

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

ЗИНОВЬЕВ РОМАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В GAN СВЕТОДИОДАХ

Специальность:
01.04.10 – Физика полупроводников

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.т.н., профессор А.Я. Поляков

Москва – 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

Светодиодные структуры на основе нитридов III группы в настоящее время масштабно используются практически во всех областях науки и техники.

Светодиоды с множественными квантовыми ямами (МКЯ) GaN / InGaN являются основой эффективных источников света в спектральных диапазонах от желто-зеленого до ближнего УФ.

Зеленые и синие светодиоды очень важны для получения мощных белых источников света для общего освещения, а также в качестве индикаторов в экстремальных условиях.

УФ светодиоды находят различные применения в медицине, современной литографии, 3D-печати, а также в системах защиты и безопасности.

Актуальность работы определяется, прежде всего, отсутствием законченных представлений о механизмах безызлучательной рекомбинации и утечки светодиодов с множественными квантовыми ямами, а также о механизмах деградации и преждевременного сбоя, что существенно сказывается на текущих характеристиках и параметрах приборов. Выяснение и развитие этих представлений важны для технологических совершенствований и оптимизации роста светодиодных структур.

Цель настоящей работы заключалась в развитии глубокого понимания роли глубоких уровней в снижении эффективности и электролюминесценции современных нитрид галлиевых светодиодов с квантовыми ямами от ультрафиолетового, до синего и зеленого спектров, а также выявление механизмов деградации во время ускоренного старения и возможных источников или индикаторов ожидаемого сбоя светодиодов без прохождения сложной процедуры испытаний с длительными наработками.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие

основные задачи:

1. Изучить основные механизмы рекомбинации в нитриде галлия, источники снижения эффективности светодиодов данного материала, последние теоретические расчеты основных дефектов и достижения в технологическом процессе приборов.

2. Определить взаимосвязь между концентрацией ловушек и временем жизни носителей заряда в нелегированном n-GaN с помощью контролируемого введения точечных дефектов и установить, какие ловушки контролируют время жизни в облученном образце.

3. Сравнить глубокие уровни электронов и дырок для светодиодных МКЯ-структур с различным составом In в широком диапазоне от 5% (светодиоды УФ) до 25% (зеленые светодиоды), определить зависимости в спектрах ловушек и сопоставить с глубокими уровнями наблюдаемыми в чистом n-GaN.

4. Определить влияние внедрения слоя наностолбиков GaN, заполненного наночастицами SiO₂, в зеленых светодиодах на их основные характеристики, свойства и спектры ГУ.

5. Исследовать влияние повышенных электрических нагрузок на поведение светодиодов ближнего ультрафиолета, выяснить основные механизмы деградации и установить взаимосвязь со спектрами глубоких ловушек, шумовыми характеристиками и внешней квантовой эффективностью.

6. Исследовать влияние радиационного введения дефектов в светодиодах ближнего ультрафиолетового, синего и зеленого спектров на электролюминесценцию.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые изучено влияние облучения электронами с энергией 6 МэВ при комнатной температуре на концентрацию доноров, диффузионную длину и спектры глубоких ловушек для нелегированного HVPE n-GaN.

2. Впервые комплексно исследованы дефекты ультрафиолетовых, синих и зеленых светодиодов и сопоставлены с ловушками чистого n-GaN с помощью

процедуры выравнивания относительно уровня вакуума.

3. Проведено качественное и количественное сравнение GaN/InGaN МКЯ светодиодов с наночастицами SiO₂ со стандартно выращенными GaN/InGaN светодиодами.

4. Выявлены основные механизмы деградации и источники шума светодиодов ближнего ультрафиолета.

5. Экспериментально исследованы и проанализированы основные источники безызлучательной рекомбинации в светодиодах ближнего УФ, синего и зеленого спектров с помощью облучения электронами высоких энергий.

Практическая ценность результатов работы состоит в следующем:

1. Экспериментально определены главные дефекты, контролирующие время жизни носителей заряда и определяющие эффективность светодиодов. Глубокое понимание роли тех или иных дефектов в структурах с множественными квантовыми ямами оказывает положительное влияние на процесс производства светоизлучающих структур и на индустрию твердотельной оптоэлектроники в целом.

2. Используемые режимы испытаний ускоренного старения применимы для выявления срока службы светодиодов и быстрого обнаружения брака.

3. Показано как радиационные испытания позволяют контролируемо находить взаимосвязь концентрации введенных дефектов с характеристиками приборов.

4. Полученные в работе экспериментальные результаты имеют практическое значение для прогнозирования работы светодиодов при эксплуатации в условиях повышенных электрических, температурных нагрузок и радиационного излучения.

5. Выводы, сделанные в данной работе, могут быть использованы как физические основы для технологических совершенствований и оптимизации процессов роста светоизлучающих структур.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что в n-GaN с плотностью дислокаций менее $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ диффузионные длины неравновесных носителей заряда определяются не плотностью дислокаций, а присутствием точечных дефектов с глубокими уровнями. Предложены методы выявления таких центров в спектрах РСГУ. Для плёнок и кристаллов n-GaN, выращенных методами MOCVD с латеральным зарращиванием (ELOG, pendeo), HVPE такими дефектами являются центры с уровнями около $E_c - 0.6 \text{ эВ}$, а при высоких концентрациях дефектов, создаваемых облучением - центры с уровнем около $E_c - 1 \text{ эВ}$, связанные с междоузельными азотными акцепторами;

2. Методами РСГУ проведены детальные исследования спектров глубоких электронных и дырочных ловушек в светодиодных структурах с множественными квантовыми ямами GaN/InGaN, излучающими в ближней УФ, синей и зелёной областях спектра. Установлено, что имеется система основных электронных и дырочных ловушек, присутствующих во всех таких светодиодных структурах, причём положение уровней в светодиодах с различными значениями ширины запрещённой зоны в КЯ примерно привязано к положению уровня вакуума. На основании сопоставления глубины основных электронных и дырочных ловушек в СД с уровнями ловушек в n-GaN предположено, что основные электронные ловушки в СД связаны с акцепторными состояниями междоузельного азота, N_i^- , а основные дырочные ловушки связаны с акцепторными комплексами вакансий галлия с примесными донорами, $(V_{\text{Ga}}-D)^{2-}$;

3. На основании сопоставления деградации оптической мощности светодиодов ближнего УФ диапазона при облучении высокоэнергетическими электронами с изменениями спектров глубоких электронных и дырочных ловушек в светодиодах ближнего УФ, синего, зелёного спектральных диапазонов выяснено, что корреляция с изменениями оптической мощности наблюдается лишь для электронных ловушек, связанных с N_i^- в КЯ и барьерах активной МКЯ области. Первые являются центрами безызлучательной

рекомбинации в КЯ и непосредственно влияют на уменьшение эффективности электролюминесценции. Вторые снижают эффективность инъекции носителей в КЯ за счёт усиления рекомбинации инжектированных электронов и дырок в барьерах. Основные дырочные ловушки не оказывают непосредственного влияния на эффективность излучательной рекомбинации в КЯ, но оказывают опосредованное влияние на эффективность инъекции, усиливая прилипание инжектированных дырок в квантовых ямах и барьерах, а также способствуя росту утечек тока в СД посредством туннелирования;

4. Выяснено, что в СД ближнего УФ диапазона неоптимальные методы выращивания, ведущие к росту концентрации дырочных ловушек и появлению избыточных утечек в ВАХ, способствуют неоднородному протеканию тока через структуру и локальному перегреву прибора, в результате которых наблюдается преждевременный отказ СД при длительной наработке в жёстких условиях (повышенная температура, большие плотности тока инъекции). Это наблюдение совпадает с закономерностями поведения синих светодиодов, обнаруженными прежде другими исследователями, и позволяет производить первичную разбраковку выращенных структур, выявляя такие, которые не выдержат испытаний на надёжность и долговечность при электрическом стрессе;

5. Установлено, что снижение плотности дислокаций и упругих напряжений, происходящее при заращивании структур с наностолбиками, ведёт к снижению концентрации центров безызлучательной рекомбинации и повышению эффективности электролюминесценции структур, излучающих в синем и зелёном диапазонах спектра.

Апробация работы

Основные результаты, представленные в диссертации, доложены на следующих научных конференциях и семинарах: 11-я Всероссийская конференция Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы, 01 - 03 февраля 2017, Москва, Россия.

Личный вклад автора в получении научных результатов

Часть экспериментальной работы проведена автором лично. Вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в непосредственном участии на всех этапах работы от постановки задачи до обсуждения результатов. Автору принадлежит анализ существующих литературных данных, реализация основных экспериментальных подходов, интерпретации, обобщения и анализ полученных результатов, формулировки основных положений.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 8 статей в зарубежных научных журналах, утвержденных ВАК РФ.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и списка используемых источников. Работа содержит 45 рисунков и 2 таблицы. Список используемой литературы включает 107 наименований. Общий объем диссертации составляет 147 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, ее научная новизна и практическая ценность.

В первой главе рассмотрены имеющиеся литературные данные по физическим процессам, происходящим в объемном нитриде галлия и в квантовых ямах. Проанализировано множество проблем InGaN/GaN светодиодов, включающих низкую внешнюю квантовую эффективность (EQE), высокий спад эффективности при больших токах, быструю деградацию характеристик и относительно низкую надежность приборов.

Показано, что дислокации могут являться как центрами рассеяния, так и центрами безызлучательной рекомбинации, но в наиболее совершенных светодиодных структурах с плотностями дислокаций менее $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ наибольшую роль в снижении эффективности играют точечные дефекты. Какие точечные дефекты ответственны за снижение эффективности и деградацию InGaN/GaN светодиодов от УФ до синего и зеленого спектров до сих пор комплексно и систематически не изучалось.

Во второй главе описаны методики исследования глубоких уровней, используемые в данной работе. Описана методика измерения вольт-фарадного профилирования и получения пространственного распределения заряда в квантовых ямах. Измерения вольт-фарадного профилирования позволяют получить подходящие режимы измерений глубоких центров, позволяющие собирать сигнал из области квантовых ям.

Описаны методы адмиттанс-спектроскопии, емкостной и оптической РСГУ, с помощью которых проводились исследования глубоких уровней в образцах до и после облучения. Описана методика спектроскопии низкочастотных шумов, которая применялась для исследования процессов деградации.

В третьей главе приведены экспериментальные результаты исследований механизмов рекомбинации в n-GaN и в МКЯ структурах с различным

содержанием индия в квантовых ямах.

Показано, что при облучении нелегированного n-GaN электронами с энергией 6 МэВ при комнатной температуре изменения концентрации доноров, диффузионной длины и спектров глубоких ловушек начинаются при пороге флюенса $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (рисунок 1). Длина диффузии после данного флюенса уменьшается в 3 раза, что сопровождается резким увеличением плотности глубоких электронных ловушек с уровнем вблизи $E_c - 1 \text{ эВ}$.

Основные обнаруженные глубокие уровни представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные найденные ловушки электронов и дырок.

Уровень ловушки(эВ)	Условное название	Возможное происхождение
$E_c - 0,15$	ET2	Распространённый радиационный дефект, азотная вакансия V_N
$E_c - 0,2$	ET3	Распространённый радиационный дефект, V_N , двойной центр
$E_c - 0,56$	ET10	Дефект, ограничивающий время жизни в n-GaN, доминирующий в неполярных пленках GaN
$E_c - 0,8$	ET12	Ga_i донор, распространённый радиационный дефект
$E_c - 1$	ET14	N_i акцептор, распространённый радиационный дефект
$E_c - 1,3$	ET15	Распространенный в n-GaN, приписываемый междуузельному углероду C_i
$E_v + 0,9$	HT1	Акцепторные комплексы V_{Ga-D} либо акцепторы углерода замещения C_N
$E_v + 1,2$	HT5	Акцепторные комплексы вакансий Ga и кислорода V_{Ga-O}

Определена тесная корреляция между изменениями плотности этих ловушек и квадратом величины диффузионной длины, с наклоном, очень близким к 1 в облученном n-GaN, что указывает на то, что данные центры контролируют время жизни облученного n-GaN (рисунок 1). В исходном материале наоборот, время жизни контролировалось другими глубокими ловушками электронов при $E_c - 0,56 \text{ эВ}$, концентрация которых не сильно зависит от облучения электронами высоких энергий. Концентрации дырочных ловушек тоже были высокими и увеличивались при облучении. Однако диффузионные длины в n-GaN не связаны с изменениями плотности дырочных

ловушек и их сечения захвата были малы (кроме ловушек НТ5).

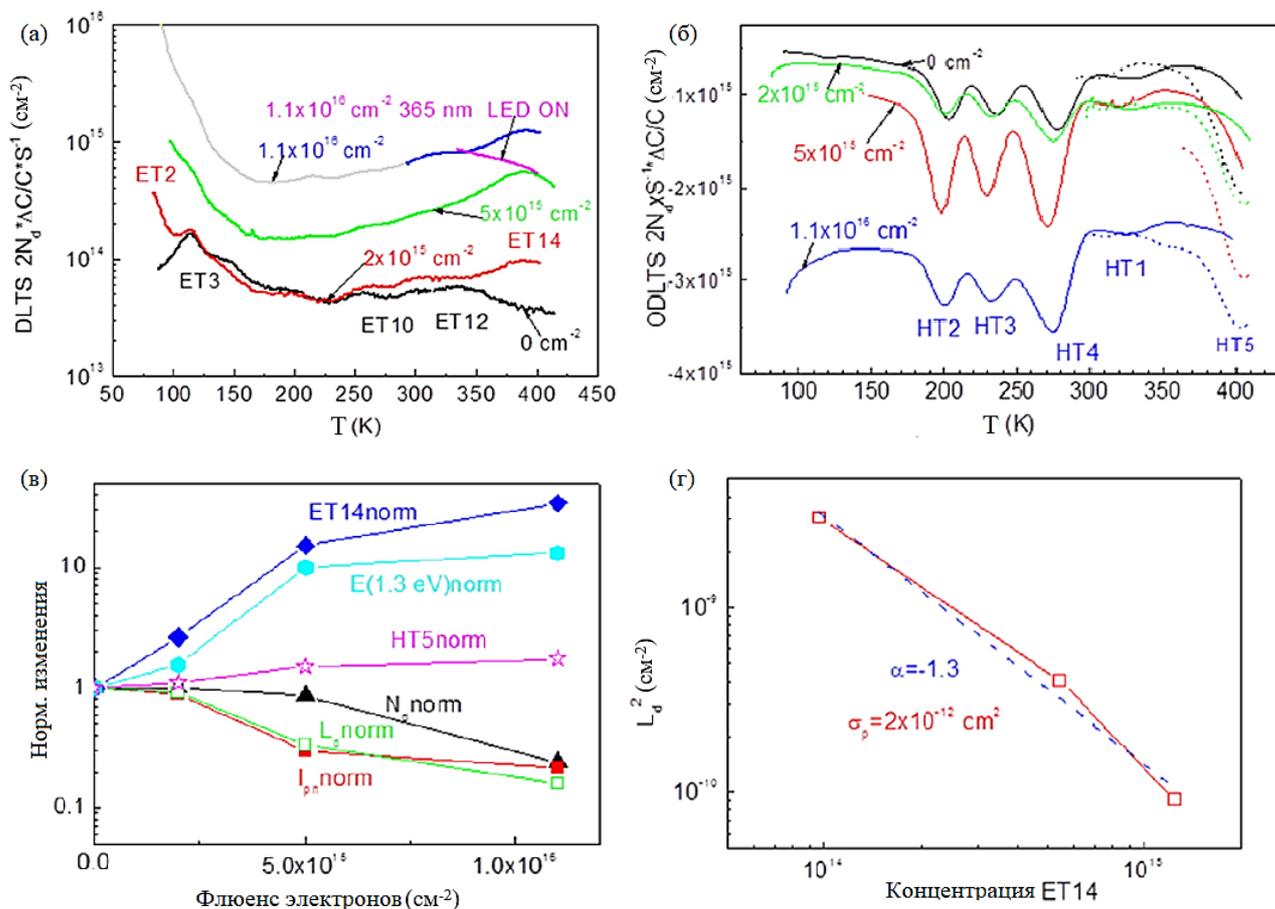


Рисунок 1 – Спектры РСГУ, измеренные при -1 В, с прямым импульсом 1 В, длительностью 2 с и временным окном $t_1/t_2 = 750 \text{ мс} / 7500 \text{ мс}$ (а); Спектры ОРСГУ, снятые при -1 В, с импульсом светодиода 365 нм, длительностью 5 с и временными окнами $t_1/t_2 = 100 \text{ мс} / 1000 \text{ мс}$ (сплошные линии) и $5 \text{ с} / 50 \text{ с}$ (пунктирные линии) до облучения, после флюенсов $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $1,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (б); изменения параметров образца (концентрация доноров $N_{d, norm}$, фототок $I_{ph, norm}$, диффузионная длина $L_{d, norm}$, концентрации $E_c - 1 \text{ эВ}$ и $E_c - 1,3 \text{ эВ}$) при облучении, нормированные к параметрам до облучения (в); корреляция между квадратом диффузионной длины и концентрацией электронных ловушек $E_c - 1 \text{ эВ}$ (г).

Плотность ловушек $E_c - 1,3 \text{ эВ}$ также существенно возросла после облучения. Тем не менее, было замечено, что сильные изменения их концентрации оказывают лишь незначительное влияние на измеренные значения диффузионной длины.

Исследования светодиодов на основе GaN с множественными квантовыми ямами, работающих в областях ближнего УФ (385 нм), синего

(445 нм) и зеленого (515 нм) спектральных диапазонов показали большое разнообразие ловушек, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Основные ловушки, обнаруженные в светодиодных структурах

Тип светодиода	Уровень ловушки (эВ)	Сечение захвата (см ²)	Расположение
Зеленый	$E_c - 0,27$	3.7×10^{-15}	КЯ
	$E_v + 0,45$	1.7×10^{-15}	КЯ
Синий	$E_c - 0,5$	1.9×10^{-17}	КЯ
	$E_c - 0,6$	2×10^{-15}	GaN барьер
	$E_v + 0,65$	1.3×10^{-15}	КЯ
	$E_v + 0,95$	6.7×10^{-13}	GaN барьер
Ультрафиолетовый	$E_c - 0,6$	2×10^{-15}	GaN барьер
	$E_c - 0,8$	1.2×10^{-16}	КЯ
	$E_v + 0,75$	7×10^{-15}	КЯ

Дырочные ловушки $E_v + 0,75$ эВ, $E_v + 0,65$ эВ и $E_v + 0,45$ эВ, обнаруженные в квантовых ямах (КЯ) светодиодов УФ, синего и зеленого световых диапазонов соответственно, аналогичны центрам $E_v + 0,9$ эВ, найденным в эпитаксиальных пленках n-GaN. Электронные ловушки при $E_c - 0,8$ эВ в УФ, $E_c - 0,5$ эВ в синих и $E_c - 0,27$ эВ в зеленых светодиодах, очевидно, находятся в КЯ InGaN. Их уровни хорошо выравниваются относительно уровня вакуума (рисунок 2). Наиболее вероятным аналогом таких уровней в n-GaN является центр $E_c - 1$ эВ, часто приписываемый акцепторам междоузельного азота N_i^- , который, как было показано ранее, является эффективным убийцей времени жизни, когда его концентрация высока. Электронные ловушки $E_c - 0,6$ эВ, обнаруженные в РСГУ-спектрах УФ и синих светодиодов, аналогичны основным дефектам, определяющим время жизни, в выращенных MOCVD пленках n-GaN и, скорее всего, расположены в GaN-барьерах МКЯ-структур (составы КЯ в УФ и синих светодиодах очень разные).

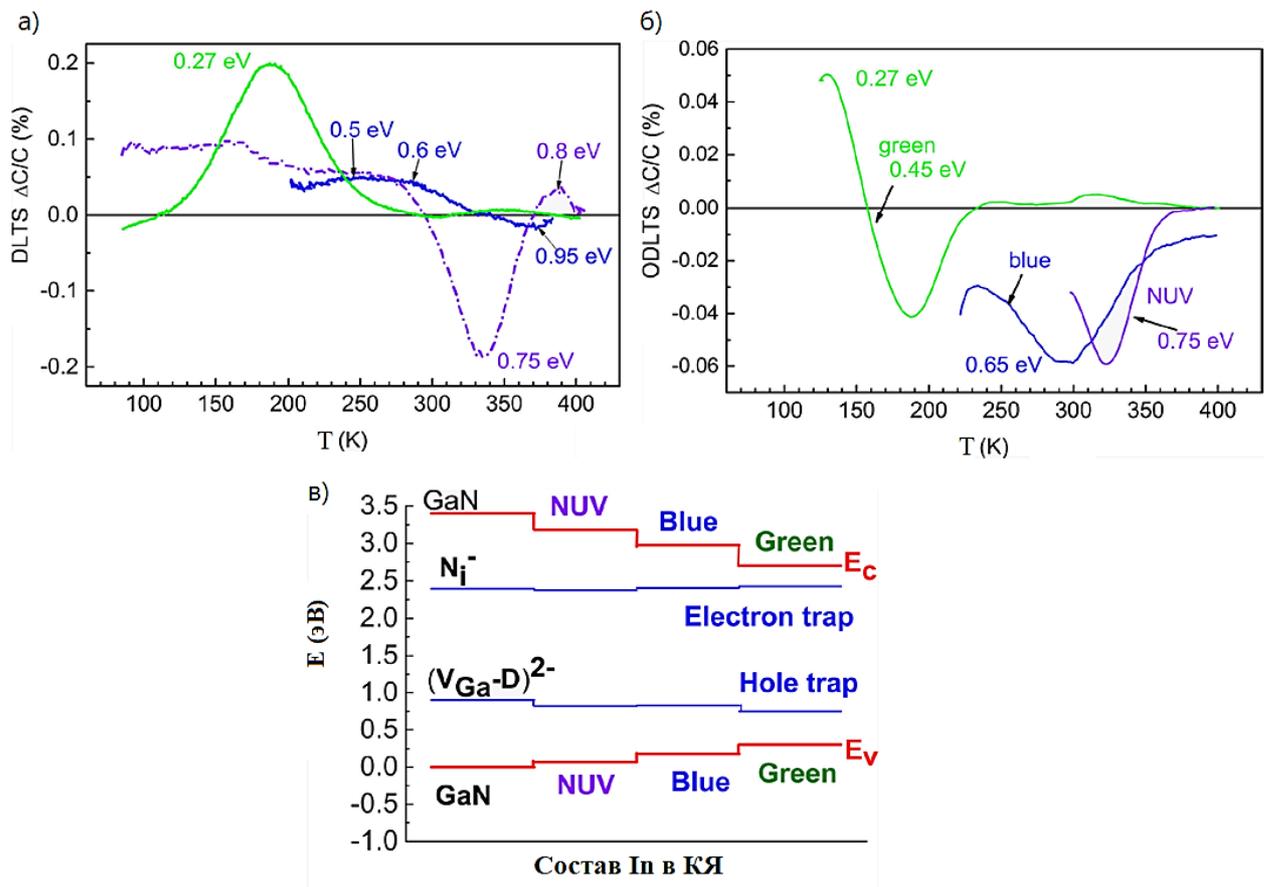


Рисунок 2 – Спектры РСГУ зеленого, синего и УФ светодиодов при +0,5 В (для зеленого и синего) и -0,5 В (для ближнего УФ). Импульс напряжения во всех случаях +3 В, длительностью 2 с (а); спектры ОРСГУ с освещением в квантовых ямах для СД зеленого, синего и УФ (б); выравнивание глубоких уровней электронных и дырочных ловушек в запрещенных зонах соответствующих светодиодов и p-GaN (в).

В четвертой главе приведены результаты исследования различных факторов, влияющих на рекомбинационные процессы в МКЯ структурах.

При изучении влияния внедрения слоя GaN с наночастицами SiO₂, вставленного в контактный слой p⁺-GaN, на электрические свойства, электролюминесценцию, фотолюминесценцию, спектры адмиттанса и спектры глубоких уровней зеленых GaN/InGaN светодиодов, выращенных методом MOCVD на узорчатых сапфировых подложках, было обнаружено, что интенсивность ФЛ и ЭЛ для светодиодов SiO₂ заметно увеличена по сравнению с эталонными светодиодами без подслоя наностолбиков, что коррелирует с уменьшением концентрации электронных E_c - 0,27 эВ и дырочных E_v + 0,45 эВ ловушек, расположенных в квантовых ямах InGaN

(рисунок 3). Это объясняется улучшением качества кристаллов и более низкой деформации аналогично тому, как это наблюдалось ранее для синих светодиодов с внедренным заросшим подслоем наночастиц SiO₂.

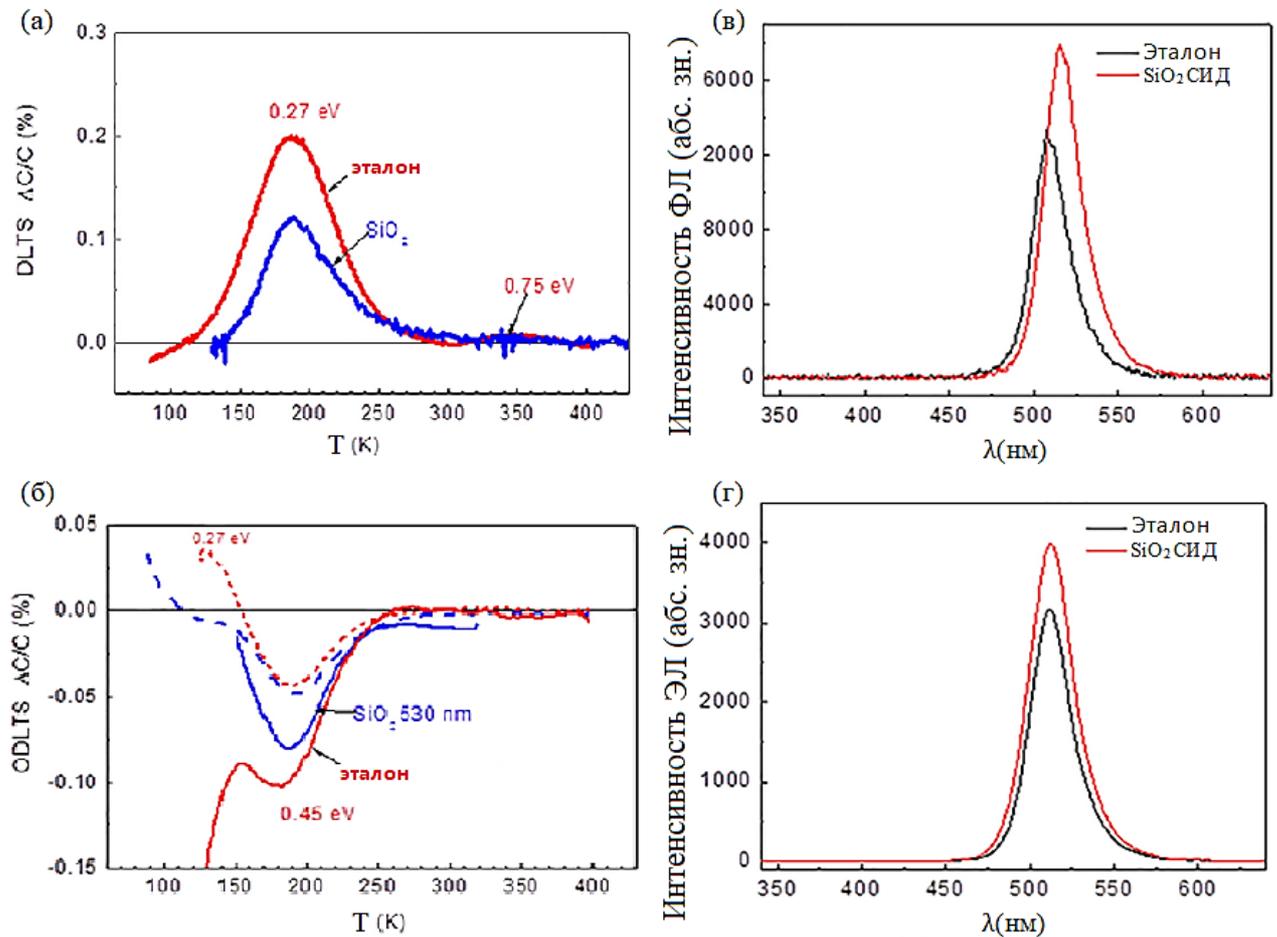


Рисунок 3 – Спектры РСГУ (а) и ОРСГУ (б) эталонного светодиода и светодиода SiO₂; спектры ФЛ при комнатной температуре для эталонного и SiO₂ светодиодов (в); спектры ЭЛ данных светодиодов, измеренные при токе 100 мА (г).

Зависимость концентрации заряженных центров от напряжения и расстояния до р-п-перехода, определяемая с помощью метода вольт-фарадного профилирования, показана соответственно на рисунках 4 (а) и 4 (б). Граница области пространственного заряда при смещении 0 В расположена ниже самой крайней квантовой ямы, и область квантовых ям в профилях может быть обнаружена только путем приложения положительных напряжений. В области отрицательных напряжений видна сверхрешётка, лежащая за КЯ.

Спектры адмиттанса (рисунок 4 в и г) показали три ступеньки в емкости

и три пика в проводимости. Пик 0,13 эВ обусловлен вымораживанием акцепторов Mg в p-GaN. Ловушки 0,27 эВ и 0,075 эВ, скорее всего, расположены в области квантовых ям.

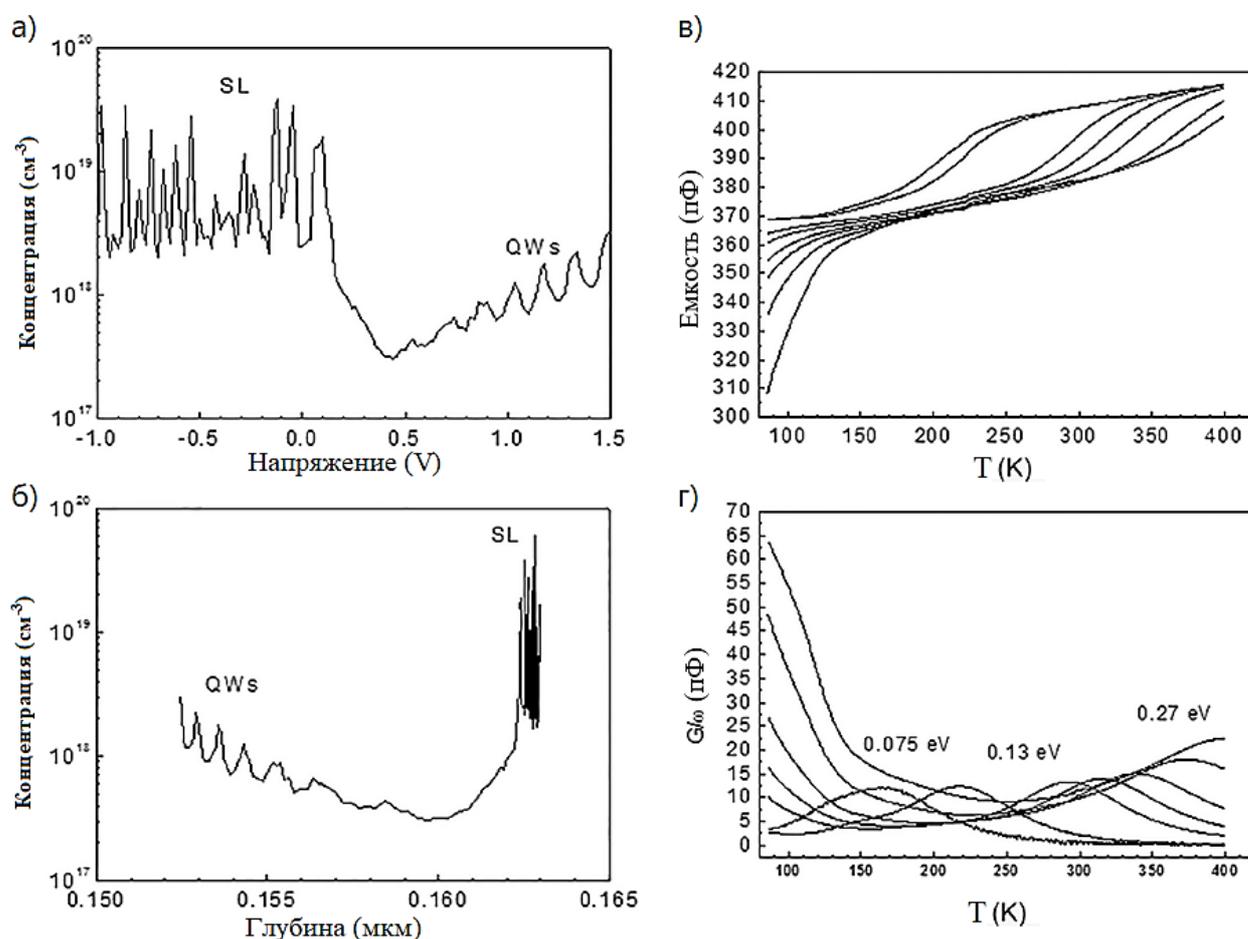


Рисунок 4 –Зависимость концентрации от напряжения для эталонного светодиода (а); зависимость концентрации от расстояния до рп-перехода (б); температурные зависимости емкости на частотах 5 кГц (самая верхняя кривая), 50, 100, 200, 500 и 1000 кГц (самая нижняя кривая) (в); температурные зависимости G / ω для соответствующих частот (5 кГц - самая левая кривая, 1000 кГц - самая правая кривая) (г).

Электрические нагрузки GaN / InGaN светодиодов ближнего УФ (390–395 нм) при высоком прямом токе 650 мА и повышенной температуре 110 °С показали значительное ухудшение внешней квантовой эффективности, что связано с образованием $E_c - 0,8$ эВ ловушек междоузельного азота. Зависимость спектральной плотности шума тока S_I от прямого тока I_f показала две области перед ускоренным старением (рисунок 5). Область $S_I \sim I_f$

обусловлена протеканием тока через дислокационные каналы утечки (шум в данной области показал явный характер $1/f$), а $S_I \sim I_f^2$ связана с генерационно-рекомбинационным шумом, вызванным состояниями $E_c - 0,8$ эВ и дырочными ловушками $E_v + 0,75$ эВ в области пространственного заряда (спектральная плотность шума показала явное плато в зависимости от частоты).

Электрические нагрузки в течение 922 часов не изменяли EQE, но постепенно стал увеличиваться как обратный, так и прямой ток утечки. Это сопровождалось постепенным увеличением плотности только дырочных ловушек.

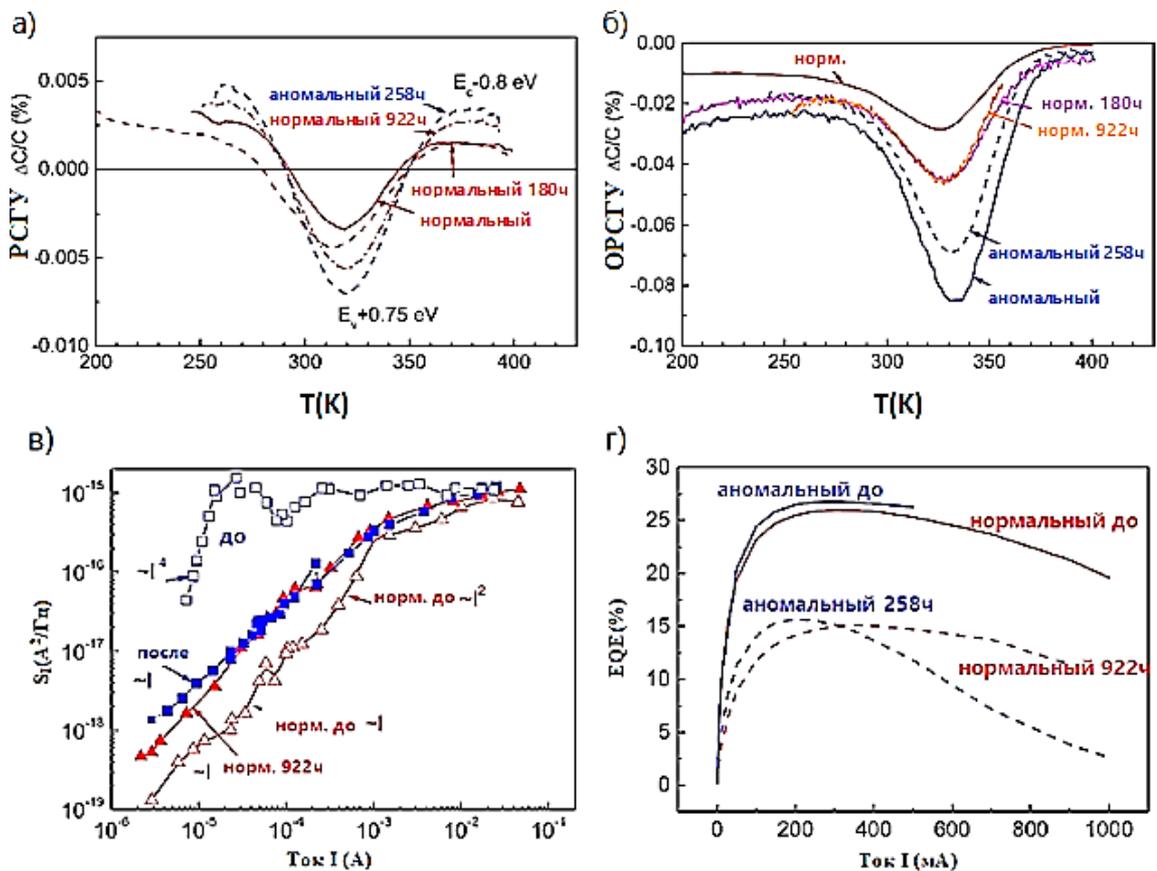


Рисунок 5 – Спектры РСГУ при +0,5 В, с импульсом прямого смещения 2 В до нагрузок, после 180ч и 922ч, и для «аномального» светодиода после 258 ч (исходный спектр был аналогичен исходному спектру «нормального» светодиода) (а); ОРСГУ-спектры с освещением мощным светодиодом 3,4 эВ до нагрузок, после 180 ч и 922 ч (б); зависимость спектральной плотности шума от действующего тока до и после 922 ч при 650 мА и 110 °С (в); зависимость EQE УФ светодиодов от действующего тока до и после 922 ч (г).

Предположительным механизмом является смещение атомов Ga и In, с последующим декорированием дислокаций, которые образуют локальные каналы утечки.

Как видно из рисунка 5 (г), после нагрузок более 922 часов, пик EQE уменьшился с 26% до 15% («нормальные» светодиоды показали относительно низкий спад EQE с увеличением прямого тока), что сопровождалось дальнейшим увеличением тока утечки и плотности обоих типов ловушек. Один из 20 исследованных диодов показал аномально высокий ток прямой утечки, и в спектре шума в нем преобладала зависимость $S_I \sim I_f^4$, типичная для присутствия локально перегретых областей, связанных с флуктуациями состава In. Величина EQE этого образца начала ухудшаться после значительно более короткого времени нагрузок, около 258 часов.

При облучении светодиодов ближнего УФ электронами с флюенсом 10^{15} см^{-2} и энергией 6 МэВ существенных изменений не происходило. При больших флюенсах была обнаружена сильная взаимосвязь падения интенсивности электролюминесценции с концентрациями электронных ловушек $E_c - 0,8 \text{ эВ}$, расположенными в InGaN квантовых ямах, и $E_c - 1 \text{ эВ}$, расположенными в GaN барьерах (рисунок 6 г), причем, после облучения электронами с наибольшим флюенсом $1,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, пик $E_c - 1 \text{ эВ}$ стал абсолютно доминирующим. Оба типа ловушек являются основными убийцами времени жизни в GaN. Другие глубокие ловушки, обнаруженные в УФ-светодиодах, по-видимому, не влияют на спад ЭЛ. Плотность дырочных ловушек $E_v + 0,75 \text{ эВ}$ после облучения существенно не меняется. Более того, если данные ловушки аналогичны основным дырочным ловушкам $E_v + 0,9 \text{ эВ}$ в n-GaN, они не могут влиять на рекомбинационное время жизни, что уже было неоднократно продемонстрировано экспериментально. Ловушки с оптическим порогом около 1,3 эВ, аналогичные центрам, часто наблюдаемым в n-GaN и приписываемым междуузельному углероду C_i , концентрация которых увеличилась после облучения, не являются основными убийцами времени жизни.

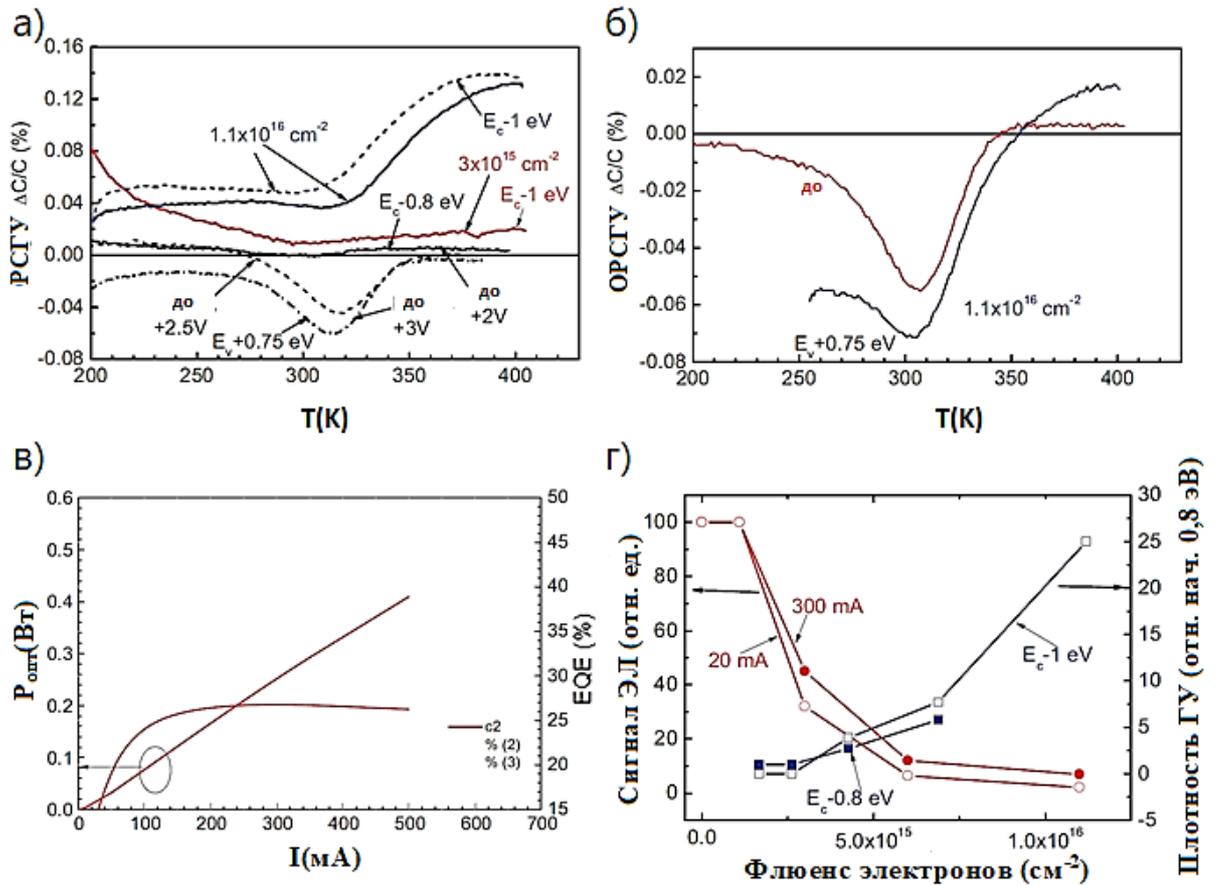


Рисунок 6 – РСГУ-спектры при +0,5 В, с импульсами прямого смещения +2 В, +2,5 В и +3В (а); ОРСГУ-спектры до и после облучения при +0,5 В, с освещением энергией фотонов 3,4 эВ (б); оптическая мощность выхода ЭЛ и EQE (правая ось) светодиодов до облучения (в); изменения интенсивности ЭЛ с флюенсом электронов при токах 20 мА и 300 мА, данные нормированы к значениям перед облучением. Синие линии (правая ось) показывают зависимость сигнала РСГУ электронных ловушек $E_c - 0,8$ эВ и $E_c - 1$ эВ от флюенса электронов. Данные нормированы к исходному сигналу ловушек $E_c - 0,8$ эВ (г).

При облучении синих светодиодов электронами с энергией 6 МэВ и флюенсами выше $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, снижение эффективности ЭЛ было тесно связано с увеличением концентрации электронных ловушек $E_c - 0,7$ эВ в активной области квантовых ям (рисунок 7), что также сопровождалось увеличением как последовательного сопротивления, так и коэффициента идеальности (с 1,4 до облучения до 2,1 после облучения), а также прямых токов утечки при низких прямых напряжениях, которые снижают эффективность инжекции. Показано, что данные глубокие уровни берут на себя роль центров безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла.

Было замечено, что дырочные ловушки, не оказывают существенного влияния на изменения ЭЛ при облучении из-за их низкой концентрации.

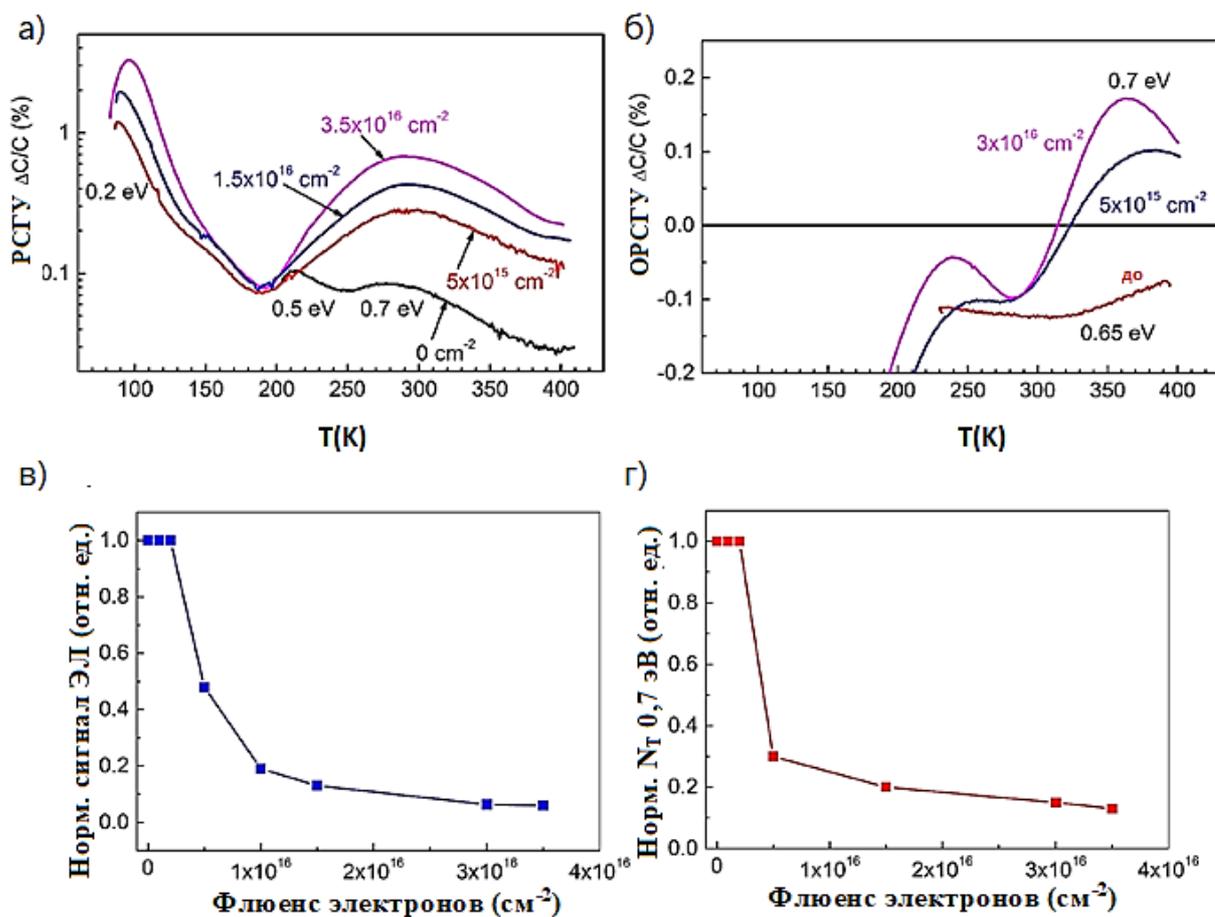


Рисунок 7 – РСГУ-спектры синих светодиодов при 0,5 В, с импульсом +2 В до облучения, после облучения с флюенсами $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $1,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $3,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (а); ОРСГУ-спектры, снятые при освещении светодиодом 365 нм до облучения, после облучения с флюенсами $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (б); интенсивность ЭЛ при токе 20 мА, нормированная к значению перед облучением и показанная как функция флюенса (в); нормированная концентрация ловушек $E_c - 0,7 \text{ эВ}$ как функция флюенса (г).

При облучении зеленых светодиодов начиная с флюенса $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, увеличивалась концентрация существующих электронных ловушек с уровнями при $E_c - 0,5 \text{ эВ}$ и вводились новые хорошо известные радиационные дефекты с уровнями вблизи $E_c - 1 \text{ эВ}$ в барьерах GaN. Как видно из рисунка 8, ухудшение сигнала ЭЛ после облучения коррелирует с изменениями плотности глубоких уровней $E_c - 0,5 \text{ эВ}$ и $E_c - 1 \text{ эВ}$. Это позволяет предположить, что они являются эффективными центрами безызлучательной рекомбинации. Концентрация

основных дырочных ловушек с уровнями вблизи $E_v + 0,45$ эВ после облучения уменьшилась, что исключает их из роли дефектов Шокли-Рида-Холла.

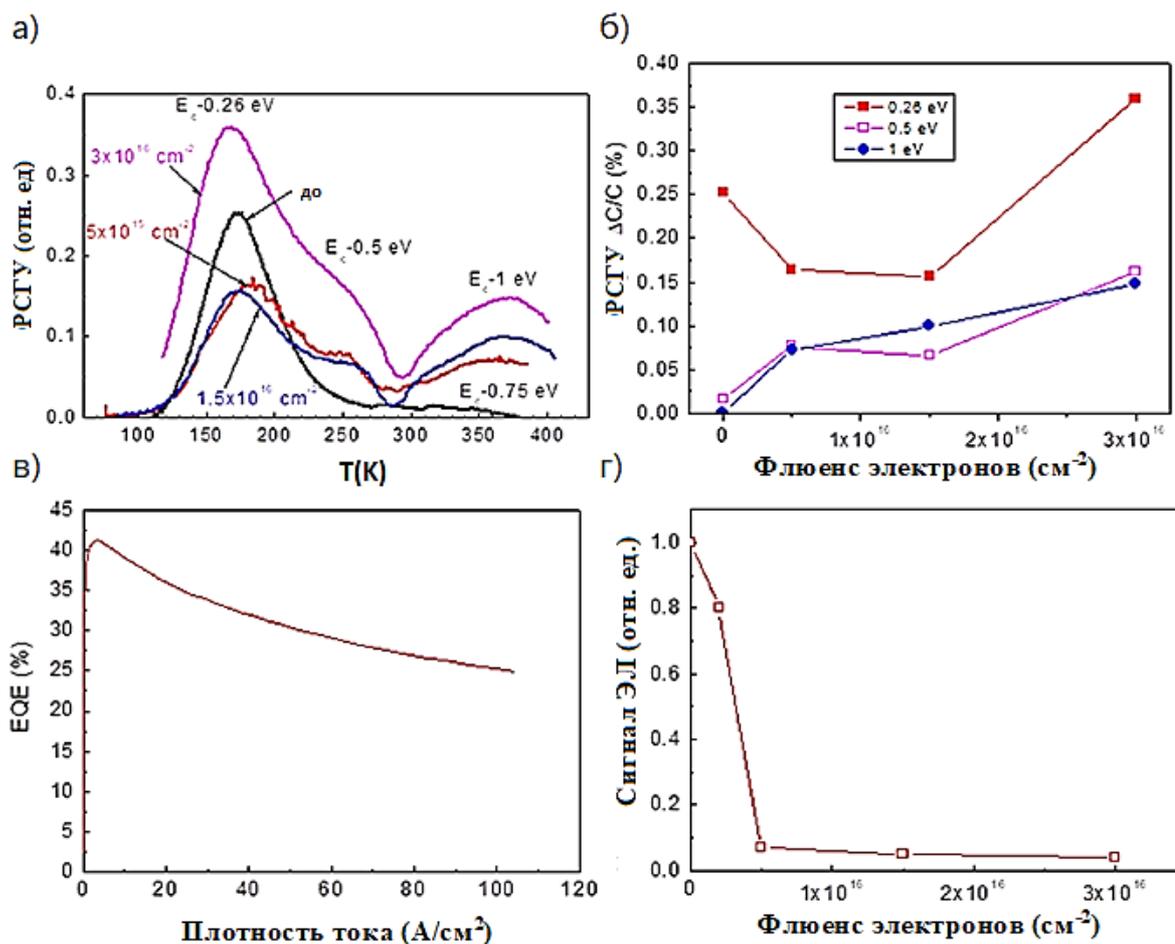


Рисунок 8 – PCГУ-спектры зеленых светодиодов до и после облучения с флюенсами $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, $1,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Измерения были при +0,5 В, с прямым импульсом до 2,5 В, длительностью 3 с, временными окнами 1,5 с / 15 с (а); амплитуды пиков PCГУ основных ловушек в зависимости от флюенса электронов (б); EQE зеленых светодиодов до облучения (в); сигнал ЭЛ при токе 20 мА в зависимости от флюенса электронов, нормированный к сигналу ЭЛ перед облучением (г).

Общие выводы по работе

1. Показано, что электронные ловушки с уровнем энергии около $E_c - 1$ эВ, относящиеся к междоузельному азоту N_i ответственны за изменения времени жизни носителей заряда в облученных образцах HVPE n-GaN.

2. Определены значения энергий, сечений захвата, локализаций ловушек в квантовых ямах и в барьерах светодиодов с различным содержанием In и сопоставлены с уровнями в n-GaN.

3. Обнаружено, что внедрение подслоя из наностолбиков GaN с наночастицами SiO₂ в контактный слой n⁺-GaN увеличивает интенсивность ФЛ и ЭЛ на 15–35%, что коррелирует с уменьшением концентрации электронных E_c - 0,27 эВ и дырочных E_v + 0,45 эВ ловушек.

4. Выявленным механизмом деградации в УФ-светодиодах является смещение атомов Ga и In, с последующим перемещением к дислокациям и формированием локальных каналов утечки, а уменьшение EQE связано с уровнями около E_c - 0,8 эВ, относящиеся к междузельному азоту N_i.

5. Показано, что при облучении светодиодов ближнего УФ, уменьшение интенсивности ЭЛ напрямую связано с увеличением концентрации ГУ E_c - 0,8 эВ и E_c - 1 эВ в квантовых ямах и барьерах структуры. В случае синих светодиодов, основными центрами безызлучательной рекомбинации являются ловушки с уровнем E_c - 0,7 эВ, расположенные в InGaN/GaN квантовых ямах.

6. При облучении зеленых светодиодов интенсивность ЭЛ коррелирует с ростом концентрации радиационно-индуцированных дефектов с уровнями E_c - 0,5 эВ и E_c - 1 эВ.

Список основных публикаций по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК и входящие в базы данных Scopus:

1. In-Hwan Lee Electron irradiation of near-UV GaN/InGaN light emitting diodes / In-Hwan Lee Alexander Y. Polyakov N. B. Smirnov I. V. Shchemerov N. M. Shmidt N. A. Tal'nishnih E. I. Shabunina Han-Su Cho Sung-Min Hwang R. A. Zinovyev S. I. Didenko P. B. Lagov S. J. Pearton // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science. – Vol. 214. – 2017, P. 1700372.

2. In-Hwan Lee Point defects controlling non-radiative recombination in GaN blue light emitting diodes: Insights from radiation damage experiments / In-Hwan Lee, A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, P. B. Lagov, R. A. Zinov'ev, E. B. Yakimov, K. D. Shcherbachev, and S. J. Pearton // Journal of Applied Physics. – Vol. 122. – 2017. P. 115704.

3. Lee, In-Hwan Degradation-induced low frequency noise and deep traps in GaN/InGaN near-UV LEDs. / Lee, In-Hwan; Polyakov, A. Y.; Hwang, Sung Min; Shmidt, N. M.; Shabunina, E. I.; Tal'Nishnih, N. A.; Smirnov, N. B.; Shchemerov, I. V.; Zinovyev, R. A.; Tarelkin, S. A.; Pearton, S. J. // Applied Physics Letters. – Vol. 111. – No. 6. – 2017. P. 062103.

4. Alexander Y. Polyakov Current relaxation analysis in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors / Alexander Y. Polyakov, N. B. Smirnov, Ivan V. Shchemerov, In-Hwan Lee, Taehoon Jang, Alexey A. Dorofeev, Nadezhda B. Gladysheva, Eugene S. Kondratyev, Yulia A. Turusova, Roman A. Zinovyev, A. V. Turutin, Fan Ren, S. J. Pearton // Journal of Vacuum Science and Technology B: Nanotechnology and Microelectronics. – Vol. 35. – 2017. P. 011207.

5. In-Hwan Lee Changes in electron and hole traps in GaN-based light emitting diodes from near-UV to green spectral ranges / In-Hwan Lee, A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, R. A. Zinovyev, Kang Bin Bae, Tae Hoon Chung, Sung Min Hwang, J. H. Baek, S. J. Pearton // Applied Physics Letters. – Vol. 110. – No. 19. – 2017. P. 192107.

6. In-Hwan Lee Defects responsible for lifetime degradation in electron irradiated n-GaN grown by hydride vapor phase epitaxy / In-Hwan Lee, A. Y. Polyakov, E. B. Yakimov, N. B. Smirnov, I. V. Shchemerov, S. A. Tarelkin, S. I. Didenko, K. I. Tapero, R. A. Zinovyev, S. J. Pearton // Applied Physics Letters. – Vol. 110. – No. 11. – 2017. P. 112102.

7. In-Hwan Lee Effect of nanopillar sublayer embedded with SiO₂ on deep traps in green GaN/InGaIn light emitting diodes / In-Hwan Lee, Han-Su Cho, K. B. Bae, A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, R. A. Zinovyev, J. H. Baek, Tae-Hoon Chung, I. V. Shchemerov, E. S. Kondratyev, and S. J. Pearton // Journal of Applied Physics. – Vol. 121. – 2017. P. 045108.

8. Lee, In-Hwan Deep Electron and Hole Traps in Electron-Irradiated Green GaN/InGaIn Light Emitting Diodes / Lee, In-Hwan and Polyakov, A. Y. and Smirnov, N. B. and Shchemerov, I. V. and Chung, Tae-Hoon and Lagov, P. B. and Zinov'ev, R. A. and Pearton, S. J. // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – Vol. 6. – No. 10. – 2017. P. 192107.

Публикации в материалах научно-технических конференций:

1. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, H. S. Cho, K. B. Bae, J. H. Baek, Tae-Hoon Chung, I.- H. Lee, I.V. Shchemerov, R.A. Zinovyev, E.S. Kondratyev. Deep traps in green GaN/InGaN light emitting diodes with and without nanopillar sublayer embedded with SiO₂ / Book of Abstracts for 11th russian conference "Gallium, indium and aluminum nitrides: structures and devices". Moscow, Russia, 2017, P. 94-95;

А.Я. Поляков, Н.Б. Смирнов, H. S. Cho, K. B. Bae, J. H. Baek, Tae-Hoon Chung, I.- H. Lee, И.В. Щемеров, Р.А. Зиновьев, Е.С. Кондратьев. Спектры глубоких уровней в зелёных светодиодах GaN/InGaN и светодиодах с зарощенным подслоем наностолбиков, заполненным наночастицами SiO₂ / Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции г. Москва, Россия, 2017, С. 94-95;

2. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, N.M. Shmidt, E.I. Shabunina, Hansu Cho, Sung-Min Hwang, I.- H. Lee, I.V. Shchemerov, R.A. Zinovyev, E.S. Kondratyev. Deep traps and low frequency noise in MQW GaN/InGaN UV LEDs / Book of Abstracts for 11th russian conference "Gallium, indium and aluminum nitrides: structures and devices". Moscow, Russia, 2017, P. 100-101;

А.Я. Поляков, Н.Б. Смирнов, Н.М. Шмидт, Е.И. Шабунина, Hansu Cho, Sung-Min Hwang, In- Hwan Lee, И.В. Щемеров, Р.А. Зиновьев, Е.С. Кондратьев. Глубокие центры и низкочастотный шум в УФ светодиодах на основе МКЯ GaN/InGaN с длиной волны излучения 390 нм / Тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции г. Москва, Россия, 2017, С. 100-101.