МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Кочкова Анастасия Ильинична

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СПЕКТРОВ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ И ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ $\beta$-$Ga_2O_3$

Специальность
1.3.11 Физика полупроводников

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.т.н., профессор Поляков Александр Яковлевич

Москва, 2023

## ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последние 10 лет заметно возрос интерес научного и технологического сообщества к оксиду галлия ($Ga_2O_3$), имеющему сверхширокую запрещенную зону4,5-5,2 эВ [1] и критическое поле пробоя 7-9 МВ/см [2]. Это подтверждает заметный всплеск публикационной активности по исследованию методов роста оксида галлия, изучению глубоких центров в материале и перспектив изготовления приборов на его основе [3]. Такое внимание обусловлено возможностью применения $Ga_2O_3$ в силовой электронике (полевые транзисторы, диоды с барьером Шоттки) [4], оптоэлектронике (солнечно-слепые фотодетекторы) [5] и сенсорных системах (газовые сенсоры, детекторы ядерного излучения) [6].

Первые работы с $Ga_2O_3$ проводились ещё в середине XX века [1], затем о нем забыли на долгое время, пока сложности роста уже известных широкозонных полупроводников, GaN, InGaN, SiC, алмаза, невозможность изготавливать собственные подложки большого диаметра и получать пленки высокого структурного качества, исчерпание ресурсов по дальнейшему увеличению пробивных напряжений и мощности силовых приборов, не подтолкнули к поиску новых решений и развитию других полупроводниковых материалов. Полиморф β-$Ga_2O_3$ вышел на передний план исследований после демонстрации возможности роста объемных кристаллов диаметром 4 дюйма методом Степанова [7] и Чохральского [8], которые могут позволить в перспективе повысить структурное совершенство кристаллов и пленок и снизить производственные затраты в сравнении с другими широкозонными материалами, для которых получение объемного материала из расплава является нерешённой проблемой. Учитывая возможность гомоэпитаксиального роста на собственных подложках [7], деградация, вызываемая дислокациями, может быть в значительной степени подавлена в $Ga_2O_3$. Из исследований GaN известно, что дислокации могу оказывать негативное влияние на электрические, оптические и транспортные свойства эпитаксиальных пленок, что приводит к ухудшению рабочих характеристик прибора, вызывая нестабильность параметров. К этим эффектам относятся безызлучательная рекомбинация, рассеяние носителей заряда, образование комплексов дефектов, захватывающих носители заряда, возникновение точечных дефектов в результате взаимодействия дислокаций и формирование каналов утечки тока [8, 9]. При этом также может быть значительным влияние точечных дефектов. Дефекты решетки могут оказывать большое влияние на производительность устройств, приводя к сдвигу порогового напряжения, возрастанию сопротивления во включенном состоянии и т.д. [9]. Все это активизировало исследование

электрических, оптических, термических и механических свойств $Ga_2O_3$. Как при примерах развития других полупроводниковых материалов, интеграция β-$Ga_2O_3$ в производство в значительной степени будет зависеть от новых решений при разработке устройств, а также от наличия высококачественного материала с низкой плотностью дефектов.

Контроль и устранение электрически активных дефектов, образующих глубокие центры по всей ширине запрещенной зоны, имеют решающее значение для будущих силовых устройств на основе β-$Ga_2O_3$ по нескольким причинам. Во-первых, для многокиловольтных устройств требуется очень точный контроль концентрации доноров в различных областях прибора, возможность создания гетеропереходов с высокой концентрацией двумерного электронного газа, управления вертикальной проводимостью в полевых транзисторах, с низкими концентрациями компенсирующих дефектов, непреднамеренных фоновых легирующих примесей и любых других заряженных дефектов, поскольку любые неконтролируемые изменения этих концентраций приведут к невозможности управлять уровнем легирования [11]. Во-вторых, даже относительно низкие концентрации ловушек в транзисторах могут стать причиной динамических изменений сопротивления в открытом состоянии, нестабильности порогового напряжения и т.д. [12]. Это связано с тем, что переключение напряжения перемещает квазиуровни Ферми внутри запрещенной зоны, что приводит к изменению занятости ловушек, что затем является причиной эмиссии или захвата носителей заряда центром, что влияет на изменение локальной плотности заряда, приводящей к изменениям переходных характеристик транзисторов. Третья причина, по которой контроль и устранение дефектов имеют решающее значение, заключается в том, что дефектные состояния могут привести к токам утечки или снижению подвижности, если концентрации достигают умеренных уровней или рабочие температуры достаточны для изменения степени ионизации примесей и дефектов [13,14]. Поэтому очень важно изучить и охарактеризовать глубокие центры, определить расположение их уровней в запрещенной зоне, концентрации, физические источники, физическое расположение в устройстве, связать с условиями выращивания материалов, обработкой и конструкцией устройства, а также для разработки стратегии устранения или смягчения влияния глубоких центров. Более того, из-за предполагаемых условий применения β-$Ga_2O_3$ (высокие напряжения, радиочастоты, жесткие радиационные условия) становится важным понять, как условия окружающей среды влияют на работу устройств.

По сравнению с большинством современных полупроводников, изучение дефектов в β-$Ga_2O_3$ находится на ранней стадии. Количественная характеристика глубоких центров

по всей запрещенной зоне в полупроводниках со сверхширокой запрещенной зонной и низкой симметрией непростая задача, но сочетание методов электрической и оптической релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), адмиттанс спектроскопии, спектральных зависимостей фотоемкости и фототока позволяет полностью просканировать ширину запрещенной зоны. Метод РСГУ даёт исключительную чувствительность определения концентрации различных центров (на 5 порядков меньше, чем уровень легирования), позволяя оценить концентрацию каждого дефекта. Это позволит разрабатывать экспериментально обоснованные модели, которые затем можно будет использовать для оптимизации устройств с точки зрения производительности, стабильности и надежности. Также проводится облучение с целью выяснения свойств и поведения глубоких центров в $Ga_2O_3$ для понимания механизмов деградации. Такие исследования также позволяют выяснить физическую природу глубоких центров, поскольку собственные дефекты чувствительны к облучению частицами высоких энергий. Все это может помочь при оптимизации условий роста.

В связи с вышесказанным проведение комплексных исследований для идентификации центров в β-$Ga_2O_3$ является актуальной темой.

Исследования были проведены в лаборатории широкозонных полупроводник на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников на базе НИТУ МИСИС в рамках выполнения следующих грантов:

- 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.);
- 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.);
- грант НИТУ МИСИС № К2-2020-011 «Исследование дефектных состояний, влияющих на характеристики приборов в оксиде галлия, нитриде галлия и перовскитах» (2020 г.).
- грант Министерства науки и высшего образования № 075-15-2022-1113 «Новые радиационные явления в оксиде галлия и их применение в радиационных приборах» (2022 г.).

**Цель диссертационной работы** заключалась в проведении экспериментального исследования для комплексного изучения и систематизации знаний об электрически

активных дефектах, образующих глубокие центры в объемных кристаллах и эпитаксиальных пленках β-$Ga_2O_3$ различных ориентаций.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Изучить основные глубокие центры в β-$Ga_2O_3$, определить природу их возникновения, расположение уровней в запрещенной зоне.

2. Исследовать возможность компенсации электронной проводимости акцепторными вакансиями галлия при облучении частицами больших энергий, определить центры, ответственные за данное явление.

3. Изучить природу центров в β-$Ga_2O_3$ по полевой зависимости энергии активации эмиссии электронов от величины электрического поля.

4. Исследовать влияние обработки в плазмах, используемых в технологических процессах полупроводниковой электроники, на электрические свойства и спектры глубоких центров пленок β-$Ga_2O_3$.

5. Изучить анизотропию свойств β-$Ga_2O_3$, определить, как ориентация влияет на введение точечных дефектов.

6. Изучить основные акцепторные примеси Fe и Mg, применяемые для получения буферных слоев в полевых транзисторах, определить расположение данных центров в запрещенной зоне и их роль в коллапсе тока полевых транзисторов.

**Научная новизна полученных автором результатов**

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые выполнено комплексное исследование влияния облучения протонами энергий 10-20 МэВ и 1 ГэВ, альфа-частицами, нейтронами на формирование спектров глубоких центров, что помогло идентифицировать дефекты и выдвинуть предложения по уменьшению концентраций глубоких центров в β-$Ga_2O_3$.

2. Впервые проведено качественное и количественное исследование влияния ориентации на введение точечных дефектов по сравнению результатов для ориентаций (010) и ($\bar{2}$01), выявлено, что для приборных структур наиболее предпочтительна ориентация ($\bar{2}$01).

3. Изучено влияние режимов обработки в водородной плазме на формирование комплексов водорода с собственными дефектами, показано, что обработка приводит к пассивации или увеличению концентрации доноров у поверхности образца в зависимости от концентрации вакансий галлия и ионов водорода.

4. Впервые определена природа основных центров E1 в β-$Ga_2O_3$ по полевой зависимости скорости эмиссии.

5. Экспериментальные исследования полуизолирующих слоев, легированных Fe и Mg, показали, что использование Fe будет вносить меньший вклад в коллапс тока в результате захвата электронов из канала транзистора, также не все Fe в буферном слое ионизовано.

**Объекты и методы исследования**

В качестве объектов исследования были использованы коммерчески доступные образцы β-$Ga_2O_3$ компании Tamura/Novel Crystal Technology (Япония)[7]:

- пленки, выращенные методом галоидной парофазной эпитаксии (HVPE) ориентаций (001) и (010), были изучены до и после обработки водородной плазмой, облучения протонами, альфа-частицами и нейтронами [15–21];

- объемные кристаллы n-типа, выращенные методом Степанова (методом профилированного выращивания, EFG) с ориентациями (010) и ($\bar{2}$01), были подвергнуты обработке в водородной плазме и облучению протонами энергий 20 МэВ для изучения анизотропии свойств β-$Ga_2O_3$ [22,23];

- объемные полуизолирующие кристаллы EFG (010), легированные Fe [24,25].

Также в данной работе был исследован объёмный образец β-$Ga_2O_3$, выращенный методом Чохральского в Лейпцигском институте роста кристаллов, ориентацией (100) с уровнем легирования Mg $10^{18}$ $см^{-3}$ [26,27].

Для проведения электрических измерений обратный омический контакт к образцу был изготовлен электронно-лучевым напылением Ti/Au (20 нм/80 нм) и последующим быстрым термическим отжигом в $N_2$ при 500 °C в течение 1 мин. Контакты Шоттки диаметром 1 мм были приготовлены электронно-лучевым напылением Ni толщиной 200 Å через теневую маску без дальнейшего отжига. Контакты были полупрозрачными для видимого и УФ света.

Для изучения электрических свойств были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ), зависимости емкости от частоты в диапазоне от 20 Гц до 2 МГц, зависимость тока от температуры, вольт-фарадные характеристики (ВФХ) в темноте и при освещении набором светодиодов с длинами волн 365-940 нм оптической мощностью 250 $мВт/см^2$ и ультрафиолетовым светодиодом с длинной волны 259,4 нм мощностью 1,2 $мВт/см^2$. Для изучения глубоких центров была использована релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) с электрическим и оптическим возбуждениями,

в последнем случае использовался набор светодиодов упомянутый выше, адмиттанс спектроскопия (АС), также были измерены спектры фотоэлектрической релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ФЭРС ГУ) для полуизолирующих образцов [28]. Все эксперименты проводили на специально изготовленной установке [29], включающей измеритель LCR E4980 (KeySight Technologies, США), источник/измеритель напряжения/тока B2902A (KeySight Technologies, США), внешний генератор импульсов 33500B (KeySight Technologies, США). Измерения были проведены в интервале температур 80-500 K с использованием азотных криостатов компаний Криотрейд и Oxford Instruments.

Облучение протонами с энергией 20 МэВ проводили на линейном ускорителе И-2 в Центре коллективного пользования «Камикс» ИТЭФ (Россия) [15,18]. Облучение протонами высоких энергий 1 ГэВ проводили на синхроциклотроне СЦ-100024-26 ускорительного отдела ПИЯФ (Россия) [15].

Нейтронное облучение образцов было выполнено при флюенсах $5{,}4\cdot10^{13}$, $10^{14}$, $3{,}6\cdot10^{14}$ $см^{-2}$ в двухзонном импульсном самозатухающем реакторе на быстрых нейтронах БАРС-6, входящем в состав реакторно-лазерной установки «Стенд Б» в ГНЦ-РФ ФЭИ.

Облучение альфа-частицами энергией 18 МэВ при флюенсе $10^{13}$ $см^{-2}$ было выполнено в Университете Корё, г. Сеул.

Обработка в плазме Ar была проведена в реакторе индуктивно связанной плазмы (ИСП) при 300 °C в течение 2 мин до осаждения Ni [19]. Обработка в плазме водорода также была выполнена в реакторе ИСП (PlasmaLab 100 dual, Oxford Instruments Technology, Великобритания) при 330 °C в течение 0,5-1,0 часа при давлении 36 мТорр и частоте электромагнитного поля 13,56 МГц [20,22].

Профили проникновения высокоэнергетических частиц были получены из моделирования с использованием кода Stopping-and-Range-of-Ions-in Matter (SRIM) [30].

**Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методами РСГУ и ОРСГУ проведены детальные исследования спектров глубоких центров в пленках и объемных кристаллах β-$Ga_2O_3$, облученных протонами, нейтронами, альфа-частицами. Показано, что связанные поляронные состояния дырок, хотя действительно образуются, но распадаются, превращаясь в свободные дырки при температурах выше примерно 150 К, что очень важно для оценки перспектив создания биполярных приборов. Установлено, что имеется система основных глубоких центров, появляющихся при всех видах облучений и вызывающих компенсацию электронной

проводимости. На основании исследований установлено, что основными акцепторами, возникающими в результате облучения, являются $V_{Ga}$ (оптический порог ионизации 3,1 эВ) и расщепленные вакансии галлия $V_{Ga}^{i}$ (2,3 эВ).

2. Установлено, что на поверхностях $(\bar{2}01)$ и (010) при плазменной обработке водородом образуется разное количество вакансий Ga и в эти разноориентированные образцы внедряются разные концентрации ионов H. В случае кристаллов ориентацией $(\bar{2}01)$ можно получить преимущественно донорные комплексы $(V_{Ga}–4H)^{+}$, а в кристаллах с ориентацией (010) образуются преимущественно акцепторные комплексы $(V_{Ga}–2H)^{-}$, компенсирующие электронную проводимость. Предполагается, что при предварительной обработке поверхности, увеличивающей концентрацию вакансий галлия, этот процесс может позволить получать на поверхности проводимость p-типа.

3. На основании сопоставления спектров глубоких центров при облучении высокоэнергетическими протонами образцов с ориентациями (010) и $(\bar{2}01)$ выявлена серьёзная анизотропия дефектообразования у поверхности образцов, связанная с присутствием каналов с низкой атомной плотностью, нормальных к поверхности кристаллов (010). Результатом является образование у поверхности таких кристаллов очень высоких концентраций акцепторов с уровнем Ec-0,27 эВ, приводящих к серьезной метастабильности вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, отсутствующей для кристаллов с ориентацией $(\bar{2}01)$.

4. Показано, что в транзисторах β-$Ga_2O_3$ с полуизолирующим буферным слоем использование для компенсации проводимости в буфере легирования Fe целесообразней, чем Mg с точки зрения уменьшения влияния коллапса тока.

**Практическое значение полученных результатов**

1. Определены главные дефекты, контролирующие концентрацию доноров и определяющие время жизни носителей заряда. Понимание формирования и роли дефектов в β-$Ga_2O_3$ различных ориентаций оказывает положительное влияние на процесс разработки новых устройств.

2. Исследования показали, что, хотя дырки в $Ga_2O_3$ действительно образуют связанные малоподвижные поляронные состояния, эти состояния распадаются с образованием свободных дырок при температурах выше примерно 150 К, что очень важно для оценки перспектив создания биполярных приборов в $Ga_2O_3$.

3. Проведённые исследования указывают на принципиальную возможность получения проводимости p-типа при обработке слоёв β-$Ga_2O_3$ в водородной плазме за счет создания комплексов дефектов с вакансиями галлия.

4. Изучены спектры глубоких центров в высокоомных кристаллах β-$Ga_2O_3$, легированных железом и магнием, используемых в качестве буфера в полевом транзисторе. Показано, что для получения высокоомного буферного слоя предпочтительно использовать Fe, а не Mg в качестве компенсирующего акцептора. Предлагается также использовать эпитаксиальный высокоомный β-$Ga_2O_3$(Fe), выращенный методом HVPE, снижая тем самым уровень легирования Fe, необходимыый для устойчивого получения высокого удельного сопротивления буфера. Эти экспериментальные данные имеют практическое значение для прогнозирования и оптимизации работы полевых транзисторов.

5 Результаты данной работы могут быть использованы для оптимизации технологических процессов роста и обработки проводящих и полуизолирующих пленок и кристаллов β-$Ga_2O_3$.

**Личный вклад автора**

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных автором на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников, а также в лаборатории ультраширокозонных полупроводников НИТУ «МИСИС». Часть исследований была проведена в центре материаловедения и нанотехнологий Университета Осло.

Личный вклад автора в настоящую работу состоит в анализе литературных данных, определении и постановке целей и задач, описании и реализации основных экспериментальных подходов, анализе и обобщении полученных результатов, формировании основных положений и выводов, участие в написании и подготовке к публикации статей, описывающих результаты исследований, представлении результатов на конференциях.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 статей (Приложение 1) в рецензируемых научных изданиях базы данных Scopus и Web of Science.

**Апробация работы.** Результаты исследований были представлены на международных конференциях.

1. Устный доклад. A.Y. Polyakov, In-Hwan Lee, N.B. Smirnov, E.B. Yakimov, I.V. Shchemerov, A.V. Chernykh, A.I. Kochkova, A.A. Vasilev, F. Ren, P. Carey, S.J. Pearton. Effects of different plasma treatments on deep traps spectra and leakage current of $Ga_2O_3$ crystals and films. 4th International Workshop on UV Materials and Devices (IWUMD4). 9-13 сентября, 2019, г. Санкт-Петербург, Россия.

2. Устный доклад. A.Y. Polyakov, In-Hwan Lee, N.B. Smirnov, E.B. Yakimov, I.V. Shchemerov, A.V. Chernykh, A.I. Kochkova, A.A. Vasilev, F. Ren, P. Carey, S.J. Pearton. Effects of hydrogen plasma treatment on $Ga_2O_3$ films grown by HVPE. Effects of hydrogen plasma treatment on $Ga_2O_3$ films grown by HVPE. 5th International Conference on Advanced Electromaterials (ICAE2019). 5-8 ноября, 2019, г. Чеджу, Республика Корея.

3. Устный доклад. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, A.A. Vasilev, A.I. Kochkova, A.V. Chernykh, P.B. Lagov, In-Hwan Lee, S.J. Pearton. Differences in deep levels spectra of proton irradiated bulk $Ga_2O_3$ crystals as affected by orientation changing from (010) to $(\bar{2}01)$. 31th International Conferences on defects in Semiconductors (ICDS31). 26-30 июля, 2021, г. Осло, Норвегия.

4. Постерный доклад. E.B. Yakimov, A.Y. Polyakov, I.V. Shchemerov, N.B. Smirnov, A.A. Vasilev, A.I. Kochkova, P.S. Vergeles, E.E. Yakimov, A.V. Chernykh, Minghan Xian, F. 31th International Conferences on defects in Semiconductors (ICDS31). 26-30 июля, 2021, г. Осло, Норвегия.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка используемых источников из 117 наименований. Работа изложена на 129 страницах, содержит 85 рисунков, 6 таблиц и 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель и определены основные задачи, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** определена мотивация для проведения исследований по теме диссертационной работы. На основе имеющихся литературных данных представлена краткая информация о кристаллической и зонной структуре исследуемого $Ga_2O_3$ β-полиморфа. Рассмотрены современные методы и достижения различных

исследовательских групп в росте объемных кристаллов и эпитаксиальных слоев β-$Ga_2O_3$. Для понимания, какие доноры и акцепторы могут быть введены в β-$Ga_2O_3$ в результате легирования, какие собственные дефекты, формирующие глубокие центры в запрещенной зоне, образуются при неравновесных условиях роста, подробно были изучены имеющиеся теоретические расчеты. По итогам первой главы сформулирована актуальность исследований и выделены основные задачи данной диссертационной работы.

**Во второй главе** дана подробная информация об исследованных образцах β-$Ga_2O_3$, описаны методы подготовки и процессы обработки образцов для введения глубоких центров. Для каждого образца и способа обработки указаны ссылки на опубликованные статьи по теме диссертационной работы.

Описаны методы исследований глубоких центров в проводящих и полуизолирующих слоях, используемые в данной работе: вольт-фарадное профилирование (ВФХ), релаксационная спектроскопии глубоких уровней с электрическим и оптическим возбуждением (РСГУ и ОРСГУ), фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия (ФЭРС), адмиттанс спектроскопия. Для каждого метода указаны условия применения. Также описана измерительная установка, на которой были проведены все исследования электрических свойств и глубоких центров, описываемых в данной диссертационной работе.

**В третьей главе** описаны экспериментальные результаты исследований.

В первом разделе **третьей главы** изучена система основных глубоких центров, образующихся в эпитаксиальных пленках HVPE β-$Ga_2O_3$ (001) в результате облучения протонами, нейтронами и альфа-частицами (таблица 1), и определена их физическая природа (Рисунок 1). Исследованы поляронные состояния дырок при измерении спектров ОРСГУ. Подробно изучена компенсация электронной проводимости, наблюдаемая в пленках β-$Ga_2O_3$ в результате облучения высокоэнергетическими частицами разных энергий и флюенсов, сопоставлены скорости удаления носителей заряда (Рисунок 2) и скорости введения заряженных глубоких центров (Рисунок 3), получаемых из измерений спектров РСГУ и спектральной зависимости концентрации фотоиндуцированных носителей заряда.

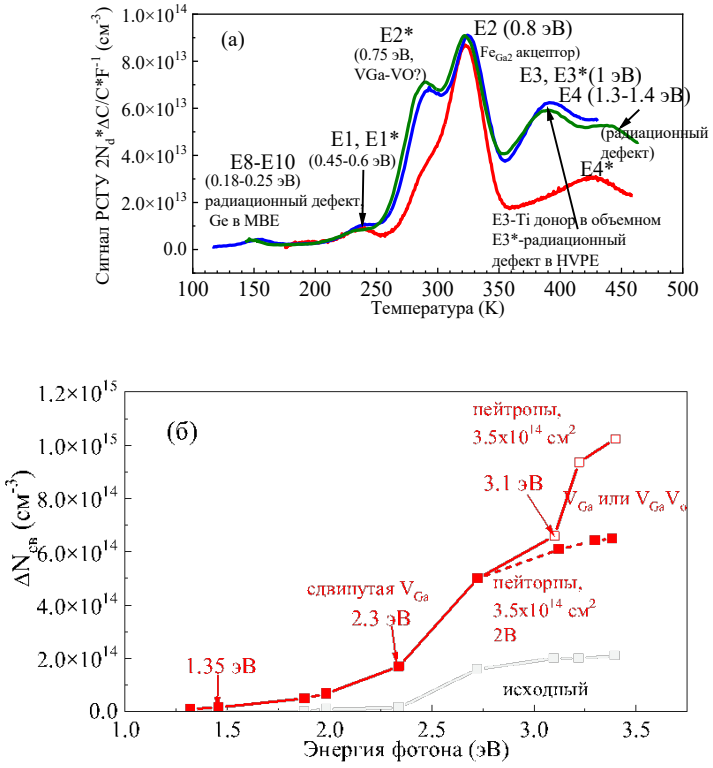



Рисунок 1 – Системы основных глубоких центров в β-$Ga_2O_3$ на примере: (а) спектра РСГУ до облучения (красная линия), после облучения нейтронами флюенсом 3,6·10$^{14}$ см$^2$, при смещении -5 В, импульсе прямого смещения 1 В, с окнами $t_1$ =1,5 с и $t_2$ = 15с; (б) Спектральная зависимость концентрации фотоиндуцированных носителей заряда, измеренная после облучения нейтронами флюенсом 3,6·10$^{14}$ см$^{-2}$

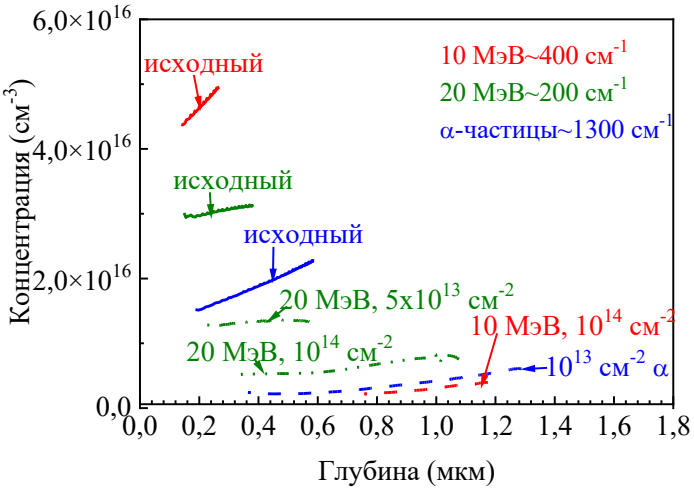



Рисунок 2 – Профили концентраций до и после облучения протонами энергий 10 и МэВ и альфа-частицами 18 МэВ

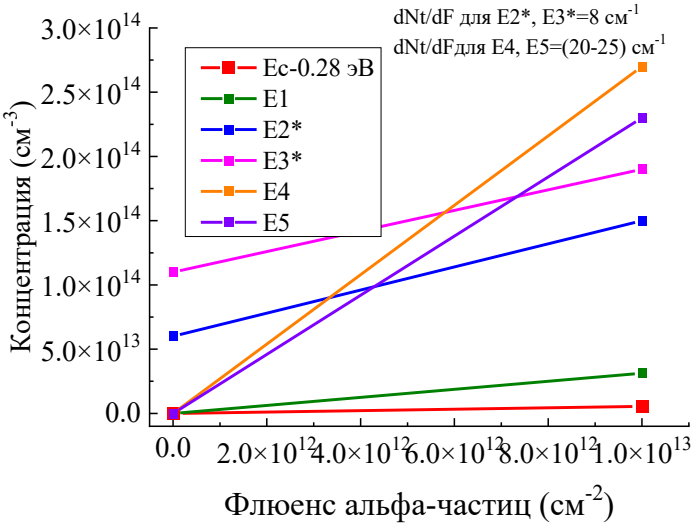
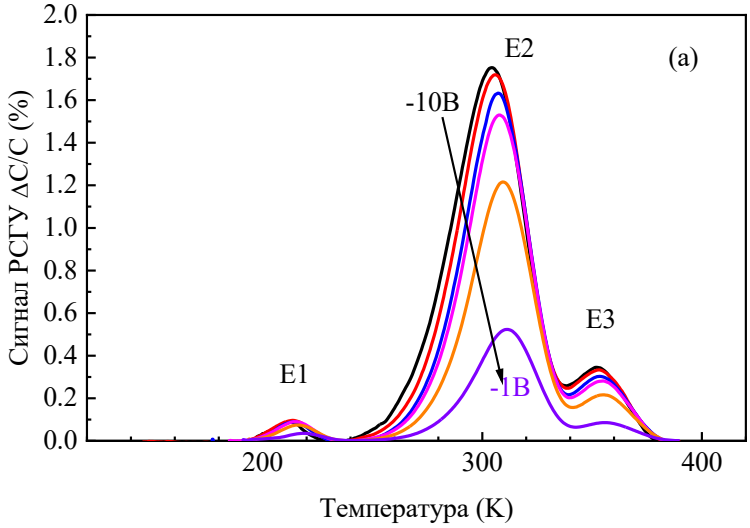



Рисунок 3 – Скорости введения основных дефектов при облучении альфа-частицами с энергией 18 МэВ

Показано, что суммарные скорости введения глубоких электронных и дырочных ловушек в результате облучения далеки от порядков чисел, необходимых для сопоставления со скоростями удаления носителей, если они обусловлены компенсацией. Определено, что причиной удаления носителей заряда является образование нейтральных комплексов между мелкими донорами и собственными точечными дефектами, возникающими при облучении, что было подтверждено результатом частичных отжигов глубоких центров при температурах выше 450 К после облучения, что свидетельствовало о развале нейтральных комплексов.

Во втором разделе **третьей главы** были проведены дополнительные исследования для выяснения природы часто наблюдаемых центров в выращенных и облученных образцах E1 ($E_c$-0,6 эВ), E2* ($E_c$-0,75 эВ), E2 ($E_c$-0,8 эВ) и E3 ($E_c$-(0,95-1,05) эВ). Для этого были измерены зависимости энергии активации глубоких центров и сечения захвата от величины прикладываемого электрического поля. На Рисунок 4 показаны снятые спектры РСГУ при смещениях от -1 до -10 В.



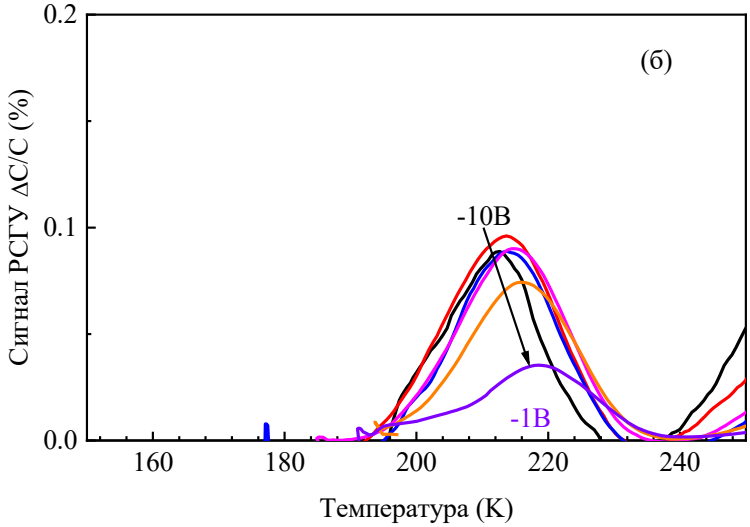




Рисунок 4 – (а) Спектры РСГУ, измеренные смещениях от -1 до -10 В, импульсе прямого смещения 0 В длительностью 50 мс, временные окна t1/t2 = 3,5 мс/35 мс, (б) спектр РСГУ для центра E1 в увеличенном масштабе

Зависимость энергии активации центра E1 от величины электрического поля соответствовала координатам Ea~[−(E)$^{1/2}$] (Рисунок 5), что характерно для излучения Пула–Френкеля из положительно заряженных (донорных) состояний [31]. Было показано, что центр E1 (Ec-0,6) является донорным центром в β-$Ga_2O_3$ n-типа. Если соотносить с результатами теоретических моделирований, E1 ($E_a$=0,64 эВ, $\sigma_n$=6,6·10$^{-13}$ см$^2$) является комплексом $Si_{Ga1}$-H или $Sn_{Ga2}$-H [32]. Для центра E2 ($E_a$=0,81 эВ, $\sigma_n$=8,6·10$^{-15}$ см$^2$) результаты стали подтверждением предыдущих исследований, где центры были определены как акцепторы Fe [24,33,34]. Центры E3 ($E_a$ =1,05 эВ, $\sigma_n$=4,1·10$^{13}$ см$^2$) был определен как глубокие доноры В образцах EFG β-$Ga_2O_3$ центр E3 связан с Ti [32].

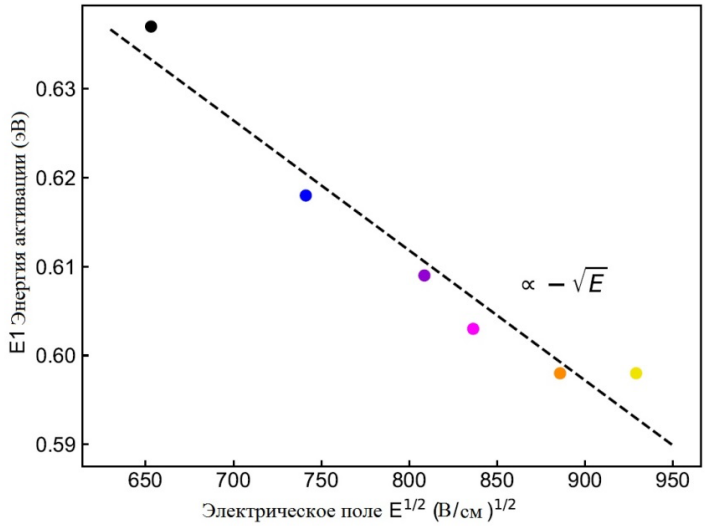



Рисунок 5- Зависимость энергия активации центра E1 от электрического поля

В третьем разделе **третьей главы** изучено влияние обработки водородной плазмой на формирование комплексов с водородом в эпитаксиальных пленках HVPE β-$Ga_2O_3$. Обработка водородной плазмой была проведена в двух режимах: «жесткий» режим с энергией падающих ионов 280 эВ и «мягкий» с энергией ионов 35 эВ. Результаты обработки для двух режимов значительно отличались. В «жестком» режиме, схожим с сухим травлением, верхний слой толщиной 2 мкм, соответствовавший глубине проникновения водорода, был полностью скомпенсирован (Рисунок **6**). Уровень Ферми после обработки был закреплен центрами Ec-1,05 эВ (E3*). Концентрация этих центров стала выше после обработки, что позволяет предположить, что это центр может быть комплексом с водородом, разваливающимся после отжига при 550 °C (Рисунок 7). Обработке в плазме в «мягких» условиях не вызвала повреждений поверхности, лишь незначительно увеличилась плотность мелких доноров у поверхности (Рисунок 8).

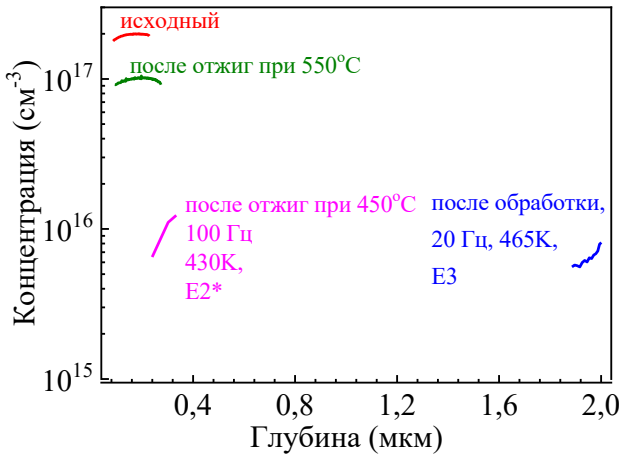



Рисунок 6 – Профили распределения концентрации при 300K, полученные из ВФХ

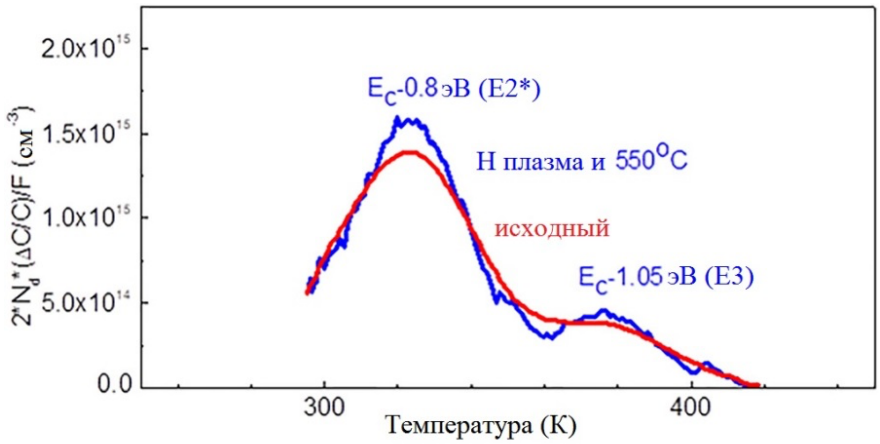



Рисунок 7 – Спектр РСГУ, измеренный для исходного образца (красная кривая) и после обработки в плазме и отжиге при 550 °C (синяя кривая); спектр измерен при смещении 5 В, импульсе прямого смещения 0В в течение 3 с и временных окнах 1,75 с/ 17,5 с

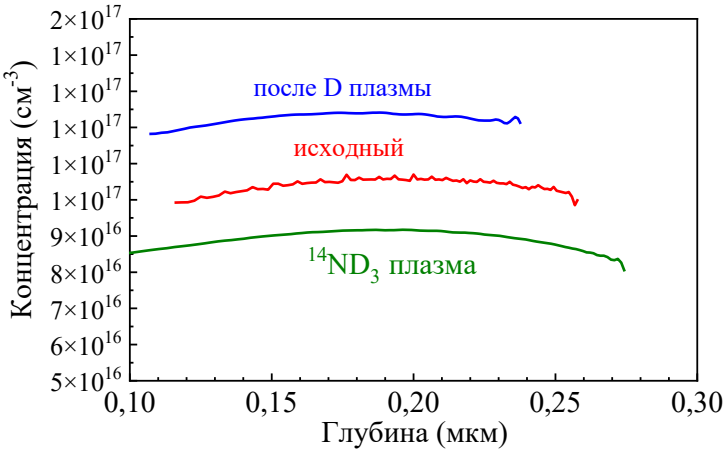
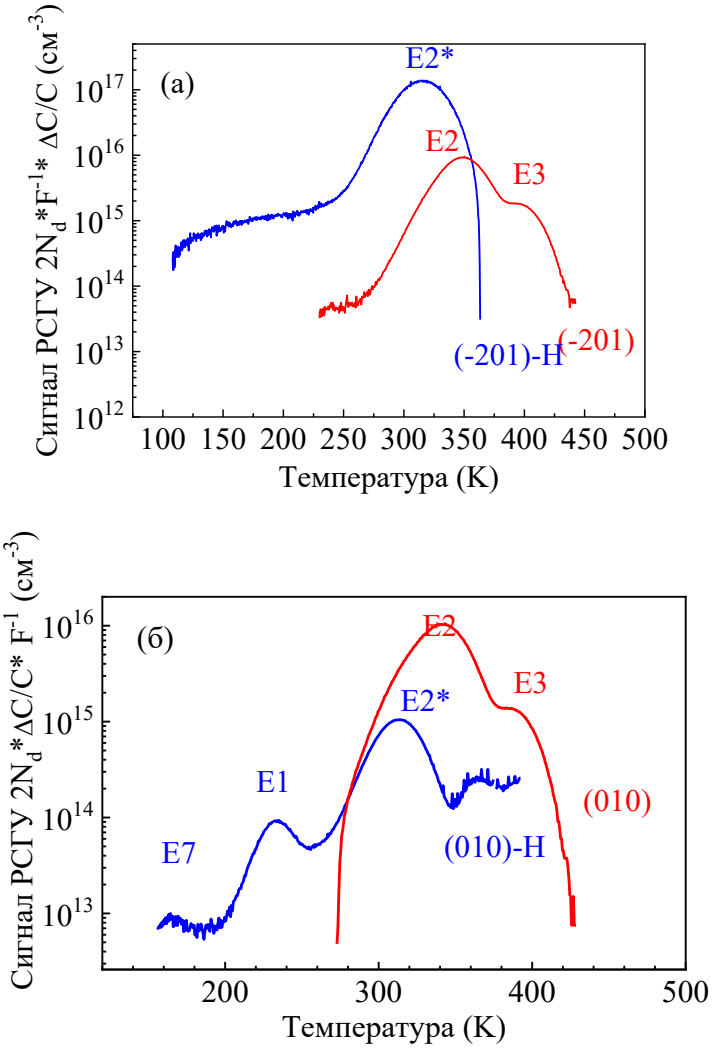



Рисунок 8 – Профили CV при комнатной температуре, измеренные до воздействия дейтерия и плазмы $^{14}ND_3$ (контрольный образец) и после такого воздействия

В четвертом разделе **третьей главы** исследована анизотропия свойств объемных кристаллов EFG β-$Ga_2O_3$ ориентаций (010) и ($\bar{2}$01) на примере обработки в водородной плазме и облучения протонами энергией 20 МэВ.

Результаты обработки в водородной плазме значительно отличались для двух ориентаций. Для образцов с ориентацией ($\bar{2}$01) обработка водородной плазмой преимущественно вводила мелкие доноры, пассивируя в приповерхностной области толщиной 1 мкм доминирующие акцепторы E2 и увеличивая концентрацию центров E2* (Рисунок 9(а)). Для образцов (010) обработка водородом приводила к заметному снижению чистой плотности мелких доноров в области толщиной 1 мкм, пассивируя акцепторы E2 и несколько снижая концентрацию центров E2* (Рисунок 9 (б)).




а) ($\bar{2}$01); б) (010)

Рисунок 9 – Спектры РСГУ, измеренные до и после обработки в плазме (смещение -2 В, импульс прямого смещения 0 В, длительность 50 мс, для временных окон t1 = 150 мс /t2 = 1500 мс для образца (010) до (красная линия) и после обработки в плазме (синяя линия)

Данные результаты можно объяснить предположением, что на поверхностях $(\bar{2}01)$ и (010) при жесткой плазменной обработке образуется разное количество вакансий Ga и в эти разноориентированные образцы внедряются разные концентрации ионов H. Тогда в одном случае можно получить преимущественно донорные комплексы $(V_{Ga}–4H)^+$ с энергией 20 мэВ для образцов $(\bar{2}01)$ (Рисунок 10), в то время как для ориентации (010) образуются преимущественно акцепторные комплексы $(V_{Ga}–2H)^–$, компенсирующие проводимость n-типа [35]. В обоих случаях подвижными частицами будут ионы $H^+$, образующие нейтральные комплексы с акцепторами Fe. Это могло бы объяснить наблюдаемую пассивацию акцепторов E2 для обеих ориентаций. Такая анизотропия свойств в результатах обработки плазмой связана с особенностью структуры β-$Ga_2O_3$, в которой существуют открытые каналы, идущие вдоль нормали к поверхности (010) и облегчающие легкое проникновение водорода вдоль этого направления.

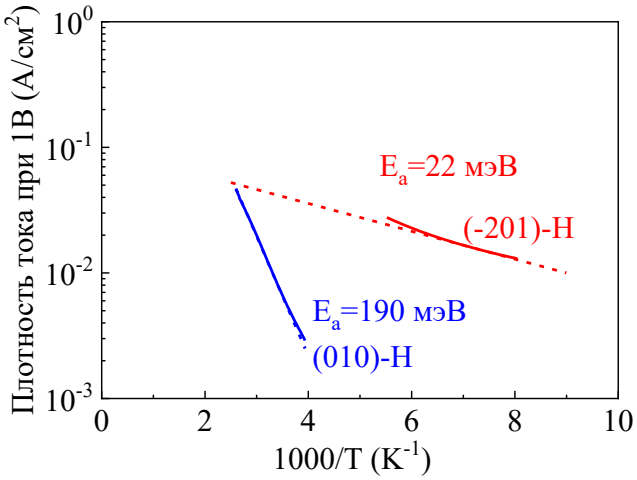



Рисунок 10 - Температурная зависимость прямого тока при положительном 1 В для обоих образцов после обработки в плазме

Облучение протонами энергией 20 МэВ объемных кристаллов EFG с ориентациями (010) и $(\bar{2}01)$ показало скорости удаления носителей 200 см$^{-1}$ для обеих ориентаций, что было схоже с результатами наблюдаемыми ранее при облучении плёнок HVPE β-$Ga_2O_3$. Глубоко внутри образцов (010) и $(\bar{2}01)$ основными электронными ловушками, введенными протонами, являлись центры EX1 (Ec-0,45 эВ) с более высокой концентрацией для ориентации (010) (рисунки Рисунок **11** и Рисунок **12**). Эти ловушки аналогичны ловушкам E1 (Ec-0,6 эВ) в образцах HVPE, но в последних доминирующими электронными ловушками были центры E2* (Ec-0,75 эВ) и E3* (Ec-1,1 эВ). Кроме того, в приповерхностной области облученного кристалла (010) вводились центры EX2* (Ec-0,27 эВ) в больших концентрациях, что приводило к возникновению гистерезиса на низкотемпературных ВАХ и ВФХ в зависимости от напряжения, при котором образец

охлаждался, и продолжительности и полярности прикладываемого импульса при низкой температуре. В кристалле с ориентацией $(\bar{2}01)$ видны ловушки EX2 аналогичные ловушкам EX2* для (010), но в гораздо меньшей концентрации, практически одинаковые в объеме и вблизи поверхности. Глубокие центры такого типа не являются доминирующими в облученных пленках HVPE, легированных кремнием.

Типы глубоких ловушек, обнаруженных в спектрах ВФХ при освещении для ориентации (010) и $(\bar{2}01)$ практически одинаковы, причем в этих спектрах преобладали центры с порогом оптической ионизации около 2,3 эВ. Концентрация этих ловушек, приписываемых расщепленным $V_{Ga}$, росла гораздо быстрее с увеличением флюенса потока протонов для ориентации (010), чем $(\bar{2}01)$, это объясняется наличием открытых каналов, идущих в направлении нормальном к поверхности (010), общее число компенсирующих глубоких акцепторов в облученных протонами образцах значительно меньше, чем наблюдаемая компенсация, для ориентаций (010) и $(\bar{2}01)$.

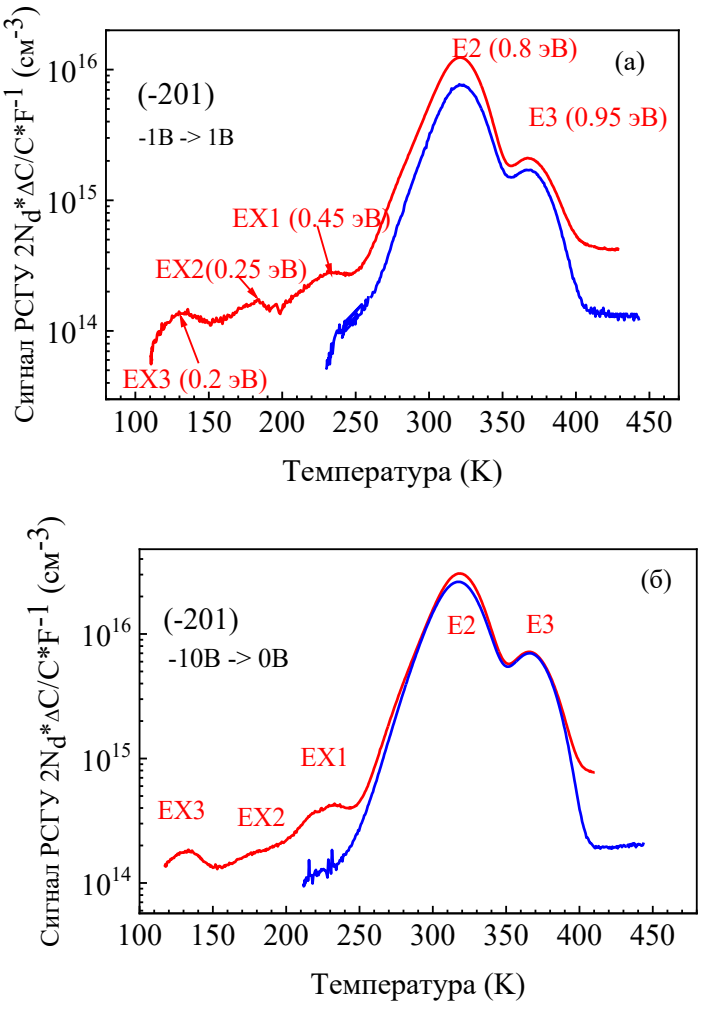



Рисунок 11– (а) Спектры РСГУ, измеренные для образца $(\bar{2}01)$ до (синяя линия) и после (красная линия) облучения протонами $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ энергией 20 МэВ; измерения при -1 В, с импульсом прямого смещения 1 В (длительностью 3 с), временными окнами 1,5 с/15 с; (б) при смещения -10В и импульсе заполнения -1В

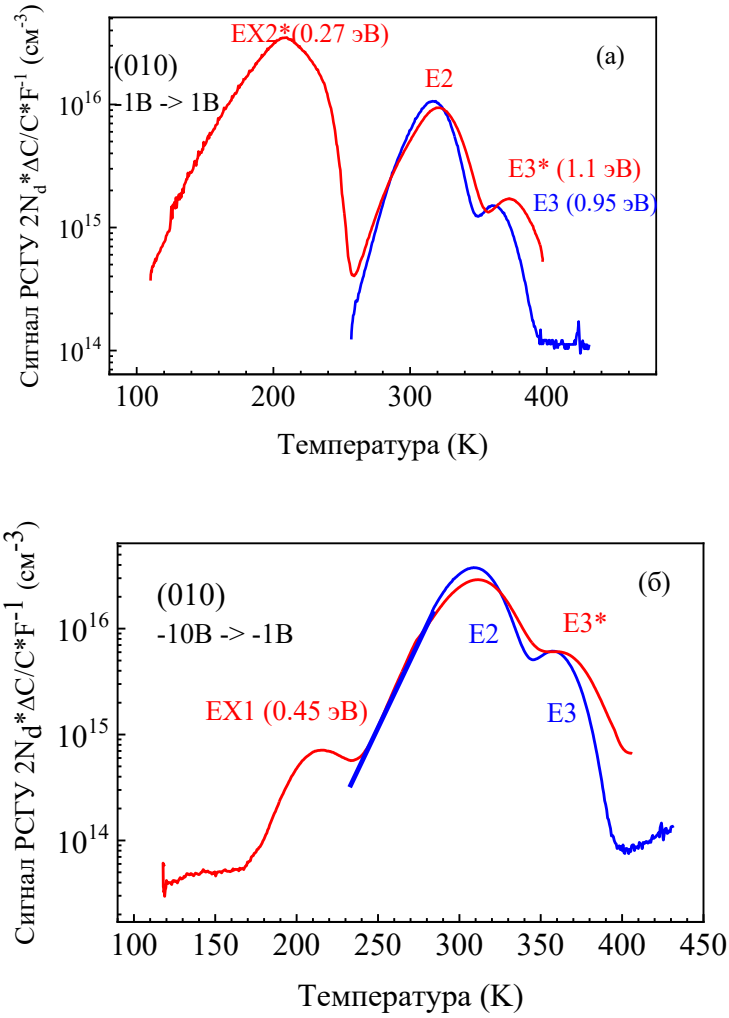



Рисунок 12 – (а) Спектры РСГУ, измеренные для образца (010) до (синяя линия) и после (красная линия) облучения протонами $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ энергией 20 МэВ; измерения при -1 В, с импульсом прямого смещения 1 В (длительностью 3 с), временными окнами 1,5 с/15 с; (б) при смещения -10В и импульсе заполнения -1В

В пятом разделе **третьей главы** изучено влияние обработки плазмой Ar на свойства пленок HVPE β-$Ga_2O_3$. Показано, что такая обработка приводит к ухудшению электрических свойствах верхней части пленки толщиной 100 нм, вводя в этой области глубокие центры E2* и E3* в больших концентрациях, чем в глубине образца (Рисунок 13). Также дополнительно образовывались центры с оптическим порогом ионизации 2,3 и 3,1 эВ, подобные тем, что образуются при облучении протонами и альфа-частицами.

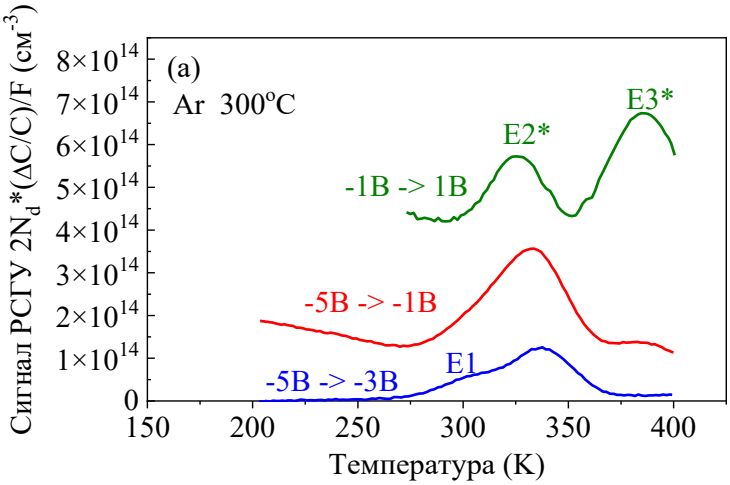



Рисунок 13 - Спектры РСГУ после обработки в плазме Ar при различных смещения; спектры приведены для временных окон $t_1/t_2$ = 1,75 с/17,5 с, длительность импульса 3 с

В шестом разделе **третьей главы** исследованы полуизолирующие слои β-$Ga_2O_3$ легированные Fe и Mg для рассмотрения возможности их применения в качестве буферного слоя в полевых транзисторах. Определено, что доминирующим глубоким центра в β-$Ga_2O_3$, легированном Fe, является акцепторный уровень Ec-0,8 эВ (E2) (Рисунок 14), который закрепляет уровень Ферми. Концентрация акцепторов Fe, заполненных электронами и определяющих протяженность области пространственного заряда в диодах Шоттки, составляет (1,4–1,8)·$10^{17}$ $см^{-3}$ и ниже концентрации введенного Fe $10^{18}$ $см^{-3}$. Присутствие такой высокой концентрации незаполненных акцепторов железа в буфере полевого транзистора может приводить к сильному неравновесному захвату электронов из канала при протекании тока, что в дальнейшем может привести к заметному коллапсу тока в импульсном режиме работы.

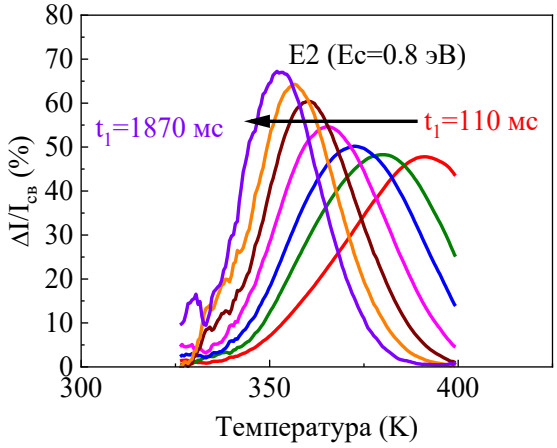



Рисунок 14 – Спектр ФИТРС для образца β-$Ga_2O_3$ (Fe) при смещении - 10 В, 365 нм (импульс 5 с) и с t1/t2 = 100 мс/50 мс, 220 мс/1100 мс, 330 мс/1650 мс, 550 мс/2750 мс, 880 мс/4400 мс, 1320 мс/6600 мс, 1870 мс/9350 мс

В объемном кристалле полуизолирующего $\beta$-$Ga_2O_3$(Mg), выращенного методом Чохральского, доминирующими центрами являются глубокие электронные центры с уровнем Ec-1,35 эВ, глубокие дырочные центры Ev+1,06 эВ, которые являются акцепторами Mg, и центры с оптическим порогом ионизации около 2,3 эВ (рисунок Рисунок **15**). Положение закрепления уровня Ферми определяется балансом между плотностью остаточных мелких доноров, глубоких электронных центров в верхней части запрещенной зоны и глубоких дырок в нижней части запрещенной зоны. В нашем случае уровень Ферми фиксируется центрами Ec-1,35 эВ, все центры ниже электронных ловушек Ec-1,35 эВ заполнены электронами в темноте и не должны вносить значительный вклад в коллапс тока в транзисторах.

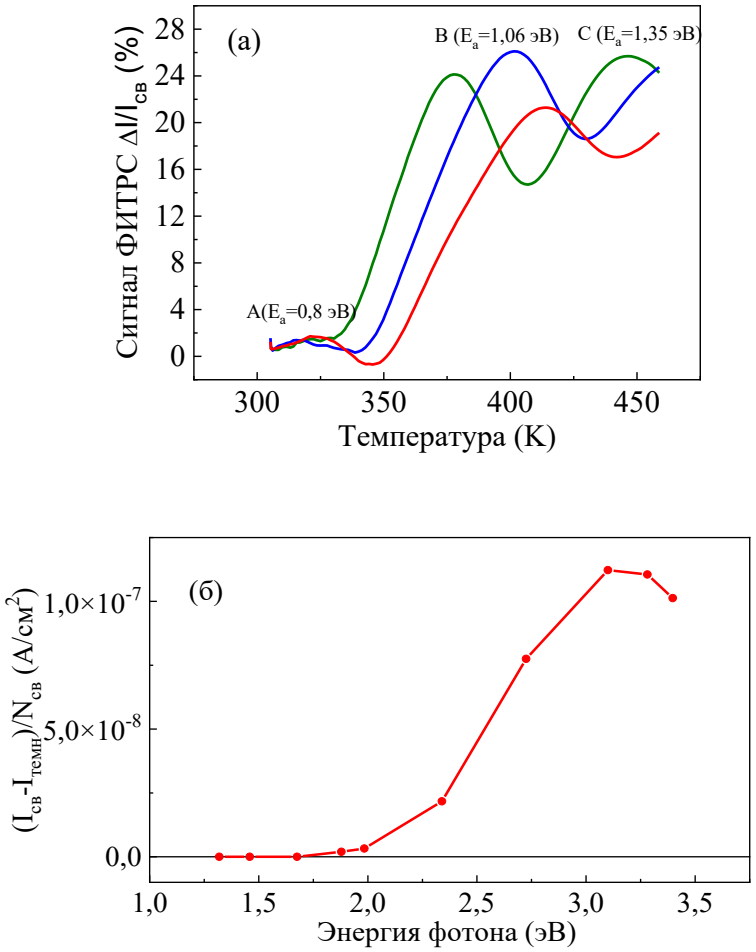



Рисунок 15 – (а) Спектры ФИТРС для образца β-$Ga_2O_3$ (Mg), измеренные при смещении -20 В, возбуждением светодиода 365 нм (импульс 5 с), с временными окнами 300 мс / 1500 мс (красная кривая), 900 мс / 4500 мс (синяя кривая), 7200 мс / 36000 мс (оливковая кривая); (б) спектральная зависимость фототока

**Общие выводы по работе**

В процессе подготовки диссертационной работы были достигнуты все поставленные цели и задачи.

В работе впервые экспериментально изучены спектры глубоких центров, вводимых в запрещённую зону β-$Ga_2O_3$ облучением протонами разных энергий, альфа-частицами, быстрыми нейтронами, выявлены центры, которые связаны с собственными точечными дефектами или их комплексами с примесными атомами (таблица 2), сопоставлены скорости введения концентраций глубоких доноров и акцепторов по всей глубине запрещённой зоны со скоростью удаления электронов; показано, что за скорость удаления электронов отвечает преимущественно образование электрически нейтральных комплексов доноров с вакансиями галлия; продемонстрирована высокая радиационная стойкость приборов на β-$Ga_2O_3$, сопоставимая или превышающая радиационную стойкость III-N, SiC, что очень важно для оценки перспектив силовой и солнечно-слепой электроники и фотоэлектроники на основе β-$Ga_2O_3$.

Исследования показали, что энергия связи малоподвижных поляронных состояний в β-$Ga_2O_3$ ниже предсказываемой теорией, при температурах выше 150 К преобладают свободные дырки в валентной зоне, способные участвовать в процессах переноса тока и фотопроводимости. Это принципиально важный момент, позволяющий надеяться получить приборы с биполярной проводимостью в системе $Ga_2O_3$ либо за счёт направленной модификации поверхностных свойств кристаллов, либо за счёт создания гетеропереходов.

В работе показано, что в образцах β-$Ga_2O_3$ ориентации (010) присутствуют каналы, нормальные к поверхности, с низкой атомной плотностью, способствующие облегчённому движению примесей и дефектов к поверхности и от поверхности и оказывающие большое влияние на процессы комплексообразования и диффузии. Это может приводит к эффективному образованию больших концентраций дефектов у поверхности образцов, облучённых протонами или обработанных водородной плазмой, и к появлению серьёзных метастабильностей в электрических характеристиках при низких температурах.

Анизотропия воздействия водородной плазмы на электрические характеристики кристаллов и плёнок β-$Ga_2O_3$ позволяет управлять образованием преимущественно доноров (в случае ориентации (-201)) или компенсирующих акцепторов (при ориентации (010)) и может быть при оптимизации концентрации водорода и вакансий галлия в принципе использована для получения на поверхности плёнки с дырочной проводимостью, как в случае высокотемпературных отжигов в молекулярном водороде.

На поверхностях ($\bar{2}01$) и (010) при плазменной обработке образуются разное количество вакансий Ga и в эти разноориентированные образцы внедряются разные концентрации ионов H, в одном случае можно получить преимущественно донорные комплексы $(V_{Ga}–4H)^+$ с энергией активации 20 мэВ, как в ($\bar{2}01$), а для (010) образуются акцепторные комплексы $(V_{Ga}–2H)^–$.

Также до проведения исследований уже было установлено, что в полевых транзисторах на основе β-$Ga_2O_3$ возможно получить очень привлекательные статические вольт-амперные характеристики, поэтому были исследованы высокоомные буферы. Детальные исследования, проведённые в работе, показали, что для получения полуизолирующих буферных слоев целесообразней использовать легирование Fe. Также очень полезно для создания высокоомных буферных слоёв, компенсированных железом, использовать пленки HVPE, имеющие гораздо меньшую концентрацию остаточных доноров, чем объёмные кристаллы.

**Список статей по теме диссертации, опубликованных в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science.**

**1.** A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, E.B. Yakimov, S.J. Pearton, Chaker Fares, Jiancheng Yang, Fan Ren, Jihyun Kim, P.B. Lagov, V.S. Stolbunov, **A.I. Kochkova**. Defects responsible for charge carrier removal and correlation with deep level introduction in irradiated β-$Ga_2O_3$ / Applied Physics Letters Applied Physics Letters// выпуск 9, том 13. – 2018. – номер статьи 092102.

2. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, S.J. Pearton, Fan Ren,A.V. Chernykh, **A.I. Kochkova**. Electrical properties of bulk semi-insulating β-$Ga_2O_3$(Fe) / Applied Physics Letters // выпуск 14, том 113. – 2018. – номер статьи 142102.

3. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, E.B. Yakimov,S.J. Pearton, Fan Ren, A.V. Chernykh, D. Gogova, **A.I. Kochkova**. Electrical Properties, Deep Trap and Luminescence Spectra in Semi-Insulating, Czochralski β-$Ga_2O_3$(Mg) / ECS Journal of Solid State Science and Technology // выпуск 7, том 8. – 2019. – с. 3019-3023.

4. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, A.V. Chernykh, E.B. Yakimov, **A.I. Kochkova**, A.N. Tereshchenko, S.J. Pearton. Electrical Properties, Deep Levels and Luminescence Related to Fe in Bulk Semi-Insulating β-$Ga_2O_3$ Doped with Fe / ECS Journal of Solid State Science and Technology // Выпуск 7, том 8. – 2019. – с. 3091-3096.

5. A.Y. Polyakov, In-Hwan Lee, N.B. Smirnov, E.B. Yakimov, I.V. Shchemerov, A.V. Chernykh, **A.I. Kochkova**, A.A. Vasile, F. Ren, P.H. Carey, S.J. Pearton. Hydrogen plasma

treatment of β-$Ga_2O_3$: Changes in electrical properties and deep trap spectra / Applied Physics Letters // Выпуск 3, том 115. – 2019. – номер статьи 032101.

6. A.Y. Polyakov, In-Hwan Lee, N.B. Smirnov, E.B. Yakimov, I.V. Shchemerov, A.V. Chernykh, **A.I. Kochkova**, A.A. Vasilev, P.H. Carey, F. Ren, David J. Smith, S.J. Pearton. Defects at the surface of β-$Ga_2O_3$ produced by Ar plasms exposure / APL Mater. // Том 7. – 2019. – номер статьи 061102.

7. A.Y. Polyakov, In-Hwan Lee, N.B. Smirnov, E.B. Yakimov, I.V. Shchemerov, A.V. Chernykh, **A.I. Kochkova**, A.A. Vasile, A.S. Shiko, F. Ren, P.H. Carey, S.J. Pearton. Effects of hydrogen plasma treatment condition on electrical properties of β-$Ga_2O_3$ / ECS Journal of Solid State Science and Technology // Выпуск 11, Том 8. – 2019. – с. 661-666.

8. A.Y. Polyakov, In-Hwan Lee, Andew Miakonkikh, A.V. Chernykh, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, **A.I. Kochkova**, A.A. Vasile, S.J. Pearton. Anisotropy of hydrogen plasma effects in bulk n-type β-$Ga_2O_3$ / Journal of Applied Physics // Выпуск 17, Том 127. – 2020. – номер статьи 175702.

9. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, A.A. Vasile, E.B. Yakimov, A.V. Chernykh, **A.I. Kochkova**, P.B. Lagov, Yu.S. Pavlov, O.F. Kukharchuk, A.A. Suvorov, N.S. Garani, In-Hwan Lee, Minghan Xian, Fan Ren, S.J. Pearton. Pulsed fast reactor neutron irradiation effects in Si doped n-type β-$Ga_2O_3$ / Journal of Physics D: Applied Physics // Выпуск 27, Том 53. – 2020. – номер статьи 274001.

10. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, A.A. Vasile, **A.I. Kochkova**, A.V. Chernykh, P.B. Lagov, Yu.S. Pavlov, V.S. Stolbunov, T.V. Kulevoy, I.V. Borzykh, In-Hwan Lee, Fan Ren, S.J. Pearton. Crystal orientation dependence of deep level spectra in proton irradiated bulk β-$Ga_2O_3$ / Выпуск 3, Том 130. – 2021. – номер статьи 035701.

11. A.Y. Polyakov, I.V. Shchemerov, A.A. Vasile, **A.I. Kochkova**, N.B. Smirnov, A.V. Chernykh, E.B. Yakimov, P.B. Lagov, Yu.S. Pavlov, E.M. Ivanov, O.G. Gorbatkova, A.S. Drenin, M.E. Letovaltseva, Minghan Xian, Fan Ren, Jihyun Kim, S.J. Pearton. 1 GeV proton damage in β-$Ga_2O_3$ / Journal of Applied Physics // Выпуск 18, Том 130. – 2021. – номер статьи 185701.

12. A.Y. Polyakov, **A.I. Kochkova**, Amanda Langørgen, Lasse Vines, A.A. Vasile, I.V. Shchemerov, A.A. Romanov, S.J. Pearton. On the possible nature of deep centers in $Ga_2O_3$ / Том 41. – 2023. – номер статьи 023401.

**Список цитируемой литературы:**

1. Ueda N. et al. Anisotropy of electrical and optical properties in β-Ga2O3 single crystals // Appl Phys Lett. American Institute of PhysicsAIP, 1998. Vol. 71, № 7. P. 933.
2. Xia Z. et al. Metal/BaTiO3/β-Ga2O3 Dielectric Heterojunction Diode with 5.7 MV/cm Breakdown Field // Appl. Phys. Lett. 2019. Vol. 115.
3. Guo D. et al. Review of Ga2O3-based optoelectronic devices // Materials Today Physics. Elsevier, 2019. Vol. 11. P. 100157.
4. Higashiwaki M., Jessen G.H. Guest Editorial: The dawn of gallium oxide microelectronics // Appl Phys Lett. AIP Publishing LLC AIP Publishing , 2018. Vol. 112, № 6. P. 060401.
5. Ping L.K. et al. Properties and perspectives of ultrawide bandgap Ga2O3 in optoelectronic applications // Chinese Journal of Physics. Elsevier, 2021. Vol. 73. P. 195–212.
6. Romanov A.E. et al. GALLIUM OXIDE: PROPERTIES AND APPLICA A REVIEW // Rev. Adv. Mater. Sci. 2016. Vol. 44. P. 63–86.
7. TAMURA CORPORATION β-$Ga_2O_3$ ｜タムラ製作所 [Electronic resource]. URL: https://www.tamuracorp.com/products/gao/index.html (accessed: 10.01.2022).
8. Galazka Z. et al. Scaling-Up of Bulk β-Ga2O3 Single Crystals by the Czochralski Method // ECS Journal of Solid State Science and Technology. The Electrochemical Society, 2017. Vol. 6, № 2. P. Q3007–Q3011.
9. Look D.C., Sizelove J.R. Dislocation Scattering in GaN // Phys Rev Lett. American Physical Society, 1999. Vol. 82, № 6. P. 1237.
10. Speck J.S., Rosner S.J. The role of threading dislocations in the physical properties of GaN and its alloys // Physica B Condens Matter. North-Holland, 1999. Vol. 273–274. P. 24–32.
11. Ghadi H. et al. Full bandgap defect state characterization of β-Ga2O3 grown by metal organic chemical vapor deposition // APL Mater. AIP Publishing LLCAIP Publishing, 2020. Vol. 8, № 2. P. 021111.
12. Ghadi H. et al. Influence of growth temperature on defect states throughout the bandgap of MOCVD-grown β-Ga2O3 // Appl Phys Lett. AIP Publishing LLC AIP Publishing , 2020. Vol. 117, № 17. P. 172106.
13. Neal A.T. et al. Incomplete Ionization of a 110 meV Unintentional Donor in β-Ga2O3 and its Effect on Power Devices // Scientific Reports 2017 7:1. Nature Publishing Group, 2017. Vol. 7, № 1. P. 1–7.
14. Ma N. et al. Intrinsic electron mobility limits in β-Ga2O3 // Appl Phys Lett. AIP Publishing LLC AIP Publishing , 2016. Vol. 109, № 21. P. 212101.
15. Polyakov A.Y., Shchemerov I. v, Vasilev A.A. 1 GeV proton damage in beta-Ga2O3 // J. Appl. Phys. 2021. Vol. 130. P. 185701.
16. Polyakov A Y et al. Pulsed fast reactor neutron irradiation effects in Si doped n-type β-Ga2O3 // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53. P. 274001.
17. Polyakov A.Y. et al. Hole traps and persistent photocapacitance in proton irradiated beta-Ga2O3 films doped with Si // APL Mater. 2018. Vol. 6. P. 96102.
18. Polyakov A.Y. et al. Defects responsible for charge carrier removal and correlation with deep level introduction in irradiated β-Ga2O3 // Appl Phys Lett. AIP Publishing LLC AIP Publishing , 2018. Vol. 113, № 9. P. 092102.
19. Polyakov A.Y. et al. Defects at the surface of β-Ga2O3 produced by Ar plasma exposure // APL Mater. AIP Publishing LLCAIP Publishing, 2019. Vol. 7, № 6. P. 061102.
20. Polyakov A.Y. et al. Effects of Hydrogen Plasma Treatment Condition on Electrical Properties of β-Ga2O3 // ECS Journal of Solid State Science and Technology. The Electrochemical Society, 2019. Vol. 8, № 11. P. P661–P666.
21. Polyakov A.Y. et al. Hydrogen plasma treatment of β-Ga2O3: Changes in electrical properties and deep trap spectra // Appl Phys Lett. American Institute of Physics Inc., 2019. Vol. 115, № 3.
22. Polyakov A.Y. et al. Anisotropy of hydrogen plasma effects in bulk n-type β-Ga2O3 // J Appl Phys. American Institute of Physics Inc., 2020. Vol. 127, № 17.

23. Polyakov A.Y. et al. Crystal orientation dependence of deep level spectra in proton irradiated bulk β-Ga2O3 // J Appl Phys. American Institute of Physics Inc., 2021. Vol. 130, № 3.
24. Polyakov Alexander et al. Electrical Properties, Deep Levels and Luminescence Related to Fe in Bulk Semi-Insulating β-Ga 2 O 3 Doped with Fe // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2019. Vol. 8, № 7. P. 3091–3096.
25. Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Shchemerov I. v. Electrical properties of bulk semi-insulating beta-Ga2O3 (Fe) // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 113. P. 142102.
26. Galazka Z. β-Ga2O3 for wide-bandgap electronics and optoelectronics // Semiconductor Science and Technology. Institute of Physics Publishing, 2018. Vol. 33, № 11.
27. Polyakov A.Y. et al. Electrical Properties, Deep Trap and Luminescence Spectra in Semi-Insulating, Czochralski β-Ga2O3 (Mg) // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2019. Vol. 8, № 7. P. 3019–3023.
28. Schroder Dieter. SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION. Third Edition. Tempe, AZ, USA: IEEE Press, A John Wiley and son, INC.
29. Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Lee I.-H. Deep level transient spectroscopy in III-Nitrides: Decreasing the effects of series resistance // J. Vac. Sci. Technol. B. 2015. Vol. 33. P. 61203.
30. Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P. SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010) // Nucl Instrum Methods Phys Res B. 2010. Vol. 268, № 11–12. P. 1818–1823.
31. Makram-Ebeid S., Lannoo M. Quantum model for phonon-assisted tunnel ionization of deep levels in a semiconductor // PHYSICAL REVIEW. 1982. Vol. 8.
32. Langørgen A. et al. Influence of heat treatments in H2 and Ar on the E1center in β-Ga2O3 // J Appl Phys. American Institute of Physics Inc., 2022. Vol. 131, № 11.
33. Polyakov A.Y. et al. Electric field dependence of major electron trap emission in bulk β-Ga2O3: Poole-Frenkel effect versus phonon-assisted tunneling // J Phys D Appl Phys. Institute of Physics Publishing, 2020. Vol. 53, № 30.
34. Ingebrigtsen M.E. et al. Iron and intrinsic deep level states in Ga2O3 // Appl Phys Lett. AIP Publishing LLC AIP Publishing , 2018. Vol. 112, № 4. P. 042104.
35. Islam M.M. et al. Chemical manipulation of hydrogen induced high p-type and n-type conductivity in Ga2O3 // Scientific Reports 2020 10:1. Nature Publishing Group, 2020. Vol. 10, № 1. P. 1–10.

Таблица 1 – Концентрации глубоких центров в исследуемых образцах до и после облучения

| Образец | Исходные концентрации $N_d$ ($см^{-3}$) | Концентрация глубоких уровней ($см^{-3}$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | E8 (Ec-0,28 эВ) $\sigma_n=6\cdot10^{-18}$ $см^{-2}$ | E1 (Ec-0,6 эВ) $\sigma_n=5{,}6\cdot10^{-15}$ $см^{-2}$) | E2* (Ec-0,75 эВ) $\sigma_n=6{,}5\cdot10^{-15}$ $см^{-2}$) | E2 (Ec-0,8 эВ) | E3* (Ec-(0,95-1,05) эВ, $\sigma_n=3{,}5\cdot10^{-14}$ $см^{-2}$) | E4 (Ec-1,2 эВ) $\sigma_n=5{,}4\cdot10^{-15}$ $см^{-2}$) | E5 (Ec-1,35 эВ, $\sigma_n=3\cdot10^{-12}$ $см^{-2}$) | 2,3 эВ | 3,1 эВ |
| Исходные образцы | $(1\text{-}4)\cdot10^{16}$ | - | $3{,}6\cdot10^{13}$ | $4{,}6\cdot10^{13}$ | $2{,}1\cdot10^{14}$ | $1{,}1\cdot10^{14}$ | $3\cdot10^{13}$ | | $2\cdot10^{14}$ | - |
| 1 Протоны 10 МэВ, $10^{14}$ $см^{-2}$ | $2{,}5\cdot10^{15}$ | | | $3{,}2\cdot10^{14}$ | | $2{,}3\cdot10^{14}$ | $4{,}5\cdot10^{14}$ | | $2{,}3\cdot10^{15}$ | |
| 2 Протоны 20 МэВ, $5\cdot10^{13}$ $см^{-2}$ | $1{,}6\cdot10^{16}$ | $5\cdot10^{13}$ | $8\cdot10^{13}$ | $2{,}8\cdot10^{14}$ | | $4\cdot10^{14}$ | $8\cdot10^{14}$ | | $3{,}5\cdot10^{15}$ | |
| 3 Протоны 20 МэВ $10^{14}$ $см^{-2}$ | $6\cdot10^{15}$ | $6\cdot10^{13}$ | $1{,}8\cdot10^{14}$ | $8\cdot10^{14}$ | | $9{,}5\cdot10^{14}$ | $8{,}2\cdot10^{14}$ | | $1{,}2\cdot10^{15}$ | $4\cdot10^{14}$ |
| 4 Альфа-частицы 18 МэВ $10^{13}$ $см^{-2}$ | $2{,}6\cdot10^{15}$ | $9\cdot10^{12}$ | $1{,}5\cdot10^{13}$ | $5\cdot10^{13}$ | | $4\cdot10^{13}$ | $6\cdot10^{13}$ | $4{,}7\cdot10^{13}$ | $8\cdot10^{14}$ | |
| 5 Нейтроны $3{,}6\cdot10^{14}$ $см^2$ | $3{,}1\cdot10^{15}$ | $4{,}6\cdot10^{12}$ | $2{,}7\cdot10^{13}$ | $1{,}8\cdot10^{14}$ | $2{,}2\cdot10^{14}$ | $1{,}8\cdot10^{14}$ | $1{,}6\cdot10^{14}$ | | $7{,}9\cdot10^{14}$ | $2{,}5\cdot10^{14}$ |
| 6 Протоны 1 ГэВ $4\cdot10^{13}$ $см^2$ | $6\cdot10^{15}$ | $10^{13}$ | $1{,}6\cdot10^{13}$ | $6\cdot10^{13}$ | $1\cdot10^{14}$ | $8\cdot10^{13}$ | - | | $7{,}5\cdot10^{14}$ | $2{,}8\cdot10^{14}$ |

Таблица 2 – Основные глубокие центры в β-$Ga_2O_3$

| **Обозначение центра** | **Энергия активации** | **Природа центра** | **Комментарий** | **Ссылка на опубликованную статью** |
|---|---|---|---|---|
| EX3 | Ec-0,2 эВ, $\sigma_n=1{,}2\cdot10^{-19}$ см$^2$ | собственный точечный дефект | в EFG β-$Ga_2O_3$ ($\bar{2}01$) после облучения протонами у поверхности | [10] |
| EX2/EX2* | Ec-0,25 эВ, $\sigma_n=4\cdot10^{-19}$ см$^2$ | $Sn_{GaII}$<br>акцептор | в EFG β-$Ga_2O_3$ ($\bar{2}01$) и (010) после облучения протонами<br>в приповерхностной области | [10] |
| E8 | Ec-0,28 эВ $\sigma_n=6\cdot10^{-18}$ см$^{-2}$ | собственный точечный дефект или комплекс | после облучений протонами, нейтронами, альфа-частицами и обработки в водородной плазме EFG β-$Ga_2O_3$ (010) | [1, 9] |
| EX1/ E1 | Ec-(0,45-0,6) 'D, $\sigma_n=5{,}5\cdot10^{-15}$ см$^2$ | комплексом $Si_{Ga1}$-H или $Sn_{Ga2}$-H<br>донор | в EFG β-$Ga_2O_3$ ($\bar{2}01$) и (010) после облучения протонами<br>равномерно по толщине в выращенных HVPE β-$Ga_2O_3$ после облучении протонами, обработки H и отжига в $H_2$ | [1, 8, 10, 12] |
| E2* | Ec-0,75 эВ $\sigma_n=6{,}5\cdot10^{-15}$ см$^{-2}$ | $V_{Ga}$-$V_O$ | после облучений протонами, нейтронами, альфа-частицами и обработки в водородной плазме | [1, 6-11] |
| E2 | Ec-0,8 эВ $\sigma_n=8{,}6\cdot10^{-15}$ см$^{-2}$ | $Fe_{GaII}$<br>акцептор | SI β-$Ga_2O_3$(Fe)<br>UID EFG β-$Ga_2O_3$<br>HVPE β-$Ga_2O_3$<br>CZ β-$Ga_2O_3$ (Mg) | [1-12] |
| E3* | Ec-(0,95-1,05) эВ, $\sigma_n=3{,}5\cdot10^{-14}$ см$^{-2}$ | комплекс с собственными точечными дефектами | наблюдается в выращенных пленках, после облучения протонами, нейтронами, альфа-частицами и обработки в водородной и аргоновой плазме, отжигается после 550 °C | [1, 5, 6, 7, 9 -11] |
| E3 | Ec-1,05 эВ, $\sigma_n=4\cdot10^{-13}$ см$^{-2}$ | $Ti_{GaII}$<br>донор | UID EFG β-$Ga_2O_3$ ($\bar{2}01$) | [8, 10, 12] |
| E4* | Ec-1,2 эВ $\sigma_n=5{,}4\cdot10^{-15}$ см$^{-2}$ | собственный точечный дефект | вводится при облучении протонами, нейтронами и альфа-частицами HVPE β-$Ga_2O_3$ | [1, 3, 9, 11] |
| E5 | Ec-1,35 эВ, $\sigma_n=3\cdot10^{-12}$ см$^{-2}$ | собственный точечный дефект | вводится при облучении альфа-частицами HVPE β-$Ga_2O_3$ | [1, 3, 9] |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Ev+1,06 эВ | Mg<br>акцептор | CZ β-$Ga_2O_3$ (Mg) | [3] |
| | 2,3 эВ | $V_{Ga}^{i}$<br><br>акцептор | обладает барьером для захвата электронов, содержится в исходных образцах, часто наблюдается после обработок и облучений | [1-12] |
| | 3,1 эВ | $V_{Ga}$<br><br>акцептор | содержится в исходных образцах, часто наблюдается после обработок и облучений | [1-12] |