. Thin body InAlN/GaN HEMT technology on sapphire: special focus on high-temperature and electrochemical applications. // Thesis, Universität Ulm, 2016.
167. Kim K.S. et al. Determination of the band-gap energy of Al_{1-x}In_xN grown by metal-organic chemical-vapor deposition // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71, № 6. P. 800–802.
168. Sugita K. et al. MOVPE growth of InAlN/InGaN heterostructures with an intermediate range of In content // J. Cryst. Growth. 2011. Vol. 318, № 1. P. 505–508.
169. Gonschorek M. et al. High electron mobility lattice-matched AlInN/GaN field-effect transistor heterostructures // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89, № 6. P. 062106.
170. Yamada A. et al. Electron mobility enhancement in metalorganic-vapor-phase-epitaxy-grown InAlN high-electron-mobility transistors by control of surface morphology of spacer layer // Jpn. J. Appl. Phys. 2017. Vol. 57, № 1S. P. 01AD01.
171. Ma C., Gu G., Lü Y. A high performance InAlN/GaN HEMT with low Ron and gate leakage // J. Semicond. 2016. Vol. 37, № 2. P. 024009.
172. Wu Y., Sasangka W.A., Alamo J.A. del. Anomalous Source-Side Degradation of InAlN/GaN HEMTs Under High-Power Electrical Stress // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. Vol. 64, № 11. P. 4435–4441.
173. Rzin M. et al. Impact of the in situ SiN Thickness on Low-Frequency Noise in MOVPE InAlGaN/GaN HEMTs // IEEE Trans. Electron Devices. 2019. P. 1–4.
174. Jiao W. Properties of InAlN/GaN Heterostructures Prepared by Molecular Beam Epitaxy. 2015.
175. Taylor E. et al. Structural and optical properties of Ga auto-incorporated InAlN epilayers // J. Cryst. Growth. 2014. Vol. 408. P. 97–101.
176. Zhu J.J. et al. Contribution of GaN template to the unexpected Ga atoms incorporated into AlInN epilayers grown under an indium-very-rich condition by metalor-

- ganic chemical vapor deposition (MOCVD) // *J. Cryst. Growth*. 2012. Vol. 348, № 1. P. 25–30.
177. Kim J. et al. Effect of Group-III precursors on unintentional gallium incorporation during epitaxial growth of InAlN layers by metalorganic chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 118, № 12. P. 125303.
178. А.Ф. Цацульников et al. Эпитаксиальный рост гетероструктур GaN/AlN/InAlN для НЕМТ в горизонтальных МОС-гидридных реакторах различных конструкций // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Vol. 50, № 9.
179. Великовский Л.Э. et al. Разработки и исследования СВЧ транзисторов на основе AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур. 10-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»: Москва, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019.
180. Ichikawa J. et al. Effect of Growth Temperature on Structural Quality of InAlN Layer Lattice Matched to GaN Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 51, № 1S. P. 01AF07.
181. Hardy M.T. et al. Morphological and microstructural stability of N-polar InAlN thin films grown on free-standing GaN substrates by molecular beam epitaxy // *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*. 2016. Vol. 34, № 2. P. 021512.
182. Великовский Л.Э. et al. Разработка мощных GaN транзисторов L-S-C диапазона // Тезисы докладов 10-й всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы". Санкт-Петербург, 2015.
183. Курбанова Н.Е., Демченко О.И., Великовский Л.Э. Разработка мощных GaN транзисторов L,S и X диапазона // Тезисы докладов 11-й всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы". Москва, МГУ, 2017.

184. Velikovskiy L.E. et al. InAlN/GaN and AlGaIn/GaN HEMT Technologies Comparison for Microwave Applications // Тезисы докладов международной конференции IFOST 2019. Tomsk, Russia, 2019.
185. Polyakov A.Y., Lee I.-H. Deep traps in GaN-based structures as affecting the performance of GaN devices // Mater. Sci. Eng. R Rep. 2015. Vol. 94. P. 1–56.
186. Tapiero M. et al. Photoinduced current transient spectroscopy in high-resistivity bulk materials: Instrumentation and methodology // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64, № 8. P. 4006–4012.
187. Velikovskiy L.E. et al. Stress-dislocation management in MOVPE of GaN on SiC wafers // Phys. Status Solidi A. 2016. Vol. 213, № 10. P. 2759–2763.
188. Turuvekere S. et al. Gate Leakage Mechanisms in AlGaIn/GaN and AlInN/GaN HEMTs: Comparison and Modeling // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60, № 10. P. 3157–3165.
189. Lugani L. et al. Leakage mechanisms in InAlN based heterostructures // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, № 7. P. 074506.
190. Delage S.L. High power L-Band amplifiers with InAlN/GaN HEMT. Amsterdam, 2012.
191. Velikovskiy L.E. et al. Field-plate design optimization for high-power GaN high electron mobility transistors. Astana, Kazakhstan, 2017.
192. Великовский Л.Э., Демченко О.И., Курбанова Н.Е. Влияние конструкции полевого электрода на распределение электрического поля в СВЧ GaN HEMT. Томск, ТУСУР, 2017.
193. Velikovskii L.E. et al. Ultrathin Barrier InAlN/GaN Heterostructures for HEMTs // Semiconductors. 2018. Vol. 52, № 14. P. 1843–1845.
194. Velikovskii L.E. et al. Ultrathin barrier InAlN/GaN heterostructures for HEMT. Minsk, Belarus, 2018.
195. Великовский Л.Э. et al. Микросхема для проведения DEC тестов при производстве InAlN/GaN HEMT: pat. 2019630196, 2019.