

ИНН 5031149708, КПП 503101001, ОГРН 1235000015150
142432, Российская Федерация, Московская область, городской округ Черноголовка, город Черноголовка, проспект
академика Семенова, дом 9. Тел.: +7 (495) 993-37-57, 993-49-69, 993-49-42. Факс: +7 (496-52) 4-95-88
Электронная почта: efse@ezan.ac.ru Web-сайт: www.ezan.ac.ru

26.05.2023 № 1536/67

На _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

генеральный директор, д.т.н. А.В. Бородин
«19» мая 2023 г.
М.П.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Кочковой Анастасии Ильиничны
«Исследование электрических характеристик и спектров глубоких центров в кристаллах и
эпитаксиальных пленках β -Ga₂O₃»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников»

Актуальность темы

Оксид галлия (политип β -Ga₂O₃) привлекает особое внимание разработчиков электроники в качестве перспективного материала для создания новых полупроводниковых приборов с улучшенными характеристиками. По ширине запрещенной зоны (4.8 эВ) и величине пробивного электрического поля (8 МВ/см) β -Ga₂O₃ значительно превосходит не только кремний, но и традиционные широкозонные полупроводники, такие как SiC и GaN. В отличие от GaN и SiC, которые выращивают сублимационными методами, кристаллы β -Ga₂O₃ получают из расплава. Твердость оксида галлия значительно ниже твердости карбида кремния и близка к твердости кремния. Это означает, для его обработки можно использовать оборудование и технологии, предназначенные для производства подложек кремния. Эти два фактора существенно снижают себестоимость производства подложек и приборов. Благодаря большой ширине запрещенной зоны и величине пробивного электрического поля этот материал быстро занимает позиции для производства приборов в области силовой электроники, где требуются рекордно высокие напряжения и токи. Благодаря указанным характеристикам и возможности функционирования приборов на основе β -Ga₂O₃ при высоких температурах, этот материал быстро находит применение в военной технике. Особенно перспективно применение приборов в авиакосмической технике и СВЧ-электронике. Использование β -Ga₂O₃ для силовой электроники позволяет значительно уменьшить площадь прибора. По этому критерию β -Ga₂O₃ превосходит карбид кремния более чем в 5 раз, а нитрид галлия – более чем в 3 раза.

Для достижения высокой производительности и надежности полупроводниковых устройств на основе β -Ga₂O₃ крайне важно контролировать точечные дефекты кристаллов, включающие вакансии, междоузлия и примеси, поскольку эти дефекты могут оказывать

негативное и разрушительное воздействие на работу устройства. В некоторых случаях эти кристаллические дефекты могут даже вызывать ток утечки и более низкое напряжение пробоя. Таким образом, важно охарактеризовать дефекты в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и понять механизм их образования.

Актуальность диссертационной работы Кочковой А.И. не вызывает сомнений, так как посвящена экспериментальному исследованию электрически активных дефектов и примесей, создающих глубокие центры в запрещенной зоне в объемных кристаллах и эпитаксиальных пленках $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках реализации проекта «Новые радиационные явления в оксиде галлия и их применение в радиационных приборах» (№ 075-15-2022-1113), фонда РФ «Исследование электрически активных точечных и протяженных дефектов в новом широкозонном полупроводнике α - и $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, гетероструктурах и мембранах на их основе» (№ 19-19-00409), а также несколькими грантами НИТУ МИСИС.

Структура и основное содержание работы

Материалы диссертации изложены на 129 страницах, содержат 85 рисунков, 6 таблиц и 2 приложения. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и списка литературы, содержащего 117 источников.

Введение содержит общую характеристику работы: актуальность, научную новизну, краткую информацию об объекте и методы исследования, практическую значимость, личный вклад автора, публикации по теме диссертации, апробацию. Сформулированы основная цель и поставлены задачи работы, также указаны основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен подробный аналитический обзор научно-технической литературы, включающий в себя мотивацию исследования Ga_2O_3 , описаны кристаллическая и зонная структура материала, что важно для понимания необходимости проведения некоторых этапов диссертационного исследования. Дана информация о методах роста объемных кристаллов из расплавов и методах эпитаксиального роста исследуемого материала. На основе теоретических расчетов подробно рассмотрены типы мелких и глубоких центров в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$: донорные и акцепторные примеси, собственные точечные дефекты и комплексы. В результате детального анализа была осуществлена постановка задач, а именно был осуществлен выбор образцов и методов обработки для введения собственных точечных дефектов.

Во второй главе описаны исследованные образцы, методы их подготовки для электрической характеристики, способы обработки для введения собственных точечных дефектов или комплексов с собственными точечными дефектами. Автором описаны методики экспериментальных исследований проводящих и непроводящих слоев, в том числе вольт-фарадное профилирование, релаксационная спектроскопия глубоких уровней с электрическим и оптическим возбуждением, фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия глубоких уровней, адмиттанс спектроскопия. Дано описание измерительной установки, на которой были проведены основные исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе.

В третьей главе последовательно изложены все экспериментальные результаты исследований электрических свойств и спектров глубоких центров в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

В первом пункте третьей главы подробно описаны основные глубокие центры присутствующие в выращенных эпитаксиальных пленках и центры, возникающие после облучений протонами, нейтронами, альфа-частицами. В результате сравнения спектров глубоких центров, зависимости концентрации введения центров от дозы облучения и теоретических расчетов определена природа основных глубоких центров в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в верхней половине запрещенной зоны методом РСГУ и в нижней половине запрещенной

зоны по измерению спектральной зависимости фотоиндуцированных носителей заряда. Все образцы показали компенсацию электронной проводимости, что также было изучено автором и было доказано, что за компенсацию отвечает образование нейтральных комплексов с вакансиями галлия.

Во втором пункте третьей главы исследована природа основных глубоких центров по полевой зависимости энергии активации при изменении величины прикладываемого электрического поля.

В третьем пункте третьей главы приведены результаты сравнений условий обработки в водородной плазме на электрические свойства поверхности и введение комплексов с водородом.

В четвертом пункте третьей главы приведены результаты изучения анизотропии свойств объемных кристаллов β -Ga₂O₃ ориентаций (010) и (-201). Проведена обработка в водородной плазме и облучение протонами, сняты спектры глубоких центров у поверхности и в объеме образцов, проведено сравнение свойств для двух ориентаций. Показана взаимосвязь концентрации и глубины введения дефектов с ориентацией кристалла.

В пятом пункте третьей главы приведены результаты изучения обработки в аргоновой плазме на свойства глубоких центров в β -Ga₂O₃. Показано, что физическая составляющая воздействия плазмы заключается в повреждении поверхности образца.

В шестом пункте третьей главы исследованы полуизолирующие образцы β -Ga₂O₃, легированные Mg и Fe. Установлено расположение легирующих примесей в запрещенной зоне, изучены другие глубокие центры в образцах. Оценена возможность применения таких полуизолирующих слоев в полевых транзисторах с буферным слоем.

Завершают диссертационную работу общие выводы, позволяющие объективно оценить значимость проведенных исследований.

Научная новизна диссертационной работы

В диссертационной работе впервые получены следующие наиболее важные научные результаты.

1. По сведению спектров и концентраций глубоких центров до и после облучений и обработок определена природа основных центров, выявлены глубокие центры, связанные с собственными точечными дефектами и с примесями.
2. По полевой зависимости энергии активации, определено, что основные центры E1 и E3 являются донорами, центр E2 - акцептором.
3. Показано, что за компенсацию электронной проводимости при облучении протонами, альфа-частицами, нейтронами отвечает формирование нейтральных комплексов вакансий галлия с мелкими донорами.
4. Проведено исследование влияния ориентации на введение точечных дефектов, для этого сравнены ориентации (010) и (-201), показано, что введение точечных дефектов и проникновения H эффективней для ориентации (010) и связана с наличием открытых каналов, идущие вдоль нормали к поверхности (010).
5. Изучено влияние обработки в водородной плазме, в результате чего показана возможность получения акцепторных и донорных комплексов вакансий галлия с водородом.
6. Экспериментально исследованы буферные слои, легированные Fe и Mg, определены глубокие центры в таких образцах.

Практическая значимость работы заключается в возможности использовать полученные результаты при:

1. Контролируемом легировании β -Ga₂O₃, данные диссертации дают понимание, какие центры могут компенсировать легирующую примесь.

2. Для оценки перспектив создания гетеропреходов очень важен тот факт, что дырки в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, хотя действительно образуют связанные малоподвижные поляронные состояния, однако эти состояния распадаются с образованием свободных дырок.
3. Результаты получения комплексов водорода с вакансиями галлия при обработке водородной плазмой могут быть использованы для получения проводящих поверхностных слоев n- или p-типа.
4. Результаты исследований могут быть использованы при разработке приборов на основе оксида галлия.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов исследования: вольт-фарадного профилирования, релаксационной спектроскопии глубоких уровней, адмиттанс спектроскопии, фотоэлектрической релаксационной спектроскопии, а также достаточно большой выборкой экспериментальных образцов, способов введения глубоких центров, объемом измерений, непротиворечивостью результатам проводившихся ранее исследований другими научными зарубежными группами.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям, публикации и апробация

Выполнены все требования, предъявляемые к диссертации. Проведен подробный анализ литературных данных, относящихся к теме диссертационных исследований, установлены цели и задачи исследования. Экспериментальные результаты представлены четко, в виде графиков, таблиц и с подробным текстовым описанием. Работа написана понятным языком, подробно иллюстрирована. Диссертация и автореферат содержат все необходимые разделы и соответствуют друг другу.

По материалам диссертации опубликовано 12 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, сделано 4 доклада на международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

К недостаткам по содержанию диссертации и автореферата следует отнести следующее:

1. При выполнении диссертационной работы в качестве объектов исследования использованы образцы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, полученные различными методами выращивания. Но не приведены сравнительные результаты исследований для образцов одного типа, но выращенных различными способами.
2. На рисунке 26 автором комментируется пик, обозначенный H1 (STH1), связанный с переходом дырки из состояния сильно связанных малоподвижных поляронных состояний в «нормальные» дырки. Однако, на рисунке обозначен другой пик STH2, очевидно обладающий меньшей энергией, который никак не прокомментирован автором.
3. При определении механизмов и причин компенсации электронной проводимости автор сравнивает разные величины: скорости введения дефектов, концентрации вакансий, скорости удаления, следовало бы оперировать только одними величинами для удобства читателей. Также представляется недостаточно обоснованным вывод о распаде комплексов вакансий галлия с мелкими донорами, ответственными за удаление носителей заряда после 400°C . Автору следовало бы провести последовательные измерения спектров РСГУ после каждого цикла отжига, чтоб изучить спектры глубоких центров после

развала комплексов, образующихся после облучений высокоэнергетическими частицами.

4. Незначительное замечание к точности использования терминов. Словосочетание «гашение замороженной фотоемкости» (стр. 49), похожее на прямой перевод с английского, следовало бы подробнее разъяснить в тексте диссертационной работы.
5. На стр. 102 представлена структура транзистора и в тексте описаны результаты измерения: «показана задержка тока стока, гистерезис поверхностных характеристик и сдвиг порогового напряжения, вызванные неравновесным захватом на глубокие центры», однако автор не приводит никаких графиков для подтверждения.

Указанные замечания не снижают теоретической и практической значимости выполненных исследований, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленной цели и задачам.

Заключение

Диссертационная работа «Исследование электрических характеристик и спектров глубоких центров в кристаллах и эпитаксиальных пленках $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ » соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Кочкова Анастасия Ильинична, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

Отзыв составлен и принят на основании анализа диссертации, автореферата, публикаций Кочковой А.И. и обсуждения презентации доклада Кочковой А.И. на научно-техническом совете Акционерного общества «Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро Российской академии наук» (АО «ЭЗАН») 19 мая 2023 года, протокол № 2/23.

Председатель научно-технического совета,
Чл.-корр. РАН



В.А. Бородин

Рецензент,
Нач. отдела технологий роста кристаллов
и новых материалов, к.ф.-м. н.



М.В. Юдин

Секретарь научно-технического совета,
к.ф.-м. н.



А.В. Веретенников