

На правах рукописи



Андрианов Николай Александрович

**ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ НЕМТ
ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ III-НИТРИДОВ**

01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена на кафедре физики плазмы Института физики нанотехнологий и телекоммуникаций Федерального Государственного Автономного Образовательного Учреждения Высшего Образования “Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого” (ФГАОУ ВО «СПбПУ») и АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург, Россия.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
профессор
Смирнов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: Астров Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Тимофеев Николай Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский Государственный Университет «СПбГУ»

Ведущая организация – ОАО «Авангард»

Защита состоится “13” декабря 2018 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 4, ауд. 305. С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”

Автореферат разослан “___” ноября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Доктор технических наук, профессор

Коротков Александр Станиславович



Общая характеристика работы

Актуальность исследования

Широкозонные полупроводниковые материалы, такие как нитрид галлия (GaN) и другие нитриды металлов третьей группы (III-нитриды) являются перспективными базовыми материалами для нового поколения электронных приборов. За прошедшую четверть века с момента появления первого полевого транзистора на кристалле GaN [1] большое развитие получили исследования и разработки в области силовой и СВЧ электроники на основе III-нитридов. Компонентная база на основе III-нитридов уже сейчас превосходит по своим характеристикам аналоги на основе кремния (Si), арсенида галлия (GaAs) и карбида кремния (SiC) [2]. Это обусловлено целым рядом уникальных физических свойств III-нитридов, таких как: высокая механическая прочность, термическая стабильность, высокая теплопроводность, химическая инертность, высокие напряжения пробоя и другие электрические свойства, связанные с большой шириной запрещенной зоны. Эти преимущества III-нитридов открыли также новые возможности в оптоэлектронике, которые привели к появлению светоизлучающих приборов, работающих в диапазоне от зеленой до ультрафиолетовой области спектра [3]. Экстраординарные свойства III-нитридов, и, в частности, свойства GaN, сделали этот материал ключевым для создания мощных, малошумящих и высокочастотных полупроводниковых приборов [4]. Пьезоэлектрическая и спонтанная поляризация, возникающая в GaN, приводит к образованию двумерного электронного газа (2DEG) высокой концентрации на гетерогранице AlGaN/GaN [5]. В результате полевые транзисторы с высокой подвижностью носителей в канале (HEMTs) на основе AlGaN/GaN оказываются способными обеспечивать существенно большие плотности тока чем другие HEMT на основе III-V материалов [2, 4].

Постростовая технология создания HEMT транзистора на основе AlGaN/GaN требует, в силу химической инертности материалов, использования плазменных методов травления и обработки поверхности для формирования топологии прибора и улучшения существующих характеристик транзистора [6]. Плазменное травление широко применяется в технологических маршрутах HEMT транзисторов на основе III-нитридов для формирования приборной топологии [7]. Следуют подчеркнуть, что существуют также и плазменные методы обработки поверхности, которые в отличие от традиционного травления (удаление материала), призваны модифицировать поверхностный химический состав полупроводниковых структур для улучшения эксплуатационных характеристик HEMT транзисторов. Энергии ионов, бомбардирующих структуру, в процессе плазменных обработок играют ключевую роль в процессах модификации поверхности с целью получения нужного поверхностного химического состава. Контроль энергии ионов при плазменных обработках необходим также для минимизации поверхностных повреждений GaN приборной структуры, что важно для достижения высоких эксплуатационных характеристик HEMT транзисторов.

Диагностические методы контроля спектра энергии ионов, бомбардирующих приборную структуру, такие как энергоанализаторы [8], оказываются крайне важны для оптимизации плазменных технологических процессов для НЕМТ транзисторов на основе III-нитридов.

Постановка задачи и цели работы

Целью работы явилось исследование и оптимизация плазменных процессов обработки поверхности НЕМТ структур на основе III-нитридов, а также разработка и создание планарного энергоанализатора для in-situ диагностики плазменных технологических режимов с целью их последующей оптимизации.

В соответствии с обозначенными целями работы были сформулированы следующие задачи:

1. Исследовать механизм влияния обработки поверхности верхнего GaN *cap*-слоя НЕМТ AlGaIn/GaN структуры в BCl_3 плазме на формирование омических контактов к структурам НЕМТ транзисторов на основе III-нитридов.
2. Изучить механизм воздействия плазмы газового разряда в среде SF_6 на поверхностные свойства и пробивные напряжения НЕМТ структур на основе III-нитридов.
3. Исследовать воздействие N_2 плазмы на DC характеристики НЕМТ транзистора на основе III-нитридов.
4. Разработать и создать с использованием методов микроэлектроники планарный энергоанализатор, способный работать непосредственно в плазменных реакторах без использования дополнительной дифференциальной откачки. Проверить работоспособность такого энергоанализатора.

Научная новизна и практическая значимость работы

1. Впервые экспериментально продемонстрировано, что плазменная обработка GaN *cap*-слоя НЕМТ структуры на основе AlGaIn/GaN в среде BCl_3 в ICP-режиме приводит к образованию полимерной пленки типа V_xCl_y на поверхности *cap*-слоя. Возникновение полимерной пленки V_xCl_y связано с тем, что при обработке *cap*-слоя GaN в ICP-режиме энергия ионов, бомбардирующих поверхность недостаточна для устранения V_xCl_y пленки и эффективного удаления поверхностного оксида в виде летучих соединений типа VOCl . Полимерная пленка V_xCl_y приводит к росту удельного контактного сопротивления по сравнению с необработанной в ICP-режиме частью полупроводниковой структуры.

2. Впервые показано, что обработка GaN *cap*-слоя в BCl_3 плазме с использованием ICP-RIE режима позволяет заметно снизить сопротивление омических контактов к AlGaIn/GaN НЕМТ структурам. Это связано с тем, что существует оптимальная величина напряжения автосмещения на подложке, равная 40 V, которая позволяет препятствовать образованию полимера V_xCl_y и эффективно удалять оксидную плену Ga_xO_y , и в тоже время обеспечивает

существенное снижение поверхностного потенциального барьера для транспорта электронов.

3. Экспериментально продемонстрирована ключевая роль напряжения смещения на подложке или, другими словами, средней энергии ионов, бомбардирующих поверхность верхнего GaN *cap*-слоя структуры при обработке в BCl_3 плазме в ICP-RIE режиме, в удалении поверхностной оксидной пленки и уменьшению поверхностного барьера за счет образования донорных вакансий азота, что в итоге приводит к уменьшению сопротивления омических контактов.

4. Показано, что при оптимальном напряжении смещения на подложке при обработке поверхности *cap*-слоя GaN в ICP-RIE режиме в среде BCl_3 не происходит образование полимерной пленки V_xCl_y . Это связано с тем, что при плазменной обработке с напряжением автосмещения на подложке больше либо равным 40 V происходит эффективное удаление полимера V_xCl_y за счет ионной бомбардировки.

5. Экспериментально установлен режим плазмохимической обработки в емкостном газовом разряде в среде SF_6 поверхности верхнего *cap*-слоя GaN НЕМТ-структур на основе AlGaIn/GaN, который приводит к существенному увеличению напряжения поверхностного пробоя AlGaIn/GaN НЕМТ структур. Увеличение напряжения поверхностного пробоя НЕМТ структур может быть связано с уменьшением плотности поверхностных состояний за счет замещения поверхностной оксидной пленки Ga_xO_y на пленку типа GaF_x .

6. Впервые экспериментально показано, что плазменная обработка поверхности GaN в емкостном газовом разряде в среде SF_6 приводит к образованию смешанной поверхностной полярности или даже инверсии поверхностной полярности GaN. Это может быть вызвано изменением поверхностного химического состава за счет встраивания фтора в приповерхностные слои GaN.

7. Экспериментальное исследование воздействия N_2 плазмы на DC характеристики НЕМТ транзистора на основе III-нитридов показало, что плазменная обработка на частоте возбуждения разряда 100 kHz приводит к существенному падению тока насыщения транзисторов, что связано со значительным падением подвижности носителей в канале полевого транзистора за счет образования кулоновских рассеивающих центров на поверхности.

8. Разработан и создан с использованием методов микроэлектроники планарный энергоанализатор способный работать непосредственно в плазменных реакторах без использования дополнительной дифференциальной откачки. А также проведена проверка работоспособности такого планарного энергоанализатора.

9. Разработанные технологические плазменные процессы обработки поверхности успешно апробированы и внедрены в реальные технологические маршруты создания НЕМТ транзисторов на основе III-нитридов.

Объекты и методы исследования

Основным объектом исследований являлась приборная структура AlGaIn/GaN НЕМТ полевого транзистора, выращенная методом молекулярно-пучковой эпитаксии на SiC подложке. Плазменные обработки GaN поверхности НЕМТ структур производились в средах BCl_3 , SF_6 и N_2 на универсальной плазменной установке с использованием как ICP, так и ICP-RIE режимов, а также в ряде случаев в условиях RIE емкостного разряда (ССР). Для определения спектра энергии ионов в емкостном газовом разряде в среде N_2 применялся стандартный энергоанализатор, работающий в камере с дифференциальной откачкой. Для контроля хода плазменных процессов использовалось также измерение оптических спектров излучения плазмы. Измерения электрических характеристик структур (сопротивления омических контактов, напряжений пробоя на тестовых контактах Шоттки, токов насыщения транзисторных структур) проводилось на зондовой электрической станции. Поверхностный химический состав образцов GaN НЕМТ структур до и после плазменных обработок определялся методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS).

Научные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

1. Плазменная обработка поверхности *cap*-слоя GaN НЕМТ структуры в режиме ICP в среде BCl_3 приводит к образованию на поверхности полимерной диэлектрической пленки типа V_xCl_y . Возникновение полимерной пленки V_xCl_y связано с тем, что при обработке *cap*-слоя GaN в ICP-режиме энергия ионов, бомбардирующих поверхность недостаточна для устранения V_xCl_y пленки и эффективного удаления поверхностного оксида в виде летучих соединений типа VOCl . Присутствие пленки V_xCl_y на поверхности *cap*-слоя является причиной возрастания сопротивления омических контактов к НЕМТ структурам на основе AlGaIn/GaN.
2. Существует оптимальная величина энергии ионов, бомбардирующих поверхность GaN *cap*-слоя НЕМТ структуры в режиме ICP-RIE обработки в BCl_3 плазме, которая препятствует образованию полимера V_xCl_y , позволяет эффективно удалять поверхностную оксидную пленку Ga_xO_y , и в тоже время не приводит к полному стравливанию *cap*-слоя, толщина которого составляет 20 Å. Такая обработка обеспечивает существенное снижение поверхностного потенциального барьера для транспорта электронов и дает возможность получить низкое сопротивление омических контактов.
3. Плазменная обработка поверхности верхнего GaN *cap*-слоя НЕМТ структур на основе AlGaIn/GaN в емкостном газовом разряде в среде SF_6 приводит к существенному увеличению напряжения поверхностного пробоя AlGaIn/GaN НЕМТ структур за счет модификации поверхностного химического состава путем замены поверхностного оксида на пленку типа GaF_x .
4. Плазменная обработка поверхности GaN в емкостном газовом разряде в среде SF_6 приводит к образованию смешанной поверхностной полярности или даже

инверсии поверхностной полярности GaN, что обусловлено встраиванием фтора в приповерхностные слои GaN.

5. Разработанный и созданный методами микроэлектроники и плазменного травления планарный энергоанализатор позволяет проводить измерения спектров энергий заряженных частиц непосредственно в технологических реакторах без использования камер с дифференциальной откачкой.

Достоверность научных результатов

Достоверность полученных результатов определяется использованием современных экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов, а также согласием полученных результатов с численными расчетами и существующими литературными данными.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: 8-ая Всероссийская конференция: Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы (Россия, Санкт-Петербург, 2011), IEEE 10th International Vacuum Electron Sources Conference, IVESC. (Россия, Санкт-Петербург, 2014), 10-ая Всероссийская конференция: Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы (Россия, Санкт-Петербург, 2015), 11-ая Всероссийская конференция: Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы (Россия, Москва, 2017), Семинар в АО «Светлана-Рост», 2016, Семинар на кафедре физики плазмы СПбПУ Петра Великого, 2016, Семинар в Corial SAS, Grenoble, France, 2017.

Научные публикации

По материалам диссертации представлены в 11 публикациях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах, в одной статье в энциклопедии, изданной издательством Taylor & Francis, в патенте на полезную модель, а также в материалах 4 Всероссийских конференций.

Личный вклад автора

Результаты, полученные в диссертационной работе, получены непосредственно автором. Автором исследовались и разрабатывались режимы плазменных обработок, технологические маршруты, а также проводились электрофизические измерения характеристик НЕМТ транзисторов на основе III-нитридов. Автором разработан и создан планарный энергоанализатор. Выбор общего направления исследования, постановка рассматриваемых задач, обсуждение и обработка полученных результатов осуществлялась автором совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем диссертации составляет 188 страниц, включая 92 рисунка, 6 таблиц и списка литературы из 218 наименований и 11 публикаций автора. Нумерация литературы и рисунков сквозная. Нумерация формул многоуровневая (привязана к номеру главы).

Содержание диссертационной работы

В **первой** главе (введении) представлены актуальность настоящей диссертационной работы, цели и поставленные задачи. Приведены результаты, представляющие научную новизну и практическую ценность. Здесь также сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность полученных результатов. Представлены данные об апробации диссертационной работы и список публикаций автора по теме диссертации, подчеркнут личный вклад автора. Во введении также кратко приведено содержание диссертации.

Во **второй** главе, которая представляет собой обзор литературы, описаны особенности кристаллической структуры III-нитридов, проблемы постростовой технологии HEMT транзистора на основе AlGaN/GaN, а именно, подробно описана проблема создания омического контакта, межприборной изоляции, формирования контактов Шоттки, а также пассивации приборной структуры. Приведен обзор плазменных методов травления, применяемых в технологии приборов на основе III-нитридов. Описан метод диагностики плазменных процессов при помощи энергоанализаторов, позволяющих измерять спектр энергии заряженных частиц, бомбардирующих приборную структуру. Сформулированы выводы и постановка задачи.

В **третьей** главе описаны используемые в работе экспериментальные методики и установки. Приведено подробное описание установки плазменного травления ICP-RIE, примененной в данной работе. Описана также установка плазменного осаждения тонких диэлектрических пленок с емкостным типом возбуждения газового разряда. Представлено описание установки емкостного газового разряда с интегрированным энергоанализатором. Далее приведено описание метода длинной линии (TLM) для определения сопротивления омических контактов, который применялся для характеристики структур. Представлено описание метода оптической эмиссионной спектроскопии плазмы (OES) и описан OES спектрометр, использованный в работе. Описан метод измерения токов насыщения HEMT транзисторов. Кроме того, приведено описание четырехсетеочного энергоанализатора, применяемого для определения функции распределения по энергиям заряженных частиц.

В **четвертой** главе представлены результаты исследования влияния обработки поверхности в BCl_3 плазме на формирование омических контактов к структурам HEMT транзисторов на основе III-нитридов. Экспериментально продемонстрировано, что плазменная обработка в среде BCl_3 перед

формированием омических контактов в ICP-режиме приводит к росту контактного сопротивления. Для выяснения причин роста контактного сопротивления был проведен анализ XPS спектров образцов AlGaN/GaN HEMT структур с *cap*-слоем GaN после плазменной обработки в ICP-режиме, который выявил наличие характерных пиков основных энергетических уровней (B1s, Cl2p) относительно большой интенсивности (см. на рис. 1б).

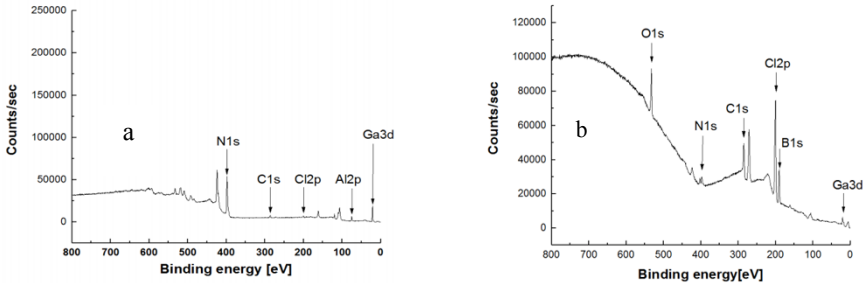


Рисунок 1: Обзорный XPS спектр образца с верхним *cap*-слоем GaN толщиной 20Å. а-необработанный образец, б-образец после обработки в плазме BCl₃

Наличие данных пиков свидетельствует об образовании диэлектрической пленки типа B_xCl_y на поверхности образца. Образование такой полимерной-диэлектрической пленки связано с тем, что энергия ионов при обработке в ICP-режиме (~10eV) недостаточна для препятствования росту полимера B_xCl_y (энергия связи ~3.08eV) на поверхности и эффективного удаления окисла Ga₂O₃ (энергия связи~2.95eV) в виде летучих соединений типа BOCl, что, в свою очередь, приводит к росту контактного сопротивления на HEMT структурах. На рисунках 2 и 3 приведены XPS спектры высокого разрешения для основного уровня B1s и основного уровня Cl2p, соответственно. Пик B1s с энергией связи 190.4 eV соответствует атому B связанному с Cl, а пик Cl2p с энергией связи 199.8 eV соответствует атому Cl, связанному с атомом B (см. рис. 2 и 3).

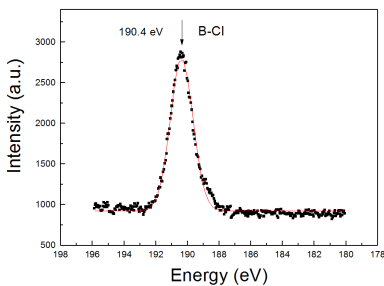


Рисунок 2: XPS спектр высокого разрешения уровня B1s верхнего GaN *cap*-слоя образца с верхним *cap*-слоем GaN толщиной 20Å после плазменной обработки в BCl₃

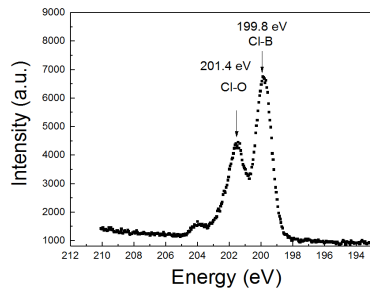


Рисунок 3: Спектр высокого разрешения уровня Cl2p верхнего GaN *cap*-слоя после плазменной обработки в BCl₃

Анализ XPS спектра высокого разрешения остоного уровня $V1s$ (рис. 2) демонстрирует образование химической связи с энергией 190.4 eV соответствующей соединению типа $V-Cl$ на поверхности. XPS спектр высокого разрешения остоного уровня $Cl2p$ демонстрирует линию с энергией 199.8 eV , которая соответствует химической связи $Cl-V$ (рис. 3). Важно, что линии $V1s$ нет, а линия $Cl2p$ крайне слабая в случае необработанного образца (см. рис. 1а). Линия 201.4 eV (рис. 3) обусловлена образованием химической связи $Cl-O$ на поверхности [9]. Образование химической связи $Cl-O$ может быть обусловлено взаимодействием хлора с остаточной поверхностной оксидной пленкой. Таким образом, можно сделать вывод об образовании полимерной пленки V_x-Cl_y на поверхности верхнего *cap*-слоя GaN структуры в результате плазменной обработки в BCl_3 плазме в ICP-режиме. Анализ корреляций в особенностях XPS спектров и результатов измерения контактного сопротивления позволил сделать вывод, что образованная диэлектрическая полимерная пленка V_x-Cl_y стала причиной роста контактного сопротивления.

Для эффективного удаления оксидной пленки и предотвращения роста полимера V_xCl_y на поверхности GaN применялся ICP-RIE режим плазменной обработки с независимой подачей ВЧ мощности, задающей величину автосмещения на подложке. Была установлена ключевая роль энергии ионов в процессе плазменной обработки в среде BCl_3 для получения низкого сопротивления омических контактов [A5]. Показано, что существует оптимальная величина автосмещения на подложке, определяющая среднюю энергию ионов, бомбардирующая поверхность GaN *cap*-слоя НЕМТ структуры в режиме ICP-RIE, которая позволяет эффективно удалять поверхностную оксидную пленку Ga_xO_y , препятствует образованию полимера V_xCl_y и в тоже время обеспечивает существенное снижение поверхностного потенциального барьера для транспорта электронов. На рис. 4 представлены XPS спектры, соответствующие потолку валентной зоны поверхности образцов GaN .

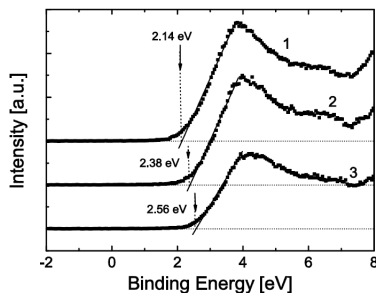


Рисунок 4: XPS спектры потолка валентной зоны. 1 – необработанный образец; 2 – обработка в BCl_3 плазме при напряжении смещения 20 V ; 3 – обработка при напряжении смещения 40 V . Спектры смещены по вертикали для ясности. Пунктирные линии соответствуют нулевому уровню XPS сигнала. Прямые линии – результат линейной экстраполяции низкоэнергетического края XPS спектров. Стрелки указывают точки пересечения уровня нулевого сигнала с результатом линейной экстраполяции XPS спектров

Энергия 0 eV на оси абсцисс соответствует энергетическому положению уровня Ферми (E_F) поверхности GaN. Энергетическое положение потолка валентной зоны (E_V) было определено (см. рис. 4) путем линейной экстраполяции низкоэнергетического края XPS спектра к нулевому уровню сигнала, аналогично методике, приведенной в [10]. Экспериментально определенная (см. рис. 4) величина $\Delta = E_F - E_V$ позволяет определить высоту поверхностного барьера (E_b), поскольку $E_b = E_c - E_F = E_g - \Delta$, где E_g – ширина запрещенной зоны, равная для GaN 3.4 eV. Как видно из рис. 4 обработка в BCl_3 плазме приводит к уменьшению поверхностного барьера. При этом обработка в режиме со средней энергией ионов равной 40 eV является наиболее эффективной, так как при этом понижение поверхностного барьера по сравнению с необработанным образцом достигает величины порядка 420 meV.

На рис. 5 представлено разложение XPS спектра уровня Ga3d на компоненты, отвечающие химическим связям Ga – N и Ga – O, используя свертку функций Гаусс-Лоренца. Как можно видеть, в результате обработки заметно уменьшается доля компоненты, отвечающей Ga – O связям.

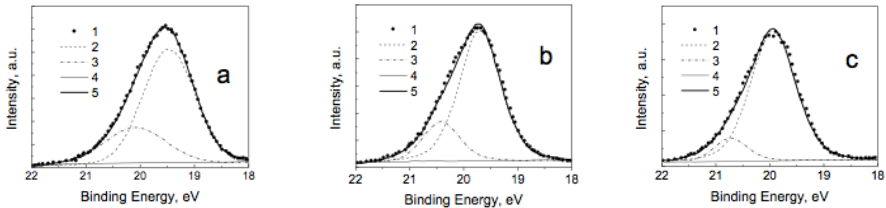


Рисунок 5: Разложение XPS спектра уровня Ga3d на компоненты, отвечающие химическим связям Ga – N и Ga – O с помощью свертки функций Гаусс-Лоренца. 1 – экспериментальный спектр; 2 – компонента Ga – N, полученная в результате разложения спектра; 3 – компонента Ga – O; 4 – фоновый XPS сигнал; 5 – полная аппроксимация экспериментального спектра. Здесь а – необработанный образец; б – образец после обработки в BCl_3 при напряжении смещения 20 V; с – образец после обработки в BCl_3 при напряжении смещения 40 V

Таким образом, при обработке в BCl_3 плазме происходит эффективное удаление окислов с поверхности GaN.

На рисунке 6 показано изменение отношения Ga/N в поверхностном слое, полученное из анализа XPS спектров высоко разрешения остовных уровней Ga3d и N1s. Как можно видеть из данного рисунка, в результате плазменной обработки происходит существенное уменьшение содержания азота на поверхности, т.е. определенно имеет место образование азотных вакансий. При этом наиболее насыщенная галлием поверхность образуется в результате обработки в режиме с напряжением смещения на подложке равным 40 V. Измерения показали, что при плазменной обработке с напряжением смещения 40 V достигается заметное снижение контактного сопротивления [A5].

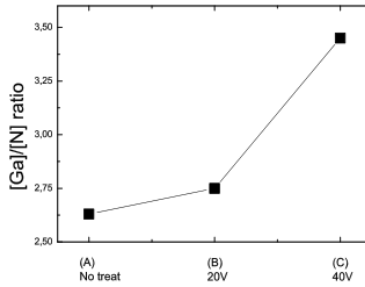


Рисунок 6: Отношение Ga/N, полученное из анализа XPS спектров уровней Ga3d и N1s, в зависимости от напряжения смещения при плазменной обработке

Суммируя данные, приведенные выше, можно сделать вывод о том, что, обработка поверхности структуры в BCl_3 плазме в ICP-RIE режиме с напряжением смещения на подложке равным 40 V (такое смещение соответствует энергии ионов порядка 40 eV) позволяет уменьшить поверхностный потенциальный барьер за счет образования донорных вакансий азота, эффективно удалять поверхностный окисел, препятствует образованию полимерной пленки типа BCL_x , что в итоге приводит к уменьшению сопротивления омических контактов.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования воздействия плазмы разряда в SF_6 на поверхностные свойства HEMT структур на основе III-нитридов. Показано, что плазменная обработка поверхности верхнего GaN *cap*-слоя HEMT структур на основе AlGaIn/GaN в емкостном газовом разряде в среде SF_6 приводит к существенному увеличению напряжения поверхностного пробоя AlGaIn/GaN HEMT структур [A6]. Рис. 7 демонстрирует изменение напряжение пробоя между тестовыми металлическими контактами, произошедшее в результате указанной плазменной обработки.

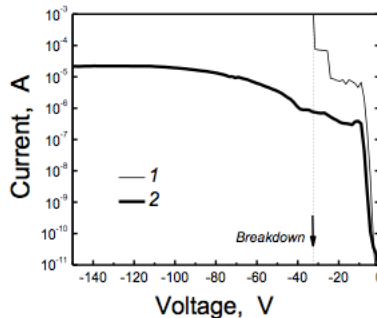


Рисунок 7: Типичная Вольтамперная характеристика тестового элемента с металлическими контактами Ni/Au без (1) и после (2) плазмохимической обработки в SF_6

Видно, что в результате плазмохимической обработки в газовом разряде SF_6 пробивное напряжение возросло с 32 В на необработанной части структуры до, как минимум, 150 В на обработанной в разряде SF_6 части структуры.

На рисунке 8 представлено разложение XPS спектра остоного уровня $\text{Ga}3d$ на компоненты, отвечающие химическим связям на поверхности. Рисунок 8b показывает XPS спектры, соответствующие образцу после обработки в плазме SF_6 . Видно, что XPS-линия остоного энергетического уровня $\text{Ga}3d$ приобрела сильную асимметрию в результате плазменной обработки, что мы связываем с замещением оксида галлия на фторид галлия (GaF_3). Здесь (рис. 8b) также представлено разложение уровня $\text{Ga}3d$ на химические связи Ga-N и Ga-F . Можно видеть, что пик Ga-F возрос после обработки. Это означает, что произошло замещение атомов кислорода атомами фтора с образованием более прочной химической связи.

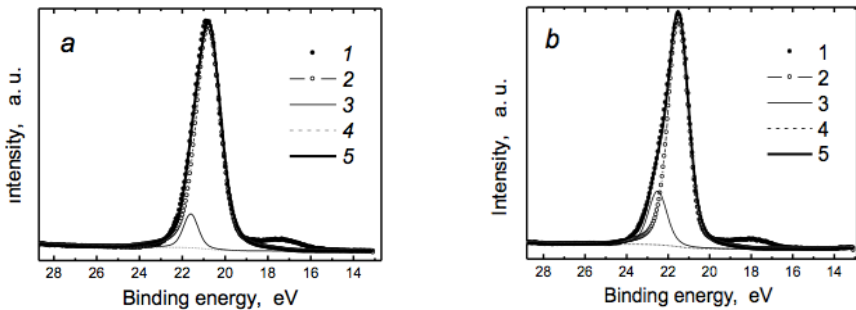


Рисунок 8: а - Разложение XPS-спектра уровня $\text{Ga}3d$ на компоненты, отвечающие химическим связям Ga-N и Ga-O , с помощью свертки функций Гаусс-Лоренца для необработанного образца; 1 — экспериментальный спектр, 2 — компонента Ga-N , полученная в результате разложения спектра, 3 — компонента Ga-O , 4 — фоновый XPS-сигнал, 5 — полная аппроксимация экспериментального спектра. б - Разложение XPS-спектра на компоненты, отвечающие химическим связям Ga-N и Ga-F , с помощью свертки функций Гаусс-Лоренца для образца обработанного в плазме SF_6 ; 1 — экспериментальный спектр, 2 — компонента Ga-N , 3 — компонента Ga-F , 4 — фоновый XPS-сигнал, 5 — полная аппроксимация экспериментального спектра

Анализ XPS спектров потолка валентной зоны (см. рис. 9) показал, что плазменная обработка поверхности GaN верхнего *cap*-слоя НЕМТ структуры в емкостном газовом разряде в среде SF_6 приводит к образованию смешанной поверхностной полярности или даже инверсии поверхностной полярности GaN , что проявляется, согласно опубликованным данным [10, 11], в изменении соотношения амплитуд пиков PI (~5 eV) и ПII (~10 eV) в XPS спектрах, потолка валентной зоны. Соотношение амплитуд таких пиков коррелирует с полярностью поверхности: преобладание пика PI отвечает Ga -полярной поверхности у слоев GaN , в то время как преобладание ПII отвечает N -полярной поверхности [10, 11].

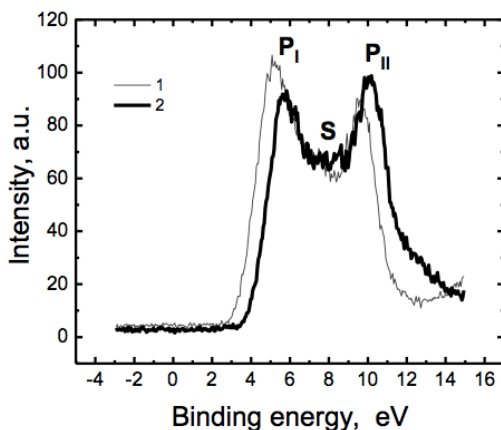


Рисунок 9: 1 — XPS спектр потолка валентной зоны структуры без плазмохимической обработки; 2 — XPS-спектр потолка валентной зоны структуры после плазмохимической обработки в газовом разряде SF₆

Таким образом, встраивание фтора в поверхность *cap*-слоя НЕМТ структуры приводит к замене оксида галлия на более прочную химическую связь фторида галлия. Увеличение поверхностного пробоя НЕМТ структур может быть связано с уменьшением плотности поверхностных состояний за счет замещения поверхностной оксидной пленки типа Ga_xO_y на более прочную пленку типа GaF_x. Анализ профиля потолка валентной зоны показал, что в результате плазменной обработки в разряде SF₆ имеют место эффекты, аналогичные образованию смешанной поверхностной полярности или даже инверсии полярности *cap*-слоя GaN.

В шестой главе представлены результаты экспериментального исследования воздействия N₂ плазмы на DC характеристики НЕМТ транзистора на основе III-нитридов. Анализ изменения токов насыщения показал, что уменьшение частоты ВЧ генератора с 13,56 MHz до 100 kHz приводит к катастрофическому падению тока насыщения (до пяти раз [A8]). С помощью стандартного энергоанализатора [8] были проведены измерения спектра энергии ионов в разряде азота при различных частотах плазменного ВЧ генератора [A9]. Экспериментально продемонстрировано, что во время плазменной обработки на частоте 13,56 MHz максимальная энергия ионов не превышает значения 40 eV. Напротив, с понижением частоты возникает высокоэнергичная часть спектра, и при частоте генератора 440 kHz энергии ионов могут достигать значений порядка 200 eV. Падение токов насыщения транзистора в результате плазменной обработки высокоэнергетичными ионами может быть связано с образованием на поверхности GaN *cap*-слоя транзисторной структуры зарядовых центров (зарядов, связанных с поверхностными состояниями), которые приводят к дополнительному кулоновскому рассеянию носителей в 2DEG канале, что в свою

очередь приводит к падению тока насыщения приборов. Значительное падение подвижности электронов в 2DEG канале транзистора после воздействия N_2 плазмы было подтверждено экспериментально [A9].

В **седьмой** главе подробно описана разработанная технология создания миниатюрного (планарного) энергоанализатора на кремниевой основе с шестигранными ячейками сеток [A10] с привлечением методов микроэлектронной технологии, а именно фотолитографии и плазменного травления [A11]. Такой планарный энергоанализатор позволяет проводить измерение спектра энергий заряженных частиц непосредственно в плазменном реакторе, без использования дополнительной камеры с дифференциальной откачкой. Была произведена проверка работоспособности такого миниатюрного энергоанализатора. В работе также представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования влияния элементов конструкции на величину уширения энергетического спектра заряженных частиц в четырехсеточных энергоанализаторах для случаев измерения функции распределения ионов по энергиям, движущихся в слое высокочастотного емкостного разряда без столкновений с нейтральными частицами газа. Приведены зависимости уширения от величины напряжения, от расстояния между сетками и от размера ячеек анализирующей сетки. Показаны пути оптимизации характеристик прибора.

В **заключении** сформулированы основные результаты данной диссертационной работы:

1. Проведено исследование механизма влияния обработки поверхности в BCl_3 плазме на формирование омических контактов к структурам НЕМТ транзисторов на основе III-нитридов.
2. Экспериментально продемонстрировано, что плазменная обработка в среде BCl_3 в ICP-режиме приводит к образованию полимерной пленки типа B_xCl_y на GaN поверхности верхнего *cap*-слоя НЕМТ структуры. Эта полимерная пленка приводит к росту удельного контактного сопротивления по сравнению с необработанной в ICP-режиме частью полупроводниковой структуры.
3. Установлен режим обработки в BCl_3 плазме, позволяющий заметно снизить сопротивление омических контактов на AlGaIn/GaN НЕМТ структуре. Экспериментально продемонстрирована ключевая роль напряжения смещения на подложке или, другими словами, средней энергии ионов, бомбардирующих поверхность верхнего GaN *cap* – слоя структуры. Установлено, что обработка поверхности структуры в BCl_3 плазме в ICP-RIE режиме с напряжением смещения на подложке равным 40 В позволяет уменьшить поверхностный потенциальный барьер за счет образования донорных вакансий азота и эффективно удалять поверхностный окисел, что в итоге приводит к уменьшению сопротивления омических контактов.

4. Экспериментально установлен режим пост-ростовой обработки НЕМТ структур в оптимизированном ICP-RIE режиме в газовом разряде BCl_3 позволяющий эффективно удалять с поверхности GaN сорбированные соединения и оксидную пленку.
5. Экспериментально установлен режим плазмохимической обработки в емкостном газовом разряде в среде SF_6 поверхности верхнего *cap*-слоя GaN НЕМТ-структур на основе AlGaIn/GaN, который приводит к существенному увеличению напряжения поверхностного пробоя AlGaIn/GaN НЕМТ структур.
6. Экспериментально установлено, что плазменная обработка поверхности GaN в емкостном газовом разряде в среде SF_6 приводит к образованию смешанной поверхностной полярности или даже инверсии поверхностной полярности GaN.
7. Экспериментальное исследование воздействия N_2 плазмы на DC характеристики НЕМТ транзистора на основе III-нитридов показало, что плазменная обработка на частоте возбуждения разряда 100 kHz приводит к значительному падению тока насыщения транзисторов (в условиях проведенных опытов до 5 раз), что связано со значительным уменьшением подвижности двумерных электронов в канале транзистора в результате ионной бомбардировки при плазменной обработке.
8. Разработан и создан с использованием методов микроэлектроники планарный энергоанализатор способный работать непосредственно в плазменных реакторах без использования дополнительной дифференциальной откачки. А также проведена проверка работоспособности такого планарного энергоанализатора.
9. Разработанные технологические плазменные процессы обработки поверхности успешно апробированы и внедрены в реальные технологические маршруты создания НЕМТ транзисторов на основе III-нитридов.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах

- A1. **Андрианов, Н.А.** Формирование оптимального омического контакта к слою двумерных электронов на гетерогранице AlGaIn/GaN с использованием плазменного RIE травления / **Н.А. Андрианов**, А.Г. Ткаченко, А.А. Лапшин // 8-ая Всероссийская конференция: Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. – 2011. – P. 143.
- A2. Kobelev, A.A. BCl_3 plasma treatment effect on ohmic contact resistance in GaN-based mobility transistors / A.A. Kobelev, A.S. Smirnov, Y.V. Barsukov, **N.A. Andrianov** // IEEE IVESC. – 2014. – P. 1-2.
- A3. Kobelev, A.A. Encyclopedia of Plasma Technology: Boron Trichloride Dry Etching / A. Kobelev, **N. Andrianov**, Y. Barsukov, A. Smirnov. – London: Taylor & Francis. – 2017. – P. 193-202.

- A4. Kobelev, A.A. Boron trichloride plasma treatment effect on ohmic contact resistance formed on GaN-based epitaxial structure / A.A. Kobelev, Yu.V. Barsukov, **N.A. Andrianov**, A.S. Smirnov // J. Phys. Conf. Ser. – 2015. – Vol. 565. – P. 1-4.
- A5. **Андреианов, Н.А.** Влияние обработки поверхности в BCl_3 плазме на формирование омических контактов к структурам AlGaIn/GaN / **Н.А. Андреианов**, А.А. Кобелев, А.С. Смирнов, Ю.В. Барсуков, Ю.М. Жуков // ЖТФ. – 2017. – Том 87, вып. 3. – С. 413-418.
- A6. **Андреианов, Н.А.** Исследование воздействия плазмы SF_6 поверхность НЕМТ-структур на основе GaN / **Н.А. Андреианов**, Н.Е. Блинов, А.С. Гаврилов, А.С. Смирнов, П.А. Сомов, С.Ф. Мусихин, С.В. Кокин, Д.М. Красовицкий // Успехи прикладной физики. – 2017. – Том 5, вып. 4. – С. 335-340.
- A7. Красовицкий, Д.М. развитие стандартных технологий III-нитридов в ЗАО “Светлана-Рост” / Д.М. Красовицкий, **Н.А. Андреианов**, А.Л. Дудин, С.В. Кокин, Н.И. Кацавец, А.Г. Филаретов, В.П. Чалый // 11-ая Всероссийская конференция Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. – 2017. – С. 38.
- A8. **Андреианов, Н.А.** Воздействие N_2 плазмы на свойства НЕМТ на основе AlGaIn/GaN / **Н.А. Андреианов**, Е.В. Вознюк, С.В. Кокин // 10-ая Всероссийская конференция: Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. – 2015. – С. 136.
- A9. **Андреианов, Н.А.** Роль энергии ионов в воздействии N_2 плазмы на DC характеристики НЕМТ на основе III-нитридов / **Н.А. Андреианов**, П.А. Панкратьев, А.С. Смирнов // Прикладная физика. – 2018. – С. (Принята в печать).
- A10. Анализатор потока и энергии заряженных частиц / Мухин Е.Е., **Андреианов Н.А.** [и др.] // Патент на полезную модель РФ. – 2012. – № 119519
- A11. А.А. Кобелев. Многосеточные энергоанализаторы задерживающего потенциала для измерения функции распределения ионов по энергиям из плазмы высокочастотного емкостного разряда / А.А. Кобелев, **Н.А. Андреианов**, Е.М. Хилькевич, Т.В. Черноюзомская, А.С. Смирнов // Успехи прикладной физики. – 2017. – Том 5, вып. 6. – С. 608-617.

Цитированная литература

1. Khan, M.A. Metal Semiconductor Field Effect Transistor on a single crystal GaN / M.A. Khan, J.N. Kuznia, A. Bhattarai and D.T. Olson // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 62, no. 5. – P. 1786-1787.
2. Mishra, U.K. AlGaIn/GaN HEMTs: AN overview of device operation and applications / U.K. Mishra, P. Parikh, Y. Wu // Proceedings of the IEEE. – 2002. – Vol. 90. – P. 1022-1031.
3. Ponce, F.A. Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices / F.A. Ponce, D.P. Bour // Nature. – 1997. – Vol. 386. – P. 351-359.
4. Pearton, S.J. Fabrication and performance of GaN electronic devices / S.J. Pearton, F. Ren, A.P. Zhang, K.P. Lee // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2000. – Vol. 30, no. 3-6. – P. 55-122.
5. Amacher, O. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN

- heterostructures / O. Ambacher, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W.J. Schaff, L.F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger, J. Hilsenbeck // *J. of Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 85, no. 6. – P. 3222-3233.
6. Mi, M. Millimeter-Wave Power AlGaIn/GaN HEMT Using Surface Plasma Treatment of Access Region / M. Mi, X.H. Ma, L. Yang, Y. Lu, B. Hou, J. Zhu, M. Zhang, H.S. Zhang, Q. Zhu, L.A. Yang // *IEEE transactions on Electron Devices.* – 2017. – Vol. 64, no. 12. – P. 4875-4881.
 7. Kodera, M. Impact of Plasma-Damage-Layer Removal on GaN HEMT Devices / M. Kodera, A. Yoshioka, T., Sugiyama, T., Ohguro, T. Hamamoto, T. Kawamoto, T., Yamanaka, Z. Xinyu, S. Lester, N. Miyashita // *Phys. Status Solidi A.* – 2017. – Vol. 1700633. – P. 1-6.
 8. Абрамов, А.С. Исследование ионной бомбардировки пленок аморфного кремния в процессе плазмохимического осаждения в высокочастотном разряде / А.С. Абрамов, А.Я. Виноградов, А.И. Косарев, А.С. Смирнов, К.Е. Оролов, М.В. Шутов // *ЖТФ.* – 1998 – Т. 68, вып. 2. – С. 47-53.
 9. Sangauer, E. Etching mechanisms of HfO₂, SiO₂ and poly-Si substrates in BC13 plasmas / E. Sangauer, E. Pargon, X. Mellhaoui, R. Ramos, G. Cunge, L. Vallier, O. Joubert, T. Lill // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2007. – Vol. 25, no. 5. – P. 1640-1646.
 10. Higashiwaki, M. Effects of oxidation on surface chemical states and barrier height of AlGaIn/GaN heterostructures / M. Higashiwaki, S. Chowdhury, B.L. Swenson, U.K. Mishra // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 97. – P. 1-3.
 11. Mishra, M. Surface chemistry and electronic structure of nonpolar and polar GaN films / M., Mishra, S. Krishna, N. Aggarwal, G. Gupta // *Appl. Surface Science.* 2015. – Vol. 345. – P. 440-447.