Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Васильев Антон Андреевич

Глубокие центры в оксиде галлия различных полиморфов

Специальность 1.3.11 —
«Физика полупроводников»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор
Поляков Александр Яковлевич

Москва — 2025

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Классические полупроводниковые материалы, такие как кремний (Si) и германий (Ge), традиционно использовались в силовых устройствах, включая выпрямители и транзисторы, благодаря их технологической и экономической доступности. Однако ограничения по максимально выдерживаемым напряженностям электрических полей и достаточно низким температурам работы устройств, присущие Si и Ge, стимулировали поиск альтернатив, способных удовлетворить возросшие требования к характеристикам, надежности и эффективности силовых компонентов [1; 2].

Развитие технологий и глобальный рост энергетического сектора, аэрокосмической и автомобильной промышленности сыграли ключевую роль в переходе к материалам с улучшенными рабочими характеристиками. В этом контексте, в 1980 — начале 1990-х годов, широкозонные полупроводники, такие как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC), привлекли значительное внимание исследователей и инженеров как альтернатива [1; 3; 4], которая с начала 2010-х годов начала вытеснять кремниевую силовую электронику, особенно в областях, связанных с преобразованием постоянного и переменного тока, инверторами и импульсными источниками питания [1; 3; 4].

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области силовой электроники за счет перехода на широкозонные материалы, исследовательское сообщество продолжает поиски материалов с еще более высокими предельными характеристиками. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных кандидатов для следующего поколения силовых устройств, наряду с нитридом алюминия (AlN) и алмазом (C), считается оксид галлия (β-Ga_2O_3), представляющий собой ультраширокозонный полупроводник.

Ключевым фактором, определяющим интерес к Ga_2O_3, является его крайне высокое значение пробивного поля – 8 МВ/см [5], что в 2-3 раза выше, чем у GaN и SiC. Это напрямую отражается на основных характеристиках: выпрямители и транзисторные структуры на Ga_2O_3 уже сейчас превосходят аналогичные устройства на GaN и SiC по передаваемой мощности и пробивным напряжениям. Кроме того, Ga_2O_3 обладает преимуществом с точки зрения технологии получения объемных монокристаллов, что открывает путь к потенциальному снижению себестоимости подложек и, соответственно, к удешевлению всей технологии [5].

Также бинарный Ga_2O_3 проявляет полиморфизм, и на данный момент, помимо наиболее изученного стабильного β-полиморфа, потенциальный интерес представляют метастабильные: α-полиморф с симметрией корунда [6], который возможно выращивать на дешевых сапфировых подложках, что позволит еще сильнее снизить себестоимость технологии устройств на

Ga_2O_3 [7]; κ-полиморф, сегнетоэлектрик [8], который может быть использован в транзисторных структурах с поляризационным легированием [9]; γ-полиморф, кубическая фаза с высокой концентрацией стехиометрических вакансий и высокой теоретической радиационной стойкостью [10].

Решение проблем технологии и изучения свойств дефектов в GaN и SiC начиналось в 1980-х годах, и только спустя 30-40 лет началась коммерциализация устройств на основе этих материалов. Сейчас на аналогичной стадии находится и Ga_2O_3, и результаты исследований должны либо подтвердить перспективность данного материала, либо определить ключевые проблемы технологии. На текущий момент ключевыми проблемами являются отсутствие легирования p-типа из-за отсутствия мелких акцепторов и низкая теплопроводность Ga_2O_3. Тем не менее первая проблема решается созданием гетеропереходов с p-тип оксидами (NiO, PtO_2 и др.) [11], а проблемы с отводом тепла возможно удастся решить с помощью технологии flip-chip [11].

Но прежде чем решать проблемы приборов, необходимо уделить особое внимание вопросу дефектообразования и глубоких уровней, которые оказывают критическое влияние на характеристики материалов: уровень легирования и его компенсация, дефектообразование при имплантации, влияние на времена жизни носителей заряда и их диффузионные длины. Все это, в свою очередь, будет отражаться на характеристиках приборов: коллапс тока в транзисторах, долгие времена восстановления обратного тока в диодах и долгие времена нарастания и спада фототока в фотодетекторах.

Несмотря на большой опыт научного сообщества в изучении свойств точечных дефектов в полупроводниковых материалах предыдущего поколения, для Ga_2O_3 и его полиморфов эта проблема стоит особенно остро. Исследователи впервые сталкиваются с изучением свойств дефектов в бинарном материале с такой низкой (моноклинной) сингонией [5]. Это означает, что одних только неэквивалентных вакансий в материале будет пять ($2V_{Ga}+3V_O$) [12], не говоря уже о их комплексах с другими собственными и посторонними дефектами. Тем не менее появляются современные DFT+U подходы, которые лучше справляются с предсказанием свойств дефектов и создаваемых ими глубоких уровней [13].

Такие трудности с точечными дефектами и изучением их свойств выводят на передний план важность экспериментальных методов исследования глубоких уровней в материалах, особенно на начальных этапах становления технологии Ga_2O_3. Это означает, что исследования электрических и оптических свойств глубоких уровней необходимо проводить для кристаллов и пленок в широком диапазоне легирования и компенсации, изучать их свойства после различных облучений и обработок, исследовать пленки, выращенные различными методиками. Это необходимо для установления природы дефектов, создающих глубокие уровни (ГУ), и для понимания их влияния на свойства материалов и приборов.

Таким образом, несмотря на уникальные физические параметры и технологические перспективы, коммерциализация силовой и солнечно-слепой электроники на Ga_2O_3 и его полиморфах требует решения фундаментальных задач, связанных с поисковыми исследованиями дефектов и глубоких уровней, влиянием ГУ на электрооптические параметры материала и характеристики приборов. Необходимость таких исследований диктуется перспективностью Ga_2O_3 в динамически развивающейся области силовой и оптоэлектроники.

Исследования в рамках диссертационной работы были проведены на кафедре «Полупроводниковой электроники и физики полупроводников» в лаборатории «Ультраширокозонных полупроводников» на базе НИТУ МИСИС, в рамках исполнения обязательств по следующим проектам:

1. грант Мин. науки и высшего образования № 075-15-2022-1113 «Новые радиационные явления в оксиде галлия и их применение в радиационных приборах» (2022-2024 гг.);
2. грант РНФ № 19-19-00409 «Исследование электрически активных точечных и протяженных дефектов в новом широкозонном полупроводнике α- и β-Ga_2O_3, гетероструктурах и мембранах на их основе» (2019-2021 гг.);
3. грант НИТУ МИСИС № К2А-2018-051 «Исследование электрических характеристик и спектров глубоких центров в кристаллах и эпитаксиальных пленках Ga_2O_3, влияющих на характеристики приборных структур» (2018-2020 гг.).

Целью данной работы является изучение и систематизация знаний об электрически активных дефектах, формирующих глубокие центры в полиморфах Ga_2O_3, а также анализ их влияния на характеристики приборов. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Определить применимость методов исследования глубоких уровней в контексте широкозонных материалов.
2. Изучить природу глубоких центров в различных полиморфах Ga_2O_3.
3. Исследовать влияние глубоких уровней на электрические, оптические и рекомбинационные свойства β-, α-, κ- и γ-полиморфа Ga_2O_3.
4. Оценить влияние условий роста, легирования и внешних факторов (например, радиационного облучения, обработки в водородной плазме) на формирование глубоких центров и их свойства.
5. Исследовать влияние глубоких уровней на характеристики ключевых приборных структур, таких как диоды Шоттки, транзисторные структуры и фотодетекторы, на основе Ga_2O_3.

Научная новизна:

1. Впервые получены данные о свойствах (энергии активации, сечения захвата и концентрации) глубоких уровней в α-, κ- и γ-полиморфах Ga_2O_3.
2. Исследования показали, что радиационная стабильность гетеропереходов NiO/β-Ga_2O_3 ниже, чем у Ni/β-Ga_2O_3 барьеров Шоттки.
3. Созданные барьеры Шоттки Ni/γ-Ga_2O_3 продемонстрировали высокую радиационню стабильность при облучении 1,1 МэВ протонами с флюенсом $2 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$. Коэффициент выпрямления после облучения для Ni/γ-Ga_2O_3 увеличился с $1{,}6 \cdot 10^2$ до $1{,}2 \cdot 10^3$, в то время как для β-Ga_2O_3 выпрямление полностью исчезло.
4. Определен глубокий уровень, ответственный за величину коллапса тока в 23 % в полевых транзисторах на основе отщепленных нанопленок, от объемного β-Ga_2O_3. Уменьшение концентрации дефекта, связанного с акцепторной примесью железа, приведет к уменьшению эффекта коллапса тока.
5. Предложенная в работе феноменологическая модель объясняет эффект аномально высокой фотопроводимости, а также описывает медленные процессы нарастания и спада фототока в образце фотодетектора на основе α-Ga_2O_3. Эта модель может способствовать лучшему пониманию физических процессов в солнечно-слепых фотодетекторах на основе Ga_2O_3.

Практическая значимость данной работы заключается в возможности применения ее результатов для разработки и оптимизации силовых и оптоэлектронных приборов на основе Ga_2O_3:

1. Несмотря на относительно низкую радиационную стабильность гетеропереходов NiO/β-Ga_2O_3, выпрямители на их основе показали значительно более высокие пробивные напряжения (750 В), чем у выпрямителей на основе барьеров Шоттки Ni/β-Ga_2O_3 (450 В), что делает их применение перспективными в силовой электронике в условиях низкого ионизирующего воздействия.
2. Полученные барьеры Шоттки на основе γ-Ga_2O_3 обладают высокой радиационной стабильностью и потенциально могут быть использованы в условиях, предполагающих воздействие значительных потоков высокоэнергетических частиц, как тех, что встречаются в космосе или в ядерных реакторах.
3. Солнечно-слепые фотодетекторы на основе α-Ga_2O_3 обладают аномально высокими фоточувствительностями и потенциально могут быть использованы в УФ-фотонике, при решении проблем с долгими временами нарастания и спада фотосигнала.

Методология и методы исследования. В данной работе использовались результаты методов рентгеноструктурного анализа в высоком

разрешении для индетификации полиморфов. Для изучения основных электрических параметров выращенных структур применялись стандартные методы исследования п/п структур (ВАХ, ВФХ и т.д.) и методов для изучения глубоких центров, (спектроскопия адмиттанса, РСГУ, Токовый-РСГУ, метод фотоемкости и т.д.). Были учтены особенности применения данных методик в контексте широкозонных полупроводников.

Облучения материалов и приборов были проведены на базе Объединенного института ядерных исследований (НИИ ОИЯИ, Дубна, Россия).

Коммерческие образцы β-Ga_2O_3, использованные в данной работе, были приобретены у «Novel Crystals» и у группы В.И. Николаева из ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Пленки эпитаксиального α- и κ-Ga_2O_3 также были получены у группы В.И. Николаева. Образцы γ-полиморфа были получены в результате совместной научной деятельности с университетом Осло. Транзисторная структура на β-Ga_2O_3 была получена у группы проф. Джихен Кима из Сеульского национального университета.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выпрямители на основе гетеропереходов NiO/β-Ga_2O_3, в сравнении с Ni/β-Ga_2O_3 барьерами Шоттки, демонстрируют более высокие пробивные напряжения (750 В против 450 В), но более низкую радиационную стабильность, выраженную в уменьшении коэффициента выпрямления $9{,}2 \cdot 10^8 \rightarrow 1{,}8 \cdot 10^6$ для гетероперехода и отсутствии изменений $10^{10} \rightarrow 10^{10}$ для барьера Шоттки до и после облучения 1,1 МэВ протонами с флюенсом $2 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$. Высокие пробивные напряжения гетеропереходов относительно барьеров Шоттки обусловлены оттеснением области высоких полей от поверхности образца и частичной функцией p-NiO как полевой платы. Низкая радиационная стабильность гетеропереходов обусловлена ростом последовательного сопротивления, связанного с ростом сопротивления p-NiO. Сопротивление этих слоев восстанавливается при отжиге 673 К в течении 30 минут.
2. Барьеры Шоттки, полученные на проводящих слоях γ-Ga_2O_3 обладают высокой радиационной стабильностью, в сравнении с Ni/β-Ga_2O_3 барьерами Шоттки. Так, облучение протонами с энергией 1,1 МэВ и флюенсом $2 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ приводит к полной потере выпрямления в диоде Шоттки на Ni/β-Ga_2O_3 (коэффициент выпрямления упал $6{,}7 \cdot 10^6 \rightarrow 0$), а для Ni/γ-$Ga_2O_3$ коэффициент выпрямления вырос с $1{,}6 \cdot 10^2 \rightarrow 1{,}2 \cdot 10^3$. Наблюдаемый рост коэффициента выпрямлениия для Ni/γ-Ga_2O_3 обусловлен уменьшением последовательного сопротивления, связаного с введением облучением дополнительных н.з. со скоростями введения $R_c = 5{,}6 \cdot 10^{-3}$ см$^{-1}$. Исчезновение выпрямления в Ni/β-Ga_2O_3 обусловлено полной компенсацией облучением слоев β-Ga_2O_3.

3. Установлено сильное влияние глубоких уровней E2 на эффект коллапса тока в полевых транзисторах на основе нанопленок β-Ga_2O_3, выращенных методом Степанова. Данные уровни связанны с дефектом Fe_{Ga2} и ответственны за наблюдаемый коллапс тока порядка 20 % в таком транзисторе на основе нанопленок отщепленных от объемного материала, выращенного методом Степанова.
4. Эффект высокой фоточувствительности в исследуемом фотодетекторе на основе α-Ga_2O_3 достигается механизмом рециклинга за счет эффективного увеличения времени жизни электронов вследствие прилипания дырок на глубоких акцепторных уровнях. Долгие времена нарастания фототока связаны с временами заполнения уровней прилипания, а долгие времена спада фототока освобождением носителей с центров прилипания.

Достоверность полученных результатов роста полиморфов обеспечивается использованием данных рентгеноструктурного анализа в высоком разрешении, выполненного при участии профильных специалистов. Результатов спектроскопии дефектов в материалах обеспечена использованием широкого спектра комплементарных методик (емкостных и токовых методов с оптическим и с электрическим заполнением). Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими научными группами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Observation of Temperature-Dependent Capture Cross-Section for Main Deep-Levels in β-Ga_2O_3 / **A. A. Vasilev**, A.I. Kochkova, A.Y. Polyakov, A.A. Romanov, N.R. Matros, L.A. Alexanyan, I.V. Shchemerov, S. J. Pearton // The 11th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS 2024). — 2024.
2. Определение температурной зависимости сечения захвата на глубокие уровни в β-Ga_2O_3 / **А. Васильев**, А. Кочкова, А. Поляков, А. Романов, Н. Матрос, Л. Алексанян, И. Щемеров, С. Пиртон // XVI Российская конференция по физике полупроводников (РКФП-XVI). — 2024.
3. Effect of 1 MeV Protons Irradiation on Electrical Properties of 80-μm-thick κ-Ga_2O_3 Film Grown by HVPE on GaN/SapphireTemplate / A.Polyakov, V.Nikolaev, A.Pechnikov, E.Yakimov, I.Shchemerov, **A. Vasilev**, A. Kochkova, A. Chernykh, I.-H. Lee, S. Pearton // Compound Semiconductor Week 2023 (CSW 2023). — 2023.
4. Thick κ(ε)-Ga_2O_3 Sn-doped Films Prepared by HVPE on GaN/Sapphire Templates and by ELOG on Sapphire / V. Nikolaev, A. Polyakov, I.-H. Lee, A. Pechnikov, A. Chikiryaka, M. Sheglov, A. Kochkova, **A. Vasilev**, I. Shchemerov, S. Pearton // Compound Semiconductor Week 2023 (CSW 2023). — 2023.

Личный вклад. Автором самостоятельно был выполнен цикл исследований глубоких уровней в различных полиморфах Ga_2O_3, включая планирование экспериментов, проведение измерений и анализ полученных данных, написание и публикация научных статей, представление докладов на конференциях по результатам исследований. Кроме того, автор разработал алгоритмы для реализации Лаплас РСГУ, предложил подход к анализу профилей концентрации глубоких уровней, а также разработал модель для определения параметров температурной зависимости сечения захвата носителей на глубокие уровни в рамках модели многофононной эмиссии. Были написаны программы для реализации некоторых методик измерений, права на данные программы охраняются свидетельством о регистрации программ для ЭВМ.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 28 публикациях, 24 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 4 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 5 программ для ЭВМ.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературы по теме диссертационной работы. В главе затрагиваются вопросы полиморфизма Ga_2O_3. Стабильный полиморф β-Ga_2O_3 кристаллизуется с низкой симметрией в C2/m пространственной группе. На данном полиморфе продемонстрирован высокий уровень следующих приборов: барьеры Шоттки [11; 14], гетеропереходы с p-тип оксидами [15], транзисторы [16] и солнечно-слепые фотодетекторы [A1]. α-Ga_2O_3 – метастабильный полиморф со структурой типа корунда, представляет интерес из-за возможности выращивать эпитаксиальные пленки на сапфировых подложках. κ-Ga_2O_3 – метастабильный полиморф ромбической группы симметрии, сегнетоэлектрик, с потенциальными областями применения в транзисторных структурах с поляризационным легированим. И полиморф γ-Ga_2O_3 кубической сингонии с теоретически высокой радиационной стойкостью.

Также значительная часть литературного обзора посвящена вопросу глубоких уровней в полиморфах Ga_2O_3 и проблемам, связанным с определением физической природы связанных с ними точечных дефектов (см. рисунок 1).

В главе содержатся последние данные о методах роста полиморфов Ga_2O_3. Для объемного роста β-Ga_2O_3 продемонстрировано получение 6 дюймовых кристаллов методом Бриджмана [23] и 2 дюймовые кристаллы,

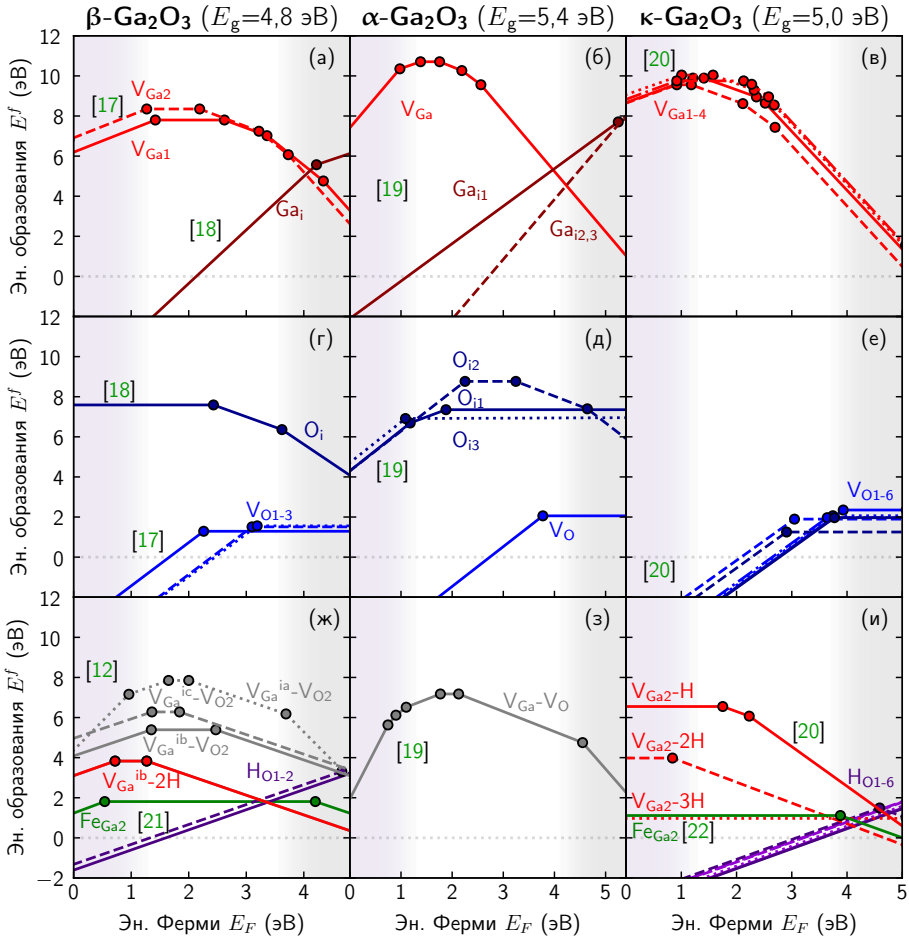


Рисунок 1 — Первопринципные расчеты для основных дефектов в β-, α- и κ-полиморфах (первая, вторая и третья колонка), представляющие значения энергии образования для собственных дефектов, связанных с Ga (а, б, в), с O (г, д, е), и прочих дефектов и комплексов (ж, з, и) в условиях обогащения Ga

полученные без Ir-тигеля [24]. Метастабильный γ-полиморф растет в сильно неравновесных условиях, а для метастабильных α- и κ-полиморфов доступны методы MBE, MOCVD, mist-CVD и HVPE с пристойным уровнем контроля легирования и качества слоев.

Продемонстрирован уровень приборов для β-Ga_2O_3, а именно: выпрямители на барьерах Шоттки (БШ) показывают достаточно низкие

сопротивления во включенном состоянии $R_{on,sp} = 3-10\,\text{мОм}\cdot\text{см}^2$ с пробивными напряжениями в диапазоне $V_{BD} = 300-4000\,\text{В}$. Выпрямители на основе барьеров Шоттки на более широкозонном полиморфе α-Ga_2O_3 позволили достичь еще более низких сопротивлений во включенном состоянии $R_{on,sp} = 0{,}1\,\text{мОм}\cdot\text{см}^2$ [25].

Использование гетеропереходов (ГП) с p-оксидами позволило значительно увеличить пробивные напряжения выпрямителей, мировой уровень которых составляет $V_{BD} = 700-400\,\text{В}$, а рекордным значением на сегодня является $V_{BD} = 13{,}5\,\text{кВ}$ [15], что находится на границе теоретического предела для β-Ga_2O_3.

Транзисторные MOSFET, MESFET структуры на β-Ga_2O_3 демонстрируют сопротивления во включенном состоянии $R_{on,sp} = 9-60\,\text{мОм}\cdot\text{см}^2$, с пробивными напряжениями в диапазоне $V_{BD} = 600-3000\,\text{В}$. А транзисторы HJFET дают выигрыш в снижении $R_{on,sp}$ до $1-10\,\text{мОм}\cdot\text{см}^2$.

Раздел, посвященный литературному обзору по уровню солнечно-слепых фотодетекторов (ФД) на Ga_2O_3, показывает, что вне зависимости от метода получения активных слоев фотодетекторы демонстрируют аномально высокую фоточувствительность и длительные времена спада и нарастания фототока.

Вторая глава посвящена методам исследования ГУ в широкозонных материалах и анализу пределов применимости различных экспериментальных методик и подходов, применяемых в их основе. Методики исследования ГУ условно поделены на емкостные и токовые. Емкостные методы, такие как Спектроскопия Адмиттанса (СА) и Релаксационная Спектроскопия Глубоких Уровней (РСГУ), используются для структур с невысоким сопротивлением и возможностью модуляции области пространственного заряда, где, собственно, возможно измерять емкость и ее зависимость от напряжения.

Были уточнены вопросы влияния ГУ на измерения ВФХ. Предложенная реализация Лаплас РСГУ улучшает разрешающую способность классического РСГУ. Метод фотоемкости и оптического РСГУ применяется для структур со сложностями в электрической инжекции н.з. и сложностями в модуляции области пространственного заряда. Помимо этого, в контексте Ga_2O_3 и его проблем с p-тип легированием, метод оптического РСГУ является единственным методом для изучения ГУ в нижней половине запрещенной зоны. В структурах со сложностью в измерении емкости и для структур с относительно высоким сопротивлением, используется токовый-РСГУ (транзисторные структуры), уточнены вопросы, связанные с повторным захватом н.з. в токовых методах (см. рисунок 2). Для структур с высоким сопротивлением и сложностями в электрической инжекции н.з. используются токовые методы с оптическим заполнением – ФЭРС и ТСТ.

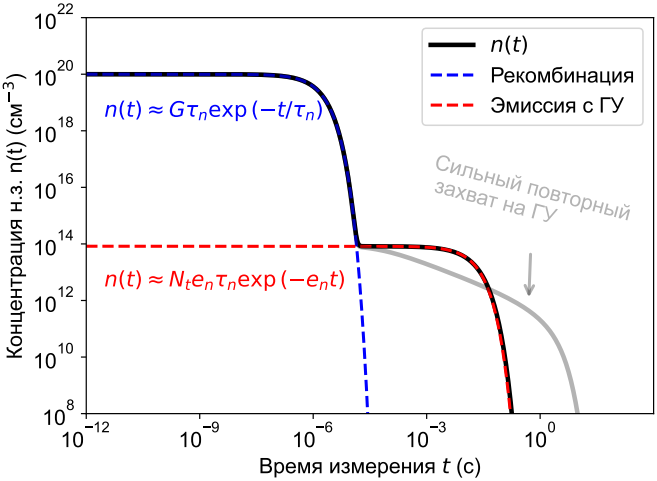


Рисунок 2 — Решение уравнение непрерывности для метода ФЭРС. Пунктирные линии – аналитические решения для процессов рекомбинации (синий цвет) и эмиссии с ГУ (красный цвет). Серая линия – численное решение с учетом сильного повторного захвата н.з. на ГУ

Третья глава посвящена исследованию свойств ГУ в β-, α-, κ- и γ-полиморфах Ga_2O_3 с применением методик исследования ГУ из второй главы диссертационной работы. Впервые были собраны и систематизированны данные для α-, κ- и γ-полиморфов. На основе собранных данных сделаны выводы о свойствах некоторых приборных структур в четвертой главе.

Исследования ГУ в β-Ga_2O_3 проводились на объемных образцах, выращенных методами Чохральского и Степанова, и на эпитаксиальных HVPE пленках. Облучение протонами и нейтронами использовалось для введения собственных дефектов и определения связанных с ними ГУ. Требовались высокие флюенсы 1,1 МэВ протонов, от 10^{13} см$^{-2}$ для введения детектируемых изменений в спектрах ГУ. Измеренные свойства ГУ приведены в таблице 1, некоторые из свойств приведены с условными наименованиями, соответствующими сложившейся терминологии [21; A2; 26].

Для α-Ga_2O_3 изучены ГУ в эпитаксиальных HVPE пленках, выращенных на планарном и профилированном сапфире, с и без обработки в H-плазме. Для сильнолегированных пленок α-Ga_2O_3 не получилось ввести дефекты облучением 1,1 МэВ протонами даже с флюенсом 10^{16} см$^{-2}$, что говорит о высокой радионной стабильности полиморфа. Свойства детектированных ГУ представлены в таблице 2, с условными обозначениями для некоторых ГУ [A3].

Таблица 1 — Список ГУ, детектированных в образцах β-Ga_2O_3

Глубокий уровень	**Концентрация, см$^{-3}$**	**Возможная природа**	**Методика**
$E_C - 50$ мэВ $\sigma_n = 1{,}1 \cdot 10^{-18}$ см^2	$4{,}6 \cdot 10^{15}$	Si_{Ga2}; Sn_{Ga1}[27];	СА
E8: $E_C - 0{,}24$ эВ $\sigma_n = 5{,}1 \cdot 10^{-13}$ см^2	$6{,}2 \cdot 10^{14}$	$H_{O2}^{+1/-1}$; $(V_{Ga1}H\text{-}V_{O1})^{0/-2}$; $(V_{Ga}^{ib}H\text{-}V_{O1})^{0/-2}$[28]	СА, РСГУ
E8*: $E_C - 0{,}30$ эВ $\sigma_n = 3{,}5 \cdot 10^{-16}$ см^2	$2{,}3 \cdot 10^{11} - 2{,}1 \cdot 10^{12}$	$(V_{Ga1}H\text{-}V_{O1})^{0/-2}$, $(V_{Ga}^{ib}H\text{-}V_{O1})^{0/-2}$[28]	РСГУ
E1: $E_C - 0{,}60$ эВ $\sigma_n = 1{,}2 \cdot 10^{-13}$ см^2	$4{,}1 \cdot 10^{11} - 3{,}2 \cdot 10^{15}$	$(Si_{Ga1}H)^{+2/0}$; $(Sn_{Ga2}H)^{+2/0}$[28]	РСГУ
E2a: $E_C - 0{,}73$ эВ $\sigma_n = 1{,}5 \cdot 10^{-14}$ см^2	$8{,}6 \cdot 10^{14} - 1{,}5 \cdot 10^{15}$	$Fe_{Ga1}^{0/-1}$[29]	Лаплас РСГУ
E2*: $E_C - 0{,}76$ эВ $\sigma_n = 1{,}0 \cdot 10^{-14}$ см^2	$5{,}0 \cdot 10^{12} - 9{,}4 \cdot 10^{16}$	$(V_{Ga2}\text{-}V_{O1})^{-1/-3}$; $(V_{Ga2}H\text{-}V_{O1})^{0/-2}$; $(V_{Ga}^{ib}2H\text{-}V_{O1})^{+1/-1}$[21]	РСГУ, Лаплас РСГУ
E2: $E_C - 0{,}84$ эВ $\sigma_n = 1{,}8 \cdot 10^{-14}$ см^2	$5{,}7 \cdot 10^{15} - 5{,}3 \cdot 10^{16}$	$Fe_{Ga2}^{0/-1}$[29]	РСГУ, Лаплас РСГУ
E3: $E_C - 1{,}0$ эВ $\sigma_n = 5{,}4 \cdot 10^{-13}$ см^2	$1{,}1 \cdot 10^{15} - 1{,}2 \cdot 10^{16}$	$Ti_{Ga}^{+1/0}$[29];	РСГУ, Лаплас РСГУ
E3*: $E_C - 1{,}04$ эВ $\sigma_n = 3{,}0 \cdot 10^{-14}$ см^2	$1{,}2 \cdot 10^{13}$	$O_I^{-1/-2}$[18]; $V_{Ga2}^{-2/-3}$[17]; $(V_{Ga}^{ia}\text{-}V_{O2})^{-1/-3}$[30]	РСГУ, Лаплас РСГУ
E4: $E_C - 1{,}20$ эВ $\sigma_n = 1{,}4 \cdot 10^{-12}$ см^2	$3{,}4 \cdot 10^{13} - 1{,}2 \cdot 10^{15}$	$(V_{Ga1}2H\text{-}V_O)^{+1/-1}$[21]	РСГУ, Лаплас РСГУ
E5: $E_C - 1{,}40$ эВ $\sigma_n = 4{,}1 \cdot 10^{-11}$ см^2	$8{,}0 \cdot 10^{12} - 2{,}7 \cdot 10^{13}$	$(V_{Ga2}\text{-}V_{O2})^{-1/-3}$[21]	РСГУ, Лаплас РСГУ
$E_V + 0{,}78$ эВ $\sigma_p = 2{,}0 \cdot 10^{-14}$ см^2	$1{,}6 \cdot 10^{13}$	$(V_{Ga}^{ib} - 2H)^{+1/0}$[30]; $Fe_{Ga2}^{+1/0}$[21]	ОРСГУ
STH2: $E_V + 0{,}29$ эВ $\sigma_p = 2{,}2 \cdot 10^{-11}$ см^2	$4{,}3 \cdot 10^{14}$	O_{O2}^{+}[31]	ОРСГУ
STH1: $E_V + 0{,}28$ эВ $\sigma_p = 1{,}8 \cdot 10^{-9}$ см^2	$3{,}8 \cdot 10^{14}$	O_{O1}^{+}[31]	ОРСГУ

Таблица 2 — Список ГУ, детектированных в образцах α-Ga_2O_3

Глубокий уровень	**Концентрация, см$^{-3}$**	**Возможная природа**	**Методика**
$E_C - 0{,}13$ эВ $\sigma_n = 4{,}0 \cdot 10^{-18}$ см^2	$8{,}6 \cdot 10^{14} - 1{,}5 \cdot 10^{15}$	$Ga_{i1}^{+2/+1}$[19]; $(V_{Ga}H\text{-}V_O)^{+0/-2}$[28]	РСГУ
D: $E_C - 0{,}20$ эВ $\sigma_n = 5{,}0 \cdot 10^{-17}$ см^2	$2{,}6 \cdot 10^{15}$	$(V_{Ga}H\text{-}V_O)^{+0/-2}$[28]; $Ga_{i1}^{+2/+1}$[19]	РСГУ, ТСТ
$E_C - 0{,}53$ эВ $\sigma_n = 7{,}8 \cdot 10^{-13}$ см^2	$1{,}7 \cdot 10^{15} - 5{,}3 \cdot 10^{15}$	Sn_{Ga}-H [28]; $O_{i2}^{-1/-2}$[19]	РСГУ, Токовый РСГУ, ТСТ, ФЭРС
A: $E_C - 0{,}62$ эВ $\sigma_n = 1{,}0 \cdot 10^{-14}$ см^2	$2{,}5 \cdot 10^{14} - 6{,}0 \cdot 10^{15}$	$O_{i2}^{-1/-2}$[19]; Sn_{Ga}-H [28]	РСГУ, Токовый РСГУ, ТСТ
$E_C - 0{,}69$ эВ $\sigma_n = 2{,}1 \cdot 10^{-15}$ см^2	$4{,}8 \cdot 10^{14}$	$(V_{Ga}\text{-}V_O)^{-1/-2}$; $O_{i2}^{-1/-2}$[19]	РСГУ, СА
C: $E_C - 0{,}82$ эВ $\sigma_n = 1{,}0 \cdot 10^{-15}$ см^2	$5{,}5 \cdot 10^{13} - 1{,}2 \cdot 10^{15}$	$Fe_{Ga}^{0/-1}$[12]; $(V_{Ga}\text{-}V_O)^{-1/-2}$[19]	РСГУ, ФЭРС, СА
B: $E_C - 1{,}10$ эВ $\sigma_n = 1{,}1 \cdot 10^{-14}$ см^2	$1{,}6 \cdot 10^{14} - 2{,}5 \cdot 10^{15}$	$(V_{Ga}\text{-}V_O)^{-1/-2}$[19]; $Fe_{Ga}^{0/-1}$[12]	РСГУ
$E_C - 2{,}10$ эВ	$1{,}0 \cdot 10^{15}$	$V_{Ga}^{-2/-3}$; O_{i2}; V_{Ga}-V_O [19]	Фотоемкость
$E_C - 2{,}50$ эВ	$2{,}0 \cdot 10^{15}$	$V_{Ga}^{0/-1}$; $V_{Ga}^{-1/-2}$; O_{i2}; V_{Ga}-V_O [19]	Фотоемкость
$E_C - 3{,}10$ эВ	$1{,}0 \cdot 10^{15}$	$O_{i2}^{+2/0}$; $V_{Ga}^{+1/0}$; $V_{Ga}^{0/-1}$; V_{Ga}-V_O [19]	Фотоемкость
$E_C - 0{,}42$ эВ	–	DX-$H^{+1/0}$; Sn-H комплекс; V_{Ga}-$4H^{-1/0}$ [32]	ТСТ
$E_C - 0{,}77$ эВ	–	DX-$H^{0/-1}$; Sn-H комплекс; V_{Ga}-$4H^{-2/-1}$ [32]	ТСТ
$E_V + 0{,}90$ эВ $\sigma_p = 8{,}0 \cdot 10^{-13}$ см^2	$3{,}8 \cdot 10^{15}$	$V_{Ga}^{-3/-1}$; $O_{i3}^{-2/0}$; $O_{i1}^{-2/-1}$ [19]	ОРСГУ
$E_V + 0{,}18$ эВ $\sigma_p = 3{,}5 \cdot 10^{-21}$ см^2	$3{,}2 \cdot 10^{14}$	V_{Ga}-2H	РСГУ, СА

Для к-Ga_2O_3 изучены HVPE пленки, выращенные на сапфире с и без латерального заращивания, на GaN и AlN подложках. Для подложек GaN и AlN наблюдалась p-полярность в измерениях ВАХ и ВФХ, что объяснялось сильной спонтанной поляризацией GaN, AlN, к-Ga_2O_3 и образованием двумерного дырочного газа на границе III-Nitride/к-Ga_2O_3 в главе 4. Результаты изучения спектров ГУ представлены в таблице 3.

Таблица 3 — Список ГУ, детектированных в образцах к-Ga_2O_3

Глубокий уровень	**Концентрация, см$^{-3}$**	**Возможная природа**	**Методика**
$E_C - 45$ мэВ	$\sim 10^{19}$	$H_{O6}^{+1/0}$; V_{Ga2}-4H [20];	ТСТ
$E_C - 70$ мэВ	$\sim 10^{19}$	$H_{O6}^{0/-1}$; V_{Ga2}-4H [20];	ТСТ
$E_C - 0{,}15$ эВ $\sigma_n = 2{,}8 \cdot 10^{-20}$ см^2	$1{,}0 \cdot 10^{15}$	$Sn_{Ga1}^{+1/0}$; $Sn_{Ga1}^{0/-1}$ [22]	СА
$E_C - 0{,}30$ эВ	–	собственный дефект	ТСТ, ФЭРС
$E_C - 0{,}50$ эВ	–	собственный дефект	ТСТ, ФЭРС
$E_C - 0{,}75$ эВ $\sigma_n = 2{,}0 \cdot 10^{-14}$ см^2	$5{,}0 \cdot 10^{12} - 1{,}6 \cdot 10^{13}$	$V_{O1\text{-}6}^{+2/0}$ [20]; $Fe_{Ga2}^{0/-1}$ [22]	РСГУ
$E_C - 1{,}00$ эВ $\sigma_n = 4{,}1 \cdot 10^{-13}$ см^2	$6{,}0 \cdot 10^{12} - 1{,}0 \cdot 10^{15}$	$V_{O1\text{-}6}^{+2/0}$ [20];	РСГУ, ОРСГУ
$E_C - 1{,}30$ эВ**	$\sim 10^{18}$	V_{Ga}-nH [20]	Фотоемкость
$E_C - 2{,}00$ эВ**	$\sim 10^{18}$	V_{Ga}-nH [20]	Фотоемкость
$E_C - 2{,}50$ эВ**	$\sim 10^{18}$	V_{Ga}-nH [20]	Фотоемкость
$E_C - 3{,}10$ эВ**	$\sim 10^{18}$	V_{Ga}-nH [20]	Фотоемкость
$E_V + 0{,}79$ эВ* $\sigma_n = 8{,}2 \cdot 10^{-15}$ см^2	$5{,}7 \cdot 10^{13}$	$V_{Ga1\text{-}4}^{+1/0}$; $(V_{Ga2} - 2H)^{0/-1}$ [20]	РСГУ
$E_V + 0{,}68$ эВ* $\sigma_n = 6{,}0 \cdot 10^{-16}$ см^2	$6{,}0 \cdot 10^{12} - 3{,}0 \cdot 10^{13}$	$V_{Ga1\text{-}4}^{+1/0}$ [20]	РСГУ
$E_V + 0{,}65$ эВ* $\sigma_n = 1{,}0 \cdot 10^{-18}$ см^2	$8{,}0 \cdot 10^{11}$	–	РСГУ
$E_V + 0{,}45$ эВ* $\sigma_n = 1{,}1 \cdot 10^{-13}$ см^2	$2{,}4 \cdot 10^{13}$	–	РСГУ

* данные получены для образцов с p-тип поведением

** данные получены для образцов после обработки в H-плазме

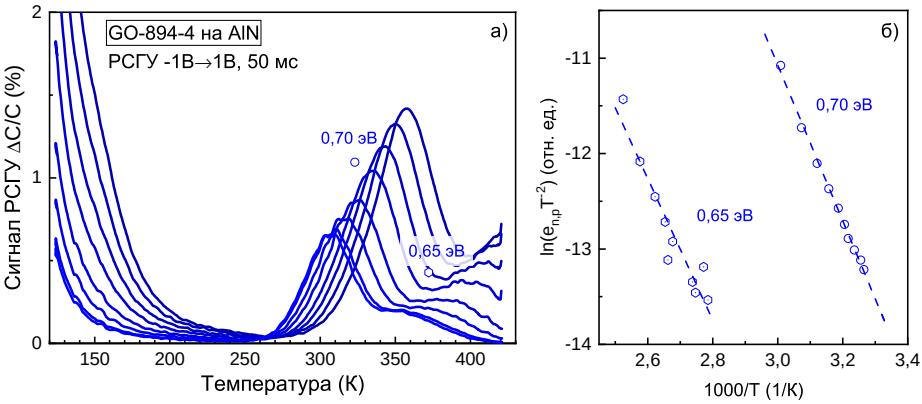


Рисунок 3 — (а) Спектр РСГУ и (б) график Аррениуса для ГУ в образце GO-894-4 со структурой к-Ga_2O_3/AlN [A4]

Для γ-Ga_2O_3 изучены пленки, полученные конвертацией нелегированных пленок β-Ga_2O_3 путем имплантации высокоэнергетических 1,7 МэВ ионов Ga^+ с флюенсом $6 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$, имплантацией 36 кэВ Si^+ с флюенсом $2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ и последующей обработкой в H-плазме. Полученные данные о ГУ в данных образцах γ-Ga_2O_3 представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Список ГУ, детектированных в образцах γ-Ga_2O_3

Глубокий уровень	**Концентрация, см$^{-3}$**	**Возможная природа**	**Методика**
$E_C - 36$ мэВ*	$\sim 10^{19}$	$H_i^{+1/0}$	ТСТ
$E_C - 95$ мэВ*	$\sim 10^{19}$	$H_i^{0/-1}$	ТСТ
$E_C - 0{,}52$ эВ $\sigma_n = 2{,}4 \cdot 10^{-17}$ см^2	$3{,}3 \cdot 10^{11}$	собственный дефект	РСГУ
$E_C - 0{,}64$ эВ $\sigma_n = 5{,}0 \cdot 10^{-17}$ см^2	$7{,}0 \cdot 10^{10}$	$Si_{Ga}H$	Токовый РСГУ, РСГУ
$E_C - 1{,}00$ эВ $\sigma_n = 8{,}8 \cdot 10^{-13}$ см^2	–	собственный дефект	Токовый РСГУ
$E_C - 2{,}1$ эВ	$1{,}7 \cdot 10^{13}$	V_{Ga}nH-V_O; V_{Ga}-nH	Фотоемкость
$E_C - 2{,}5$ эВ	$3{,}0 \cdot 10^{13}$	V_{Ga}nH-V_O; V_{Ga}-nH	Фотоемкость
$E_C - 3{,}0$ эВ	$4{,}0 \cdot 10^{13}$	V_{Ga}nH-V_O; V_{Ga}-nH	Фотоемкость

*данные для образцов, обработанных в H-плазме, но без имплантации Si

Четвертая глава посвящена исследованию влияния ГУ на характеристики устройств и структур на основе полиморфов Ga_2O_3.

В первом разделе главы сравниваются характеристики барьеров Шоттки Ni/β-Ga_2O_3 (БШ) и гетеропереходов p-NiO/β-Ga_2O_3 (ГП) и их радиационная стабильность. Пробивные напряжения для таких структур составили 450 В для БШ и 750 В для ГП. Достигнутые показатели находятся на мировом уровне в контексте неоптимизированных для силовых применений структур. Изучена радиационная стабильность сравниваемых структур под воздействием 1,1 МэВ протонов с флюенсом $2{,}0 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ [A5].

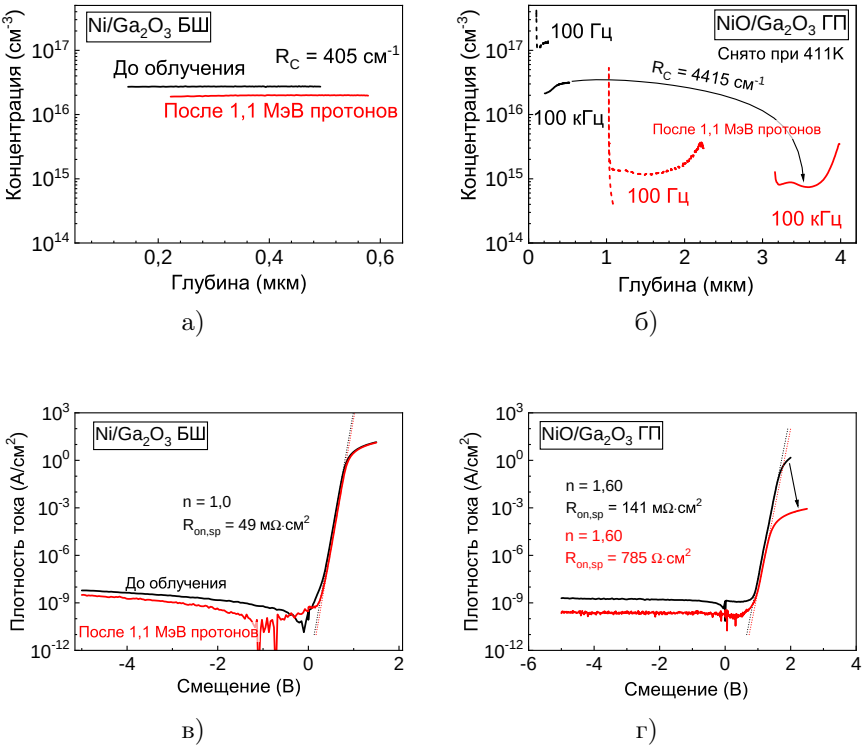


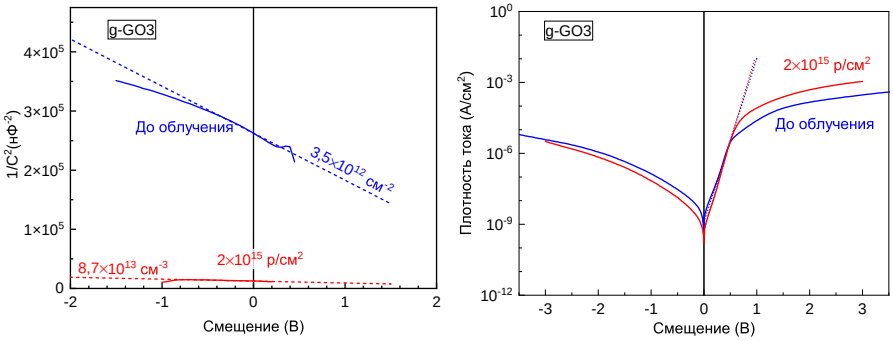
Рисунок 4 — Сравнение (а, б) профилей ВФХ и (д,е) ВАХ до и после облучения 1,1 МэВ протонами с флюенсом $2{,}0 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ для барьеров Шоттки Ni/β-Ga_2O_3 и гетеропереходов NiO/β-Ga_2O_3

ВАХ и ВФХ характеристики, представленные на рисунках 4, демонстрируют слабые изменения характеристик для БШ, а именно слабые

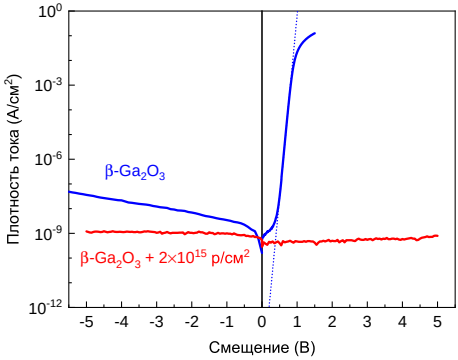
изменения в концентрации уровня легирования, которые связаны с удалением мелких доноров в слоях β-Ga_2O_3 при облучении со скоростями $R_c = 405\,см^{-1}$, и отсутствие изменений в коэффициенте выпрямления по току на ±1 В ($10^{10} \rightarrow 10^{10}$). ГП же, помимо изначально сильной частотной дисперсии емкости (см. рисунок 4б), демонстрирует сильное изменение концентрации н.з. со скоростями удаления $R_c = 4415\,см^{-1}$ и сильное падение коэффициента выпрямления на ±2 В ($9{,}2 \cdot 10^8 \rightarrow 1{,}8 \cdot 10^6$). Сильное изменение характеристик ГП объясняется слабой радиационной стабильностью слоев p-NiO и падением концентрации н.з. Тем не менее данные изменения характеристик ГП, введенные облучением 1,1 МэВ протонами, восстановились после отжига в течение 30 минут при температуре 673 К. Несмотря на слабую радиационную стабильность ГП, высокие пробивные напряжения таких структур делают перспективным применение NiO/β-Ga_2O_3 в силовых приборах в условиях низкого ионизирующего излучения.

Во втором разделе главы приведено исследование радиационной чувствительности барьеров Шоттки Ni/γ-Ga_2O_3. Слои γ-полиморфа получены путем имплантации 1,7 МэВ ионов Ga^+ с флюенсом $6{,}0 \cdot 10^{15}\,см^{-2}$ в β-Ga_2O_3 [33; А6]. Высокоомная пленка γ-Ga_2O_3 после имплантации Ga^+ также была подвержена имплантации 36 кэВ Si^+ с флюенсом $10^{15}\,см^{-2}$ и обработке в H-плазме, что позволило достичь проводимости в данной пленке с концентрацией н.з. на уровне $3{,}5 \cdot 10^{12}\,см^{-3}$ (см. рисунок 5а), что может быть объяснено введением дефектов V_{Ga}-4H-V_O или V_{Ga}-4H и связанных с ними мелких донорных состояний [12; 20; 32].

На проводящих слоях γ-Ga_2O_3 создан Ni-барьер Шоттки. ВФХ и ВАХ такой структуры представлены на рисунках 5а и 5б. Данный образец был облучен 1,1 МэВ протонами с флюенсом $2 \cdot 10^{15}\,см^{-2}$ и продемонстрировал увеличение концентрации н.з. в ВФХ и увеличение коэффициента выпрямления на ±1 В ($1{,}6 \cdot 10^6 \rightarrow 1{,}2 \cdot 10^3$). Данные наблюдения также объясняются наличием мелких уровней, связанных с V_{Ga}-4H-V_O или V_{Ga}-4H, т.к. введение собственных дефектов облучением приводит к увеличению концентрации н.з. и к уменьшению последовательного сопротивления барьера Шоттки Ni/γ-Ga_2O_3 (см. рисунки 5а и 5б). Для демонстрации радиационной стабильности такому же облучению был подвергнут барьер Шоттки Ni/β-Ga_2O_3. При таком высоком флюенсе и при скоростях удаления $R_c \approx 400\,см^{-1}$ полностью компенсировалась проводимость в слоях β-Ga_2O_3, что привело к полному коллапсу коэффициента выпрямления на ±1 В ($6{,}7 \cdot 10^6 \rightarrow 0$) (см. рисунок 5в). Это демонстрирует перспективы того, что выпрямители на основе γ-Ga_2O_3 могут быть использованы в условиях, предполагающих воздействие значительных потоков высокоэнергетических частиц, как тех, что встречаются в космосе или в ядерных реакторах.



а) б)



в)

Рисунок 5 — Результаты (а) ВФХ и (б) ВАХ для образца g-GO3, демонстрирующие высокую радиационную стабильность барьеров Шоттки на γ-Ga_2O_3. (в) ВАХ для БШ Ni/β-Ga_2O_3 до и после облучения приведена для сравнения

Также в третьем разделе главы представлено исследование эффекта коллапса тока в полевом транзисторе с изолированным затвором на основе отщепленной нанопленки β-Ga_2O_3 на подложке SiO_2/p^{++}-Si. Измерения спектров токового РСГУ демонстрируют сильный захват носителей заряда в канале транзистора на уровни E2 (см. рисунки 6а,б); амплитуда тока н.з., выбрасываемых с этого уровня, составляет порядка ∼1 мкА, что соответствует 23 % от тока стока транзистора в открытом состоянии (см. рисунок 6в). Полученные результаты указывают на то, что связанный с уровнем E2 акцепторный уровень железа $Fe^{0/-1}_{Ga2}$, присутствующий в объемном материале в достаточно высоких концентрациях (порядка 10^{16} $см^{-3}$, см. таблицу 1) либо в полуизолирующих слоях с высокой компенсацией железом, участвует в коллапсе тока. Уменьшение концентрации железа в канале транзистора должно привести к уменьшению эффекта коллапса тока, однако железо в компенсированных буферных слоях транзистора по-прежнему будет участвовать в захвате н.з.

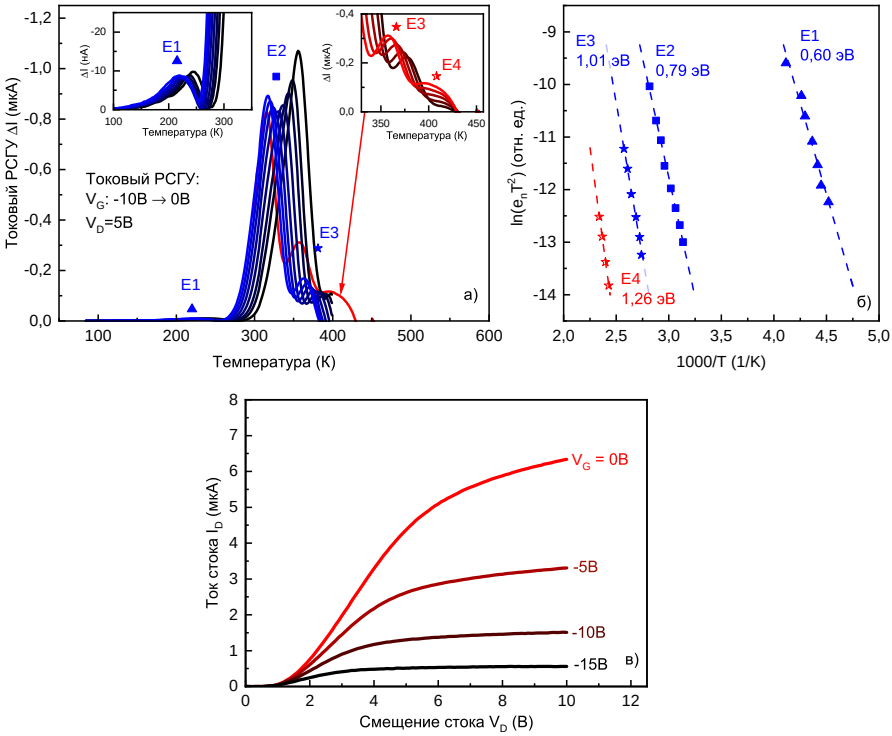
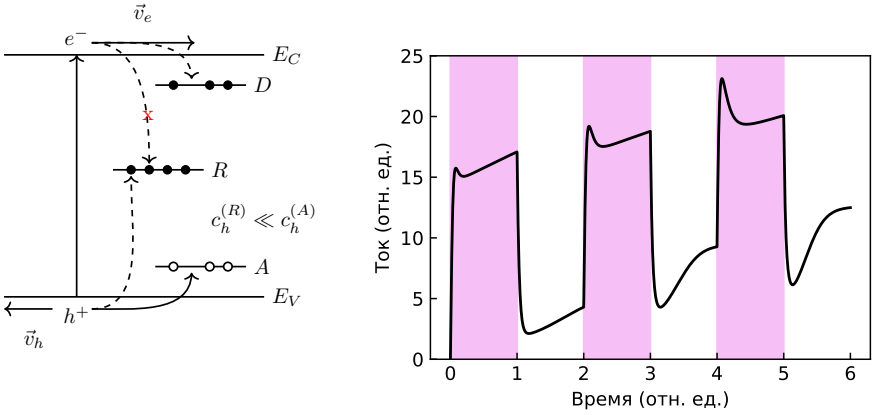


Рисунок 6 — (а) Спектр токового РСГУ для транзисторной структуры, (б) график Аррениуса для ГУ в изучаемой транзисторной структуре и (в) стоковые характеристики транзисторной структуры, снятые на 96 К

В последнем разделе главы для фотодетектора на основе нелегированной HVPE пленки α-Ga_2O_3, выращенной на сапфире, предложена феноменологическая модель, описывающая высокие фоточувствительности и долгие времена спада и нарастания фототока (см. рисунок 7) [A1; A7].

Высокие токовые фоточувствительности объясняются моделью рециклинга за счет увеличения эффективного времени жизни электронов вследствие прилипания дырок на глубокие акцепторы (уровень A на рисунке 7а). Это приводит к насыщению процессов рекомбинации (уровень R на рисунке 7а) и, соответственно, к росту эффективного времени жизни электронов. Данная модель качественно описывает реальные времена спада и нарастания фототока в фотодетекторе на основе α-Ga_2O_3. В эксперименте фототок рос с каждым из последующих импульсов света, что в рамках предложенной модели объясняется насыщением процессов рекомбинации и захватом дырок на глубокие акцепторы (розовые полосы на рисунке 7б). А характерный «зуб», также наблюдаемый в эксперименте, объясняется накоплением электронов в зоне проводимости и их последующим захватом на глубокие доноры D (см. рисунок 7б).

После решения проблемы длительных времен спада и нарастания фототока, потенциальная перспективность фотодетекторов на основе Ga_2O_3 заключается в возможности создания устройств с высокой чувствительностью, которые будут применяться в солнечно-слепой электронике и УФ-фотонике.



а) б)

Рисунок 7 — (а) Схематическое представления предлагаемой модели, объясняющей долгие времена нарастания и спада фототока и (б) решение уравнения непрерывности для данной модели

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Полученные результаты показали, что гетеропереходы NiO/β-Ga_2O_3 перспективны для применения в выпрямителях с высокими пробивными напряжениями. Однако их радиационная стабильность ограничена, это обусловлено ростом сопротивления p-NiO слоев при облучении 1,1 МэВ протонами, но данные изменения могут быть практически полностью восстановлены отжигом на 673 К в течении 30 минут. Данный эффект стоит учесть при использовании NiO/β-Ga_2O_3 гетеропереходов в условиях повышенного ионизирующего излучения.
2. Проведенный сравнительный анализ барьеров Шоттки на γ- и β-Ga_2O_3 показал, что γ-полиморф обладает повышенной радиационной стабильностью. Облучение протонами с энергией 1,1 МэВ приводит к формированию дополнительных н.з., вероятно, связанных с мелкими донорами типа V_{Ga}–4H V_O. Это увеличивает проводимость γ-Ga_2O_3 и снижает последовательное сопротивление барьеров Шоттки, способствуя улучшению их выпрямляющих характеристик. В то же время в β-Ga_2O_3 происходит полная компенсация проводимости, обусловленной мелкими донорами Si. Это указывает на перспективность γ-Ga_2O_3 для эксплуатации в условиях повышенного повышенного ионизирующего излучения.
3. Установлено, что дефект Fe_{Ga2}, формирующий глубокий уровень E2, определяет коллапс тока в полевых транзисторах на основе слоев β-Ga_2O_3, полученных методом Степанова. ГУ E2 участвуют в захвате и выбросе электронов в канале транзистора, что приводит к величине коллапса тока стока транзистора порядка ∼20 %.
4. Проведенное исследование свойств фотодетекторов на основе α-Ga_2O_3 показало, что высокая фоточувствительность достигается за счет механизма рециклинга носителей и увеличением времени жизни электронов. Захват дырок на глубокие акцепторы лимитирует процесс рекомбинации, что приводит к увеличению времени жизни электронов. Также захват н.з. на донорные и акцепторные уровни качественно объясняет долгие времена нарастания и спада фототока детектора. Понимание природы дефектов, определяющих высокие фоточувствительности, критично для оптимизации солнечно-слепых фотодетекторов на основе Ga_2O_3.

Помимо прочего, были определены границы применимости методов исследования ГУ в широкозонных полупроводниках: разработаны подходы реализации Лаплас РСГУ, методы расчета профилей концентрации ГУ и методы оценки барьеров захвата. Были собраны и систематизированы данные о глубоких уровнях в β-, α-, κ- и γ-полиморфах оксида галлия, определены основные дефекты, объясняющие свойства ГУ.

Основные публикации автора по теме диссертации

A1. Huge photosensitivity gain combined with long photocurrent decay times in various polymorphs of Ga_2O_3: effects of carrier trapping with deep centers [Текст] / A. Y. Polyakov, E. B. Yakimov, I. V. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, A. I. Kochkova, V. I. Nikolaev, S. J. Pearton // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2024. — Нояб. — Т. 58, № 6. — С. 063002. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/ad8e6e.

A2. On the possible nature of deep centers in Ga_2O_3 [Текст] / A. Y. Polyakov, A. I. Kochkova, A. Langørgen, L. Vines, **A. A. Vasilev**, I. V. Shchemerov, A. A. Romanov, S. J. Pearton // Journal of Vacuum Science & Technology A. — 2023. — Янв. — Т. 41, № 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1116/6.0002307.

A3. Deep trap spectra of Sn-doped α-Ga_2O_3 grown by halide vapor phase epitaxy on sapphire [Текст] / A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, E. B. Yakimov, V. I. Nikolaev, S. I. Stepanov, A. I. Pechnikov, A. V. Chernykh, K. D. Shcherbachev, A. S. Shikoh, A. Kochkova, **A. A. Vasilev**, S. J. Pearton // APL Materials. — 2019. — Май. — Т. 7, № 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.5094787.

A4. Two-dimensional hole gas formation at the κ-Ga_2O_3 /AlN heterojunction interface [Текст] / A. Polyakov, V. Nikolaev, A. Pechnikov, E. Yakimov, S. Y. Karpov, S. Stepanov, I. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, A. Chernykh, A. Kuznetsov, I.-H. Lee, S. Pearton // Journal of Alloys and Compounds. — 2023. — Март. — Т. 936. — С. 168315. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168315.

A5. Proton irradiation Of Ga_2O_3 Schottky diodes and NiO/Ga_2O_3 heterojunctions [Текст] / A. Y. Polyakov, D. S. Saranin, I. V. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, A. A. Romanov, A. I. Kochkova, P. Gostischev, A. V. Chernykh, L. A. Alexanyan, N. R. Matros, P. B. Lagov, A. S. Doroshkevich, R. S. Isayev, Y. S. Pavlov, A. M. Kislyuk, E. B. Yakimov, S. J. Pearton // Scientific Reports. — 2024. — Нояб. — Т. 14, № 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/S41598-024-78531-Y.

A6. Proton damage effects in double polymorph γ/β-Ga_2O_3 diodes [Текст] / A. Y. Polyakov, **A. A. Vasilev**, A. I. Kochkova, I. V. Shchemerov, E. B. Yakimov, A. V. Miakonkikh, A. V. Chernykh, P. B. Lagov, Y. S. Pavlov, A. S. Doroshkevich, R. S. Isaev, A. A. Romanov, L. A. Alexanyan, N. Matros, A. Azarov, A. Kuznetsov, S. Pearton // Journal of Materials Chemistry C. — 2024. — Т. 12, № 3. — С. 1020—1029. — URL: http://dx.doi.org/10.1039/D3TC04171A.

A7. Mechanism for Long Photocurrent Time Constants in α-Ga_2O_3 UV Photodetectors [Текст] / A. Y. Polyakov, A. V. Almaev, V. I. Nikolaev, A. I. Pechnikov, V. I. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, E. B. Yakimov, A. I. Kochkova, V. V. Kopyev, B. O. Kushnarev, S. J. Pearton // ECS Journal

of Solid State Science and Technology. — 2023. — Апр. — Т. 12, № 4. — С. 045002. — URL: http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/acc900.

A8. Observation of Temperature-Dependent Capture Cross-Section for Main Deep-Levels in β-Ga_2O_3 [Текст] / **A. A. Vasilev**, A. I. Kochkova, A. Y. Polyakov, A. A. Romanov, N. R. Matros, L. A. Alexanyan, I. V. Shchemerov, S. J. Pearton // The 11th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS 2024). — 2024.

A9. Определение температурной зависимости сечения захвата на глубокие уровни в β-Ga_2O_3 [Текст] / **А. Васильев**, А. Кочкова, А. Поляков, А. Романов, Н. Матрос, Л. Алексанян, И. Щемеров, С. Пиртон // XVI Российская конференция по физике полупроводников (РКФП-XVI). — 2024.

A10. Effect of 1 MeV Protons Irradiation on Electrical Properties of 80-μm-thick κ-Ga_2O_3 Film Grown by HVPE on GaN/Sapphire Template [Текст] / A. Polyakov, V. Nikolaev, A. Pechnikov, E. Yakimov, I. Shchemerov, **A.A. Vasilev**, A. Kochkova, A. Chernykh, I.-H. Lee, S. Pearton // Compound Semiconductor Week 2023 (CSW 2023). — 2023.

A11. Thick κ(ε)-Ga_2O_3 Sn-doped Films Prepared by HVPE on GaN/Sapphire Templates and by ELOG on Sapphire [Текст] / V. Nikolaev, A. Polyakov, I.-H. Lee, A. Pechnikov, A. Chikiryaka, M. Sheglov, A. Kochkova, **A.A. Vasilev**, I. Shchemerov, S. Pearton // Compound Semiconductor Week 2023 (CSW 2023). — 2023.

A12. Creation of Shallow Donor States in Hydrogen Plasma Exposed Undoped α-Ga_2O_3 [Текст] / A. Polyakov, V. Nikolaev, **A.A. Vasilev**, E. Yakimov, A. Pechnikov, I. Schemerov, A. Romanov, L. Alexanyan, A. Chernykh, A. Miakonkikh, A. Kislyuk, A. Panichkin, S. Pearton // Journal of Alloys and Compounds. — 2025. — Апр. — Т. 1026. — С. 180291. — URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180291.

A13. Observation of temperature-dependent capture cross section for main deep-levels in β-Ga_2O_3 [Текст] / A. A. Vasilev, A. I. Kochkova, A. Y. Polyakov, A. A. Romanov, N. R. Matros, L. A. Alexanyan, I. V. Shchemerov, S. J. Pearton // Journal of Applied Physics. — 2024. — Июль. — Т. 136, № 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0209322.

A14. Trap States in p-NiO/n-Ga_2O_3 Heterojunctions on Czochralski β-Ga_2O_3 Crystals [Текст] / V. I. Nikolaev, A. Y. Polyakov, V. M. Krymov, D. S. Saranin, A. V. Chernykh, **A. A. Vasilev**, I. V. Schemerov, A. A. Romanov, N. R. Matros, A. I. Kochkova, P. Gostishchev, S. V. Chernykh, S. V. Shapenkov, P. N. Butenko, E. B. Yakimov, S. J. Pearton // ECS Journal of Solid State Science and Technology. — 2024. — Дек. — Т. 13, № 12. — С. 123004. — URL: http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/ad9ace.

A15. Trap States and Carrier Diffusion in Czochralski (100) Single Crystal β-Ga_2O_3 [Текст] / V. I. Nikolaev, A. Y. Polyakov, V. M. Krymov, S. Shapenkov, P. N. Butenko, E. B. Yakimov, **A. A. Vasilev**, I. V. Schemerov, A. V. Chernykh, N. R. Matros, L. A. Alexanyan, A. I. Kochkova, S. J. Pearton // ECS Journal

of Solid State Science and Technology. — 2024. — Янв. — Т. 13, № 1. — С. 015003. — URL: http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/ad1bda.

A16. Editors' Choice—Structural, Electrical, and Luminescent Properties of Orthorhombic κ-Ga_2O_3 Grown by Epitaxial Lateral Overgrowth [Текст] / V. I. Nikolaev, A. Y. Polyakov, A. V. Myasoedov, I. S. Pavlov, A. V. Morozov, A. I. Pechnikov, I.-H. Lee, E. B. Yakimov, **A. A. Vasilev**, M. P. Scheglov, A. I. Kochkova, S. J. Pearton // ECS Journal of Solid State Science and Technology. — 2023. — Нояб. — Т. 12, № 11. — С. 115001. — URL: http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/ad0888.

A17. Impact of Hydrogen Plasma on Electrical Properties and Deep Trap Spectra in Ga_2O_3 Polymorphs [Текст] / A. Y. Polyakov, E. B. Yakimov, V. I. Nikolaev, A. I. Pechnikov, A. V. Miakonkikh, A. Azarov, I.-H. Lee, **A. A. Vasilev**, A. I. Kochkova, I. V. Shchemerov, A. Kuznetsov, S. J. Pearton // Crystals. — 2023. — Сент. — Т. 13, № 9. — С. 1400. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/cryst13091400.

A18. Properties of κ-Ga_2O_3 Prepared by Epitaxial Lateral Overgrowth [Текст] / A. Polyakov, I.-H. Lee, V. Nikolaev, A. Pechnikov, A. Miakonkikh, M. Scheglov, E. Yakimov, A. Chikiryaka, **A. Vasilev**, A. Kochkova, I. Shchemerov, A. Chernykh, S. Pearton // Advanced Materials Interfaces. — 2023. — Авг. — Т. 12, № 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/admi.202300394.

A19. Transport and trap states in proton irradiated ultra-thick κ-Ga_2O_3 [Текст] / A. Y. Polyakov, V. I. Nikolaev, A. I. Pechnikov, E. B. Yakimov, P. B. Lagov, I. V. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, A. I. Kochkova, A. V. Chernykh, I.-H. Lee, S. J. Pearton // Journal of Vacuum Science & Technology A. — 2023. — Апр. — Т. 41, № 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1116/6.0002673.

A20. Tuning electrical properties in Ga_2O_3 polymorphs induced with ion beams [Текст] / A. Y. Polyakov, A. I. Kochkova, A. Azarov, V. Venkatachalapathy, A. V. Miakonkikh, **A. A. Vasilev**, A. V. Chernykh, I. V. Shchemerov, A. A. Romanov, A. Kuznetsov, S. J. Pearton // Journal of Applied Physics. — 2023. — Март. — Т. 133, № 9. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0133181.

A21. Structural and electrical properties of thick κ-Ga_2O_3 grown on GaN/sapphire templates [Текст] / A. Y. Polyakov, V. I. Nikolaev, A. I. Pechnikov, S. I. Stepanov, E. B. Yakimov, M. P. Scheglov, I. V. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, A. A. Kochkova, A. V. Chernykh, A. V. Chikiryaka, S. J. Pearton // APL Materials. — 2022. — Июнь. — Т. 10, № 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0091653.

A22. Effects of sapphire substrate orientation on Sn-doped α-Ga_2O_3 grown by halide vapor phase epitaxy using α-Cr_2O_3 buffers [Текст] / A. Polyakov, V. Nikolaev, S. Stepanov, A. Almaev, A. Pechnikov, E. Yakimov, B. O. Kushnarev, I. Shchemerov, M. Scheglov, A. Chernykh, **A. Vasilev**, A. Kochkova, L. Guzilova, S. J. Pearton // Journal of Physics D: Applied

Physics. — 2022. — Окт. — Т. 55, № 49. — С. 495102. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/AC962F.

A23. Electrical and Structural Properties of Two-Inch Diameter (0001) α-Ga_2O_3 Films Doped with Sn and Grown by Halide Epitaxy [Текст] / V. I. Nikolaev, A. Y. Polyakov, S. I. Stepanov, A. I. Pechnikov, E. B. Yakimov, A. V. Chernykh, **A. A. Vasilev**, I. V. Shchemerov, A. I. Kochkova, L. Guzilova, M. P. Konovalov, S. J. Pearton // ECS Journal of Solid State Science and Technology. — 2022. — Нояб. — Т. 11, № 11. — С. 115002. — URL: http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/AC9EDB.

A24. Electrical properties of α-Ga_2O_3 films grown by halide vapor phase epitaxy on sapphire with α-Cr_2O_3 buffers [Текст] / A. Polyakov, V. Nikolaev, S. Stepanov, A. Almaev, A. Pechnikov, E. Yakimov, B. O. Kushnarev, I. Shchemerov, M. Scheglov, A. Chernykh, **Anton Vasilev**, A. Kochkova, S. J. Pearton // Journal of Applied Physics. — 2022. — Июнь. — Т. 131, № 21. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0090832.

A25. Anisotropy of hydrogen plasma effects in bulk n-type β-Ga_2O_3 [Текст] / A. Y. Polyakov, I.-H. Lee, A. Miakonkikh, A. V. Chernykh, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, A. I. Kochkova, **A. A. Vasilev**, S. J. Pearton // Journal of Applied Physics. — 2020. — Май. — Т. 127, № 17. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.5145277.

A26. Editors' Choice—Electrical Properties and Deep Traps in α-Ga_2O_3:Sn Films Grown on Sapphire by Halide Vapor Phase Epitaxy [Текст] / A. Y. Polyakov, V. I. Nikolaev, S. I. Stepanov, A. I. Pechnikov, E. B. Yakimov, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, A. I. Kochkova, A. Chernykh, S. J. Pearton // ECS Journal of Solid State Science and Technology. — 2020. — Янв. — Т. 9, № 4. — С. 045003. — URL: http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/AB89BB.

A27. Electric field dependence of major electron trap emission in bulk β-Ga_2O_3: Poole–Frenkel effect versus phonon-assisted tunneling [Текст] / A. Y. Polyakov, I.-H. Lee, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, A. V. Chernykh, S. J. Pearton // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2020. — Июнь. — Т. 53, № 30. — С. 304001. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/AB87C1.

A28. Pulsed fast reactor neutron irradiation effects in Si doped n-type β-Ga_2O_3 [Текст] / A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, **A. A. Vasilev**, E. B. Yakimov, A. V. Chernykh, A. I. Kochkova, P. B. Lagov, Y. S. Pavlov, O. F. Kukharchuk, A. A. Suvorov, N. S. Garanin, I.-H. Lee, M. Xian, F. Ren, S. J. Pearton // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2020. — Май. — Т. 53, № 27. — С. 274001. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/AB83C4.

Список литературы

1. Review and Outlook on GaN and SiC Power Devices: Industrial State-of-the-Art, Applications, and Perspectives [Текст] / M. Buffolo, D. Favero, A. Marcuzzi, C. De Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2024. — Март. — Т. 71, № 3. — С. 1344—1355. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/TED.2023.3346369.

2. Performance comparison of Si, SiC and GaN based power MOSFET/HEMT using DC-DC boost converter [Текст] / V. Joshi, P. Pande, U. Jadli, M. Chaturvedi, P. Nautiyal, C. Bisht // INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT TRENDS IN COMPOSITE SCIENCES WITH COMPUTATIONAL ANALYSIS. Т. 2978. — AIP Publishing, 2024. — С. 020001. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0183660.

3. *Dogmus, E.* SiC and GaN: A Tale of Two Semiconductors [Текст] / E. Dogmus, P. Chiu, T. Ayari. — 2022. — [дата обращения: 02.03.2025]. https://www.eetimes.com/sic-and-gan-a-tale-of-two-semiconductors/.

4. *Deng, Z.* Development of The Third Generation of Semiconductors with SiC and GaN as The Mainstay [Текст] / Z. Deng // Highlights in Science, Engineering and Technology. — 2022. — Дек. — Т. 27. — С. 436—442. — URL: http://dx.doi.org/10.54097/hset.v27i.3798.

5. A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices [Текст] / S. J. Pearton, J. Yang, I. Cary Patrick H., F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, M. A. Mastro // Applied Physics Reviews. — 2018. — Янв. — Т. 5, № 1. — С. 011301. — URL: https://doi.org/10.1063/1.5006941.

6. Complex Ga_2O_3 polymorphs explored by accurate and general-purpose machine-learning interatomic potentials [Текст] / J. Zhao, J. Byggmästar, H. He, K. Nordlund, F. Djurabekova, M. Hua // npj Computational Materials. — 2023. — Сент. — Т. 9, № 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41524-023-01117-1.

7. FLOSFIA is a spin-off from KYOTO University, to commercialize the MISTDRY technology [Текст]. — [дата обращения: 11.02.2025]. https://flosfia.com/english/.

8. The real structure of ε-Ga_2O_3 and its relation to κ-phase [Текст] / I. Cora, F. Mezzadri, F. Boschi, M. Bosi, M. Čaplovičová, G. Calestani, I. Dódony, B. Pécz, R. Fornari // CrystEngComm. — 2017. — Т. 19, № 11. — С. 1509—1516. — URL: http://dx.doi.org/10.1039/C7CE00123A.

9. Exploring Phase and Bandgap Variations in Gallium Oxide Using Mist-based Chemical Vapor Deposition System [Текст] / S. Kumar, A. Mondal, A. Pandey, S. Das, A. Bag // 2024 8th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM). — IEEE, 03.2024. — С. 1—3. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/EDTM58488.2024.10511795.

10. Universal radiation tolerant semiconductor [Текст] / A. Azarov, J. G. Fernández, J. Zhao, F. Djurabekova, H. He, R. He, Ø. Prytz, L. Vines,

U. Bektas, P. Chekhonin, N. Klingner, G. Hlawacek, A. Kuznetsov // Nature Communications. — 2023. — Авг. — Т. 14, № 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-40588-0.

11. *Sasaki, K.* Prospects for β-Ga_2O_3: now and into the future [Текст] / K. Sasaki // Applied Physics Express. — 2024. — Сент. — Т. 17, № 9. — С. 090101. — URL: http://dx.doi.org/10.35848/1882-0786/ad6b73.

12. Impact of proton irradiation on conductivity and deep level defects in β-Ga_2O_3 [Текст] / M. E. Ingebrigtsen, A. Y. Kuznetsov, B. G. Svensson, G. Alfieri, A. Mihaila, U. Badstubner, A. Perron, L. Vines, J. B. Varley // APL Materials. — 2018. — Дек. — Т. 7, № 2. — С. 022510. — URL: https://doi.org/10.1063/1.5054826.

13. First-principles calculations for point defects in solids [Текст] / C. Freysoldt, B. Grabowski, T. Hickel, J. Neugebauer, G. Kresse, A. Janotti, C. G. Van de Walle // Reviews of Modern Physics. — 2014. — Март. — Т. 86, № 1. — С. 253—305. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.86.253.

14. High breakdown voltage of 1.3 kV and low turn-on voltage of 0.48 V β-Ga_2O_3 heterojunction barrier Schottky diode with tungsten Schottky contact [Текст] / Q. Li, W. Hao, J. Liu, Z. Han, S. He, X. Zhou, G. Xu, S. Long // Applied Physics Express. — 2024. — Июнь. — Т. 17, № 6. — С. 066501. — URL: http://dx.doi.org/10.35848/1882-0786/ad4b93.

15. Breakdown up to 13.5 kV in NiO/β-Ga_2O_3 Vertical Heterojunction Rectifiers [Текст] / J.-S. Li, H.-H. Wan, C.-C. Chiang, T. J. Yoo, M.-H. Yu, F. Ren, H. Kim, Y.-T. Liao, S. J. Pearton // ECS Journal of Solid State Science and Technology. — 2024. — Март. — Т. 13, № 3. — С. 035003. — URL: http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/ad3457.

16. Single and multi-fin normally-off Ga_2O_3 vertical transistors with a breakdown voltage over 2.6 kV [Текст] / W. Li, K. Nomoto, Z. Hu, T. Nakamura, D. Jena, H. G. Xing // 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). — IEEE, 12.2019. — URL: http://dx.doi.org/10.1109/IEDM19573.2019.8993526.

17. *Park, J.* First Principles Calculation of Band Offsets and Defect Energy Levels in Al_2O_3/β-Ga_2O_3 Interface Structures with Point Defects [Текст] / J. Park, S.-M. Hong // JOURNAL OF SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY AND SCIENCE. — 2019. — Авг. — Т. 19, № 4. — С. 413—425. — URL: http://dx.doi.org/10.5573/JSTS.2019.19.4.413.

18. *Varley, J. B.* Dopants in β-Ga_2O_3: From Theory to Experiments [Текст] / J. B. Varley, C. G. Van de Walle, E. Farzana // Ultrawide Bandgap β-Ga_2O_3 Semiconductor. — AIP Publishing, 2023. — С. 1—26. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/9780735425033_006.

19. Energetics and electronic structure of native point defects in α-Ga_2O_3 [Текст] / T. Kobayashi, T. Gake, Y. Kumagai, F. Oba, Y.-i. Matsushita // Applied Physics Express. — 2019. — Авг. — Т. 12, № 9. — С. 091001. — URL: http://dx.doi.org/10.7567/1882-0786/ab3763.

20. Engineering shallow and deep level defects in κ-Ga_2O_3 thin films: comparing metal-organic vapour phase epitaxy to molecular beam epitaxy and the effect of annealing treatments [Текст] / P. Mazzolini, J. Varley, A. Parisini, A. Sacchi, M. Pavesi, A. Bosio, M. Bosi, L. Seravalli, B. Janzen, M. Marggraf, N. Bernhardt, M. Wagner, A. Ardenghi, O. Bierwagen, A. Falkenstein, J. Kler, R. De Souza, M. Martin, F. Mezzadri, C. Borelli, R. Fornari // Materials Today Physics. — 2024. — Июнь. — Т. 45. — С. 101463. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mtphys.2024.101463.

21. *Langørgen, A.* Perspective on electrically active defects in β-Ga_2O_3 from deep-level transient spectroscopy and first-principles calculations [Текст] / A. Langørgen, L. Vines, Y. Kalmann Frodason // Journal of Applied Physics. — 2024. — Май. — Т. 135, № 19. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0205950.

22. Defect level in κ-Ga_2O_3 revealed by thermal admittance spectroscopy [Текст] / A. Langørgen, Y. Kalmann Frodason, R. Karsthof, H. von Wenckstern, I. J. Thue Jensen, L. Vines, M. Grundmann // Journal of Applied Physics. — 2023. — Июль. — Т. 134, № 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0150994.

23. Novel Crystal Technology Achieves Breakthrough in Ga2O3 Crystal Growth, Paving Way for Larger, Higher-Quality Wafers - Novel Crystal Technology, Inc. — novelcrystal.co.jp [Текст]. — [дата обращения: 19.01.2025]. https://www.novelcrystal.co.jp/eng/2023/2340/.

24. Growth of bulk β-Ga_2O_3 crystals from melt without precious-metal crucible by pulling from a cold container [Текст] / A. Yoshikawa, V. Kochurikhin, T. Tomida, I. Takahashi, K. Kamada, Y. Shoji, K. Kakimoto // Scientific Reports. — 2024. — Июнь. — Т. 14, № 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024-65420-7.

25. Schottky barrier diodes of corundum-structured gallium oxide showing on-resistance of 0.1 mΩ· cm^2 grown by MIST EPITAXY [Текст] / M. Oda, R. Tokuda, H. Kambara, T. Tanikawa, T. Sasaki, T. Hitora // Applied Physics Express. — 2016. — Янв. — Т. 9, № 2. — С. 021101. — URL: http://dx.doi.org/10.7567/APEX.9.021101.

26. *Кочкова, А.* Исследование электрических характеристик и спектров глубоких центров в кристаллах и эпитаксиальных пленках β-Ga_2O_3 [Текст] : дис. канд. физ.-мат. наук: 1.3.11: защищена 19.06.2023: утв. 28.07.2023 / Кочкова Анастасия Ильинична / Кочкова Анастасия. — М. : НИТУ МИСИС, 2023. — URL: https://misis.ru/science/dissertations/2023/3681/.

27. Oxygen vacancies and donor impurities in β-Ga_2O_3 [Текст] / J. B. Varley, J. R. Weber, A. Janotti, C. G. Van de Walle // Applied Physics Letters. — 2010. — Окт. — Т. 97, № 14. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.3499306.

28. Influence of heat treatments in H2 and Ar on the E1 center in β-Ga_2O_3 [Текст] / A. Langørgen, C. Zimmermann, Y. Kalmann Frodason, E. Førdestrøm Verhoeven, P. Michael Weiser, R. Michael Karsthof,

J. Basile Varley, L. Vines // Journal of Applied Physics. — 2022. — Март. — Т. 131, № 11. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/5.0083861.

29. Ti- and Fe-related charge transition levels in β-Ga_2O_3 [Текст] / C. Zimmermann, Y. K. Frodason, A. W. Barnard, J. B. Varley, K. Irmscher, Z. Galazka, A. Karjalainen, W. E. Meyer, F. D. Auret, L. Vines // Applied Physics Letters. — 2020. — Февр. — Т. 116, № 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.5139402.

30. Generation and metastability of deep level states in β-Ga_2O_3 exposed to reverse bias at elevated temperatures [Текст] / M. E. Ingebrigtsen, A. Y. Kuznetsov, B. G. Svensson, G. Alfieri, A. Mihaila, L. Vines // Journal of Applied Physics. — 2019. — Май. — Т. 125, № 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.5088655.

31. Self-trapped hole and impurity-related broad luminescence in β-Ga_2O_3 [Текст] / Y. K. Frodason, K. M. Johansen, L. Vines, J. B. Varley // Journal of Applied Physics. — 2020. — Февр. — Т. 127, № 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.5140742.

32. Chemical manipulation of hydrogen induced high p-type and n-type conductivity in Ga_2O_3 [Текст] / M. M. Islam, M. O. Liedke, D. Winarski, M. Butterling, A. Wagner, P. Hosemann, Y. Wang, B. Uberuaga, F. A. Selim // Scientific Reports. — 2020. — Апр. — Т. 10, № 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-62948-2.

33. Disorder-Induced Ordering in Gallium Oxide Polymorphs [Текст] / A. Azarov, C. Bazioti, V. Venkatachalapathy, P. Vajeeston, E. Monakhov, A. Kuznetsov // Physical Review Letters. — 2022. — Янв. — Т. 128, № 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.015704.