

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Кочковой Анастасии Ильиничны на тему «**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», состоявшейся в НИТУ «МИСиС» 19.06.2023 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» 10.04.2023, протокол № 10.

Диссертация выполнена на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников (ППЭиФПП) и в лаборатории ультраширокозонных полупроводников (ЛУШП) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Поляков Александр Яковлевич, к.т.н., профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников и заведующий лабораторией ультраширокозонных полупроводников Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Министерства науки и высшего образования РФ.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» (протокол № 10 от 10.04.2023 г.) в составе:

1. Ховайло Владимир Васильевич – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС – председатель комиссии;
2. Мухин Сергей Иванович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС;
3. Таперо Константин Иванович - д.т.н., с.н.с., заместитель генерального директора по науке и инновациям АО «Научно-исследовательский институт приборов», ГК «Росатом»;
4. Карасёв Платон Александрович – д.ф.-м.н., профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;
5. Мармалюк Александр Анатольевич – д.т.н., Начальник НТЦ Акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха», АК «Ростех».

В качестве ведущей организации утверждено Акционерное общество «Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро Российской академии наук», г. Черноголовка.

Экспертная комиссия отмечает, что в работе соискателя:

- Впервые проведено 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 -Ga₂O₃. 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). Показано, что связанные поляронные состояния дырок, хотя действительно образуются, но распадаются, превращаясь в свободные дырки при температурах выше примерно 150 К. Впервые определена природа основных центров E1 в β -Ga₂O₃ по полевой зависимости скорости эмиссии.

- Впервые выполнено качественное и количественное исследование влияния ориентации (010) и ($\bar{2}01$) на введение точечных дефектов и показано, что для приборных структур наиболее предпочтительна ориентация ($\bar{2}01$). Анизотропия дефектообразования у поверхности образцов связана 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 $E_c-0,27$ эВ, приводящих к серьезной метастабильности вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, отсутствующей для кристаллов с ориентацией ($\bar{2}01$).

- 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. 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.

- Экспериментальные исследования полуизолирующих слоев, легированных Fe и Mg, показали, что использование Fe вносит меньший вклад в коллапс тока в результате захвата электронов из канала транзистора.

Научная и практическая значимость исследования заключается:

- в получении методами емкостной спектроскопии характеристик спектров глубоких центров как в выращенных образцах β -Ga₂O₃, так и в обработанных различными способами (облучение протонами, нейтронами, альфа-частицами, обработка в водородной и аргоновой плазме), что помогло идентифицировать электрически активные дефекты;

- показано, что связанные поляронные состояния дырок распадаются, переходя в «обычные» дырки при температурах выше 150 К, что очень важно для оценки перспектив создания приборов с p-n-переходом;

- определено, что за компенсацию донорной примеси в результате облучения высокоэнергетическими частицами отвечает образование комплексов вакансий галлия с мелкими донорами;

- выявлено эффективное дефектообразование для ориентации (010) в результате облучения протонами по сравнению спектров глубоких центров для ориентаций (010) и ($\bar{2}01$);

- изучена эффективность компенсации остаточной донорной проводимости акцепторов примесями Mg и Fe, проведена оценка их потенциального применения в транзисторах, определена целесообразность применения легирования Fe.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

достоверность научных результатов подтверждается использованием современных методов исследования электрических свойств и спектров глубоких центров. Степень достоверности представленных количественных данных определяется инструментальной погрешностью

используемого оборудования и хорошо согласуется с результатами теоретических расчетов и данными других исследовательских групп.

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.

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ в рецензируемых научных журналах, входящих в базы Scopus и Web of Science.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук НИТУ «МИСиС» соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Кочковой Анастасии Ильиничны соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», так как в ней на основании выполненных автором исследований содержится описание результатов комплексных экспериментальных исследований электрически активных дефектов и примесей в объемных кристаллах EFG ориентаций (010) и (-201) и эпитаксиальных пленках HVPE. Полученные в работе результаты имеют важное научное значение и являются перспективными в решении практических задач.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Кочковой Анастасии Ильиничне ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



В.В. Ховайло