

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И.СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 621.373.826::538.975::621.315.592

ДАНИЛЬЧИК
Александр Викторович

**ЛАЗЕРЫ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ И СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN/GaN НА
КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Минск, 2022

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И.СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Научный руководитель: **Луценко Евгений Викторович**
кандидат физико-математических наук, доцент, и.о. заведующего центром «Широкозонная нано- и микроэлектроника» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси

Официальные оппоненты: **Кисель Виктор Эдвардович**
доктор физико-математических наук, доцент, заведующий научно-исследовательским центром оптических материалов и технологий филиала БНТУ "Научно-исследовательский политехнический институт", профессор кафедры "Лазерная техника и технология" приборостроительного факультета БНТУ

Чиж Александр Леонидович

кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиофотоники Государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Оппонирующая организация: **Белорусский государственный университет**

Защита состоится 7 февраля 2023 г. в 14.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 при ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 68-2; тел. ученого секретаря: 270-87-98, факс: 270-88-79, e-mail: m.parkhots@ifanbel.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси.

Автореферат разослан 6 января 2023 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат физико-математических наук

М.В. Пархоц

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии создания светоизлучающих структур на основе нитрида галлия (GaN) и его твердых растворов привело к созданию ярких и экономичных источников излучения и их массовому распространению взамен ламп накаливания и люминесцентных ламп. Светодиоды и лазерные диоды на основе нитридных гетероструктур с множественными квантовыми ямами (МКЯ) InGaN/GaN обладают большим потенциалом для широкого спектра применений, таких как дисплеи, автомобильное освещение, волоконная связь в видимом диапазоне, подводная беспроводная связь и хранение данных с высокой плотностью записи.

Из-за высокой стоимости подложек из самого нитрида галлия для гомоэпитаксиального роста нитридных светоизлучающих гетероструктур на его основе обычно используют подложки с несогласованной кристаллической решеткой, такие как сапфир (Al_2O_3), карбид кремния (SiC) и в меньшей степени кремний (Si). При этом сапфировые подложки обладают низкой теплопроводностью и высокой твердостью, что влияет на параметры создаваемых устройств и усложняет их механическую обработку. Подложки SiC имеют наиболее близкие с GaN параметры кристаллической решетки однако обладают более высокой стоимостью в сравнении с сапфиром. Рост нитридов на подложках Si привлекателен с нескольких аспектов, таких как большие размеры пластин, низкая стоимость, высокая однородность материала, простота механической обработки. Привлекательной является возможность интеграции светоизлучающих устройств на основе соединений нитрида галлия на таких подложках с традиционной микроэлектроникой с использованием хорошо отработанных автоматизированных технологических линий кремниевого производства. Для создания технологии производства мощных и высокоэффективных лазеров InGaN/GaN на подложках Si необходимо решить проблемы, препятствующие повышению их рабочих характеристик. Нитрид галлия и кремний, кроме значительного несоответствия постоянных решетки, имеют отличающиеся почти в 2 раза коэффициенты теплового расширения, что приводит к образованию трещин и высокой плотности проникающих дислокаций ($10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$) при остывании эпитаксиальных структур. Морфология поверхности и поверхностные дефекты могут оказывать существенное влияние на излучательные свойства и характеристики лазерного излучения гетероструктур InGaN/GaN. При использовании осветительных устройств повышенной плотности мощности (из набора светодиодов) необходимо обеспечение тепловых режимов эксплуатации светодиодов для минимизации деградационных процессов.

Диссертационная работа посвящена исследованию параметров излучения лазеров с оптической накачкой на основе гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках. Изучены характеристики излучения

лазеров с оптической накачкой после удаления кремниевой подложки методом жидкостного химического травления. Исследована корреляция лазерных и фотолюминесцентных (ФЛ) свойств гетероструктур с морфологией поверхности покровных слоев нитрида галлия и плотностью V-дефектов. Созданы светодиоды на основе гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN и определена температура активной области таких светодиодов. Разработаны и изготовлены матрицы светодиодов сине-зеленого (500 нм) и УФ диапазонов (365 нм) и исследованы распределения температур в данных матрицах. Получено соответствие результатов моделирования, описывающего распределение температуры при работе матриц светодиодов в зависимости от подаваемой на светодиоды электрической мощности, результатами измерений температур матриц.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами. Исследования по теме диссертации включены в утвержденные научные планы работы ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси на 2004-2020 гг.

Тема диссертации соответствует пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика; нано материалы и нанотехнологии, нанодиагностика» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, согласно Указа Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 №156.

Работа по данной диссертации выполнялась в рамках заданий следующих государственных программ и других проектов: проект МНТЦ В-1043 «Светоизлучающие устройства ультрафиолетово-зеленого диапазона и транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур GaN, выращенных на Si подложках» (01.10.2004 г.-30.09.2007 г.); ГКПНИ «Фотоника 2.01» «Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах, лазерах и светодиодах, разработка на их основе мощных источников оптического излучения» (2006-2010, № гос. рег. 20062813); ГКПНИ Фотоника, опто- и микроэлектроника 2.1.01. «Создание и исследование AlInGaN гетероструктур, транзисторов, светоизлучающих и фотоприемных устройств для светотехники, СВЧ-техники и мониторинга окружающей среды» (2016–2020 гг., № гос. рег. 20160089); хоздоговор ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси с РУП «Белорусский государственный институт метрологии» № 477 «Создание макета светодиодных источников для диапазонов СИЕ В и С ультрафиолетового излучения и их характеристика» (2020 г., № гос. рег. 20201757).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы является создание лазеров на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках и определение пороговых условий генерации при оптическом возбуждении; создание светодиодов на основе данных гетероструктур; разработка матриц светодиодов на сине-зеленую и УФ области спектра, цифровых моделей распределения температуры в матрицах светодиодов и верификация полученных данных с экспериментальными.

Достижение цели исследования осуществлялось решением следующих задач:

- изучение фотолюминесцентных свойств гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках, в широком интервале интенсивности оптического возбуждения от $0,15 \text{ Вт/см}^2$ до 2 МВт/см^2 ;
- получение и исследование характеристик генерации при оптическом возбуждении в лазерах на основе гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках и с удаленной кремниевой подложкой;
- изучение влияния дефектов поверхности лазеров с оптической накачкой на основе выращенных на Si гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN на пороговые характеристики;
- определение температур активной области светодиодов на основе выращенных на Si гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN а также матриц светодиодов на сине-зеленую и УФ области спектра.

Объектами данного исследования являются лазеры с оптической накачкой и светодиоды на основе гетероструктур с МКЯ InGaN/GaN, выращенных на подложках кремния, а также матрицы светодиодов на сине-зеленую и УФ области спектра. **Предметом** исследования являются их оптические, люминесцентные, тепловые, лазерные и структурные свойства, их связь между собой и технологией роста. Гетероструктуры с квантовыми ямами InGaN/GaN, выращенные на подложках кремния, являются новыми объектами исследования с точки зрения их лазерных свойств. Их выбор в качестве объектов исследования определяется также перспективами удешевления технологии производства лазеров и светодиодов на основе InGaN на кремниевых подложках по сравнению с аналогичными гетероструктурами, выращенными на традиционных подложках сапфира и карбида кремния.

Научная новизна

Научная новизна данной диссертационной работы заключается в получении следующих научных результатов:

1. Установлено, что порог генерации лазеров с оптической накачкой на основе гетероструктур InGaN с МКЯ, выращенных на кремнии, изменяется

от 137 до 300 кВт/см² при увеличении длины волны генерации от 440 до 465 нм. Численное моделирование пороговых условий показало, что минимальный порог генерации реализуется на моде пятого порядка. Расчетное значение оптического усиления InGaN в пороге генерации увеличивается от 750 до 1020 см⁻¹, в основном в результате увеличения поглощения в кремниевой подложке при увеличении длины волны генерации.

2. Показано, что удаление подложки кремния методом жидкостного химического травления уменьшает в 1,5 раза порог генерации оптически накачиваемых лазеров на основе InGaN гетероструктур с МКЯ на длине волны 465 нм, это также позволило получить генерацию на длине волны 474 нм, сдвинутой на 9 нм в длинноволновую область спектра.

3. Установлена корреляция значений порога генерации оптически накачиваемых лазеров на основе гетероструктур InGaN/GaN с плотностью V-дефектов, плотность которых определяется условиями роста.

4. Показано, что в гетероструктурах с верхним тонким слоем GaN (50 нм) и толщинами барьеров (9,6 нм) большее влияние на порог генерации оказывает шероховатость поверхности гетероструктур. В гетероструктурах с толстым слоем GaN (150 нм) и толщинами барьеров (~18 нм) главным фактором, влияющим на порог генерации, является плотность V-дефектов, высокие значения которой приводят к росту пороговых значений за счет увеличения рассеяния излучения в области квантовых ям.

5. Созданы матрицы светодиодов, излучающих в сине-зеленой и УФ областях спектра. Разработаны компьютерные модели, описывающие распределение температуры в матрицах светодиодов в зависимости от потребляемой электрической мощности. Получено хорошее согласование результатов моделирования со значениями температур светодиодов в матрицах при использовании оптических методов.

Положения, выносимые на защиту

1. Уменьшение толщины квантовых ям от 2,1 до 1,8 нм способствует увеличению скорости излучательной рекомбинации и уменьшению зависимости порога от длины волны генерации в основном за счет увеличения перекрытия волновых функций электронов и дырок в гетероструктурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках.

2. Удаление кремниевой подложки лазерных гетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN способствует значительному уменьшению порога генерации (в 1,5 раза на длине волны 465 нм), что обусловлено отсутствием потерь на поглощение в кремнии и возникновением генерации на модах более высокого порядка с меньшими значениями оптических потерь.

3. Значения порога генерации в светодиодных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN определяются в основном оптическими потерями на рассеяние и поглощение излучения V-дефектами в активном и волноводном слоях.

4. Верификация оптическими методами цифровой трехмерной модели распределения температуры в светодиодах и матрицах светодиодов при максимально допустимых потребляемых мощностях позволяет разработать и создать матрицы светодиодов на сине-зеленую и ультрафиолетовую области излучения и референсные источники для УФ диапазонов СIE A, B и C.

Личный вклад соискателя ученой степени

Диссертация отражает личный вклад автора в исследования, выполненные в 2004-2020 гг. Он заключается в самостоятельном выполнении основной части экспериментальных исследований, анализе полученных результатов и их интерпретации. Научный руководитель доц., канд. физ.-мат. наук Е. В. Луценко обозначил цели и задачи исследований, оказывал методическую помощь при их выполнении, участвовал в обсуждении результатов, положений и выводов диссертации. Проф., докт. физ.-мат. наук Г. П. Яблонский принимал участие в обсуждении бóльшей части результатов. В обсуждении некоторых вопросов участвовали проф. докт. физ.-мат. наук Г. И. Рябцев, канд. физ.-мат. наук В. Н. Павловский, канд. физ.-мат. наук Н. В. Ржеуцкий. А. Г. Войнилович оказывал помощь в проведении некоторых люминесцентных и лазерных измерений. Н. П. Тарасюк выполнил теоретические расчеты характеристик волноводов гетероструктур на основе InGaN. Модели референсных источников разработаны совместно с С. В. Никоненко. Сотрудники Института полупроводниковой техники, Северный Рейн-Вестфальского университета г. Аахен – Dr. Y. Dikme, Dr. H. Kalisch; и фирмы AIXTRON AG, г. Аахен – Prof. M. Heuken, M. Lünenbürger, Dr. B. Schineller, H. Protzmann вырастили и предоставили для исследования все образцы гетероструктур InGaN/GaN. Светодиоды на основе гетероструктур с КЯ InGaN были изготовлены Н. В. Ржеуцким при содействии немецких коллег. Dr. M. V. Danailov и канд. физ.-мат. наук А. А. Демидович (Sincrotrone “Elettra”, Триест, Италия) осуществляли помощь в проведении измерений спектров усиления при возбуждении лазерными импульсами фемтосекундной длительности. Остальные соавторы принимали участие в решении отдельных вопросов и задач, не вошедших в диссертационную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на следующих научных конференциях и семинарах: «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, Беларусь, 2009, 2013 и 2017 гг.), «Лазерная физика и оптические технологии» (Минск, Беларусь, 2010 г.), «Nanomeeting-2009» (Минск,

Беларусь, 2009 г.), «14th International Workshop on Inorganic and Organic Electroluminescence & 2008 International Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting» (Rome, Italy, 2008), «4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers» (Alushta, Ukraine, 2008), «5th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers» (Sevastopol, Ukraine, 2010), «3th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry» (Tokyo, Japan, 2017). Результаты, представленные в диссертации, использованы в ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси (информация об использовании представлена в ПРИЛОЖЕНИИ А к диссертации), получены. Получены два патента на полезную модель Российской Федерации и один патент на полезную модель Республики Беларусь [20-22].

Опубликованность результатов диссертации. Результаты диссертации отражены в 19 публикациях: 6 статей в научных журналах (2,67 авт. л.), 6 статей в сборниках трудов и 7 тезисов докладов на научных мероприятиях, 3 патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, обзорной главы, методики эксперимента, трех оригинальных глав с результатами исследований, заключения, списка использованных источников и списка работ автора (22 наименования). Диссертация содержит 85 рисунков, 4 таблицы. Общий объем диссертации составляет 132 страницы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации. Рассматриваются гетероструктуры InGaN/GaN с квантовыми ямами на кремниевых подложках и описываются основные проблемы, которые возникают при использовании кремниевых подложек для роста нитридных гетероструктур. Далее обсуждаются способы создания высокоэффективных светоизлучающих устройств на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках с кристаллографической ориентацией (111) и влияние увеличения размеров подложек на качество структур и уменьшение стоимости производства. Проведен анализ литературы по методам удаления кремниевой подложки для улучшения теплоотвода у светоизлучающих структур. Рассмотрены методы определения температуры активной области светодиодов. Обоснованы актуальность целей и необходимость решения задач диссертационного исследования.

Во второй главе описаны экспериментальные установки для исследования ФЛ и генерации излучения в интервале уровней возбуждения $I_{\text{возб}} = 10^{-3} - 10^8 \text{ Вт/см}^2$ как непрерывным, на длине волны 325 нм, так и импульсным наносекундной длительности (8 нс) на длине волны 337,1 нм, лазерным излучением, а также

установка для измерения спектрально-временного распределения излучения ФЛ в интервале температур 10 – 300 К при возбуждении лазерным излучением фемтосекундной длительности (280 фс) на длине волн 260 нм. Представлены методики удаления кремниевой подложки гетероструктуры InGaN/GaN методом жидкостного химического травления. Представлено описание метода определения температуры активной области светодиодов по сравнению средневзвешенных значений спектров электролюминесценции (ЭЛ) при непрерывном и импульсном токах.

Третья глава посвящена исследованию ФЛ и лазерных характеристик серии гетероструктур InGaN/GaN с квантовыми ямами, выращенных на подложках кремния, а также после удаления подложки методом жидкостного химического травления. Данные гетероструктуры выращены с верхним тонким слоем GaN (50 нм) и толщинами барьеров (9,6 нм).

Получена генерация в МКЯ InGaN/GaN в диапазоне длин волн от 440 до 465 нм при поперечной оптической накачке. Порог генерации возрастал от 137 до 300 кВт/см² с увеличением длины волны генерации как представлено на рисунке 1. Максимальные значения фактора оптического ограничения $\Gamma = 1,08\%$ у квантовых ям толщиной 2,1 нм и $\Gamma = 0,92\%$ для КЯ толщиной 1,8 нм были получены в результате расчетов. Для определения порогового значения коэффициента усиления использовалась формула:

$$\Gamma g_{InGaN}^{nop} = \left(\frac{1}{2L_{рез}} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) + \alpha_{Si} \right), \quad (1)$$

где $L_{рез}$ – длина резонатора, R_1, R_2 – коэффициенты отражения на зеркалах резонатора, α_{Si} – потери на поглощение излучения в подложке Si. Использовались значения $R_1 = R_2$ и α_{Si} , полученные из расчетов. Было показано, что пороговое значение усиления InGaN g_{InGaN}^{nop} реализуется на модах 5-ого порядка. Расчеты показали (рисунок 1, кривые 1а и 2а), что у лазеров с толщинами КЯ 1,8 и 2,1 нм, значение оптического усиления InGaN в пороге генерации растет с увеличением длины волны излучения для КЯ толщиной 1,8 нм от 1035 см⁻¹ на $\lambda = 442$ нм до 1289 см⁻¹ на $\lambda = 455$ нм, для КЯ толщиной 2,1 нм – от 750 см⁻¹ на $\lambda = 440$ нм до 1020 см⁻¹ на $\lambda = 456,2$ нм.

Установлено, что у структур с толщиной КЯ 1,8 нм порог генерации и оптическое усиление в зависимости от длины волны имеют одинаковый наклон, в то время как для КЯ толщиной 2,1 нм пороговая зависимость имеет более резкий характер чем усиление. Наблюдаемые отличия обусловлены падением квантовой эффективности спонтанного излучения в КЯ толщиной 2,1 нм при увеличении длины волны генерации, что подтверждается измерениями времени затухания фотолюминесценции ($\tau_{ФЛ}$). Как видно на рисунке 2, в образцах с МКЯ толщиной 1,8 нм $\tau_{ФЛ}$ меньше чем у МКЯ толщиной 2,1 нм при одинаковых длинах волн.

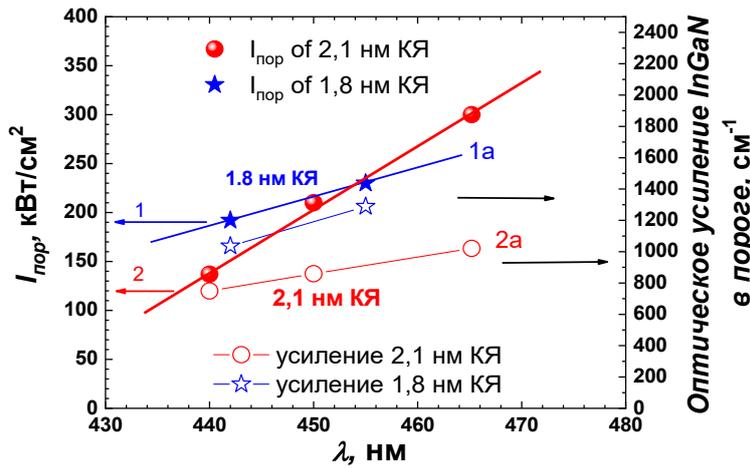


Рисунок 1 – Плотности мощности в пороге генерации (1, 2) и рассчитанные значения коэффициента усиления (1а, 2а) в зависимости от длины волны у структур с толщиной КЯ 2,1 нм (1, 1а) и 1,8 нм (2, 2а)

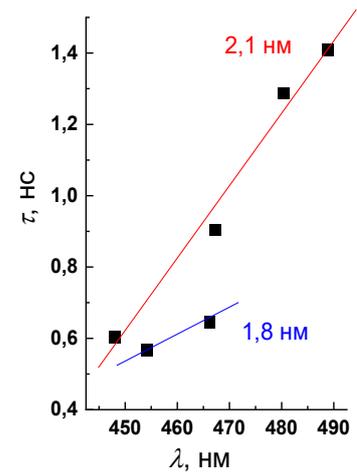


Рисунок 2 – Время затухания ФЛ гетероструктур с КЯ толщиной 2,1 и 1,8 нм в зависимости от длины волны излучения

Удаление кремниевой подложки проводилось у гетероструктуры InGaN/GaN с наиболее длинноволновой линией генерации. Спектры ФЛ для образца с подложкой и после удаления кремния, измеренные при одинаковых условиях, представлены на рисунке 3. Видно, что интегральная интенсивность ФЛ изменилась незначительно. Положение максимума спектра фотолюминесценции не изменилось, а сам спектр стал более сглаженным. Оценка условий генерации InGaN/GaN лазеров с подложкой и без нее осуществлялась в приближении плоских волн для экспериментально наблюдаемой длины волны генерации лазера $\lambda = 465$ нм с длиной резонатора 600 мкм. Для поперечных мод различных порядков были проведены расчеты: фактора оптического ограничения, значения коэффициента поглощения в подложке, коэффициента отражения от зеркал резонатора.

Численные расчеты распределения электромагнитного поля внутри гетероструктур с кремниевой подложкой показывают наличие в ней значительного поглощения. Коэффициент поглощения очень быстро растет с ростом номера моды, что обусловлено большим проникновением излучения лазерных мод более высокого порядка в подложку. Как показали расчеты, для моды 5-го порядка значение поглощения составляет около 1 см^{-1} , а для моды 6-го порядка это значение уже составляет около 10 см^{-1} . На рисунке 4 приведены пороговые значения коэффициента усиления в квантовых ямах InGaN в зависимости от номера моды для лазеров на Si и лазера с удаленной подложкой, рассчитанные для длины резонатора 600 мкм (используется в экспериментах).

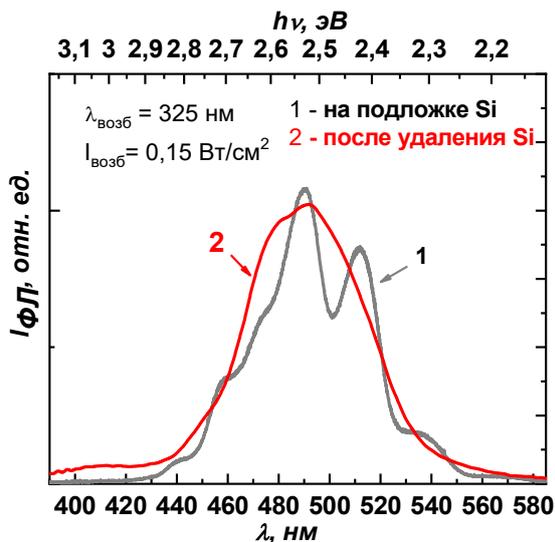


Рисунок 3 – Спектры ФЛ гетероструктуры InGaN/GaN МКЯ при $I_{\text{возб}} = 0,15 \text{ Вт/см}^2$ с подложкой Si (1), после удаления подложки (2)

возбуждающего излучения лазера из-за уменьшения оптических потерь. Это сопровождается уменьшением порогового усиления и должно приводить к низкоэнергетическому сдвигу спектров усиления и лазерных спектров из-за более низкой интенсивности возбуждения, которая требуется для достижения пороговых условий.

На рисунке 5 представлены спектры генерации оптически накачиваемого лазера с InGaN/GaN КЯ после удаления кремниевой подложки при различных интенсивностях возбуждения. Значение плотности мощности возбуждения составило $\sim 200 \text{ кВт/см}^2$ в пороге генерации с длиной волны излучения 463 нм, при этом ширина лазерной линии была около 1 нм, что значительно меньше ширины спектра генерации аналогичного лазера на подложке. Уменьшение лазерного порога примерно в 1,5 раза, а также сужение спектра генерации обусловлено уменьшением как

Значение коэффициента поглощения для слоев GaN, AlN, AlGaN было выбрано равным 5 см^{-1} . Как видно из рисунка 4, минимальное значение порогового усиления в лазере с InGaN МКЯ на Si соответствует поперечной моде 5-го порядка. Коэффициент усиление КЯ InGaN в пороге генерации составляет 1450 см^{-1} . Для лазера с МКЯ InGaN с удаленной подложкой минимальное значение порогового усиления КЯ InGaN соответствует поперечной моде 9-го порядка и равно 630 см^{-1} . Таким образом, отсутствие поглощения собственного излучения из квантовых ям InGaN в подложке приводит к уменьшению пороговой плотности мощности

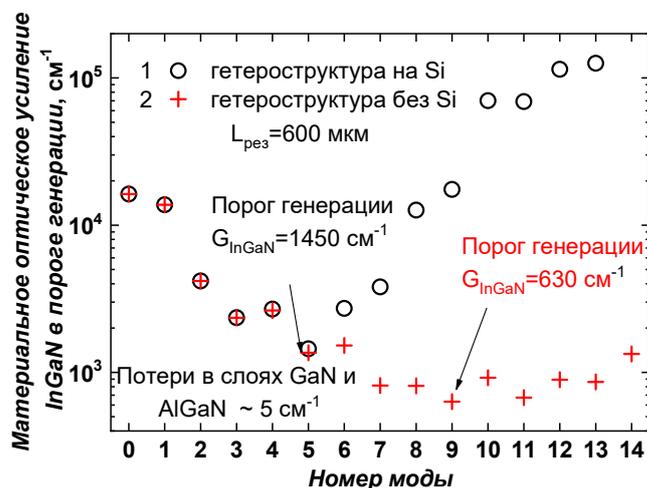


Рисунок 4 – Оптическое усиление в квантовых ямах InGaN в пороге генерации как функция номера моды лазера на подложке Si (1) и лазера с удаленной подложкой (2)

амплитуды, так и полуширины спектра усиления в пороге генерации. Таким образом, теоретически и экспериментально было показано, что удаление подложки кремния приводит к значительному уменьшению порога генерации, что обусловлено отсутствием поглощения лазерного излучения в кремнии.

Расчеты показывают, что уменьшение порога генерации обусловлено также уменьшением полезных оптических потерь на выход лазерного излучения, так как генерация происходит на модах большего порядка. На лазере с удаленной подложкой получена генерация на длине волны, смещенной на 9 нм в длинноволновую сторону, что обусловлено развитием генерации на моде более высокого порядка как показывают расчеты.

Четвертая глава посвящена исследованиям взаимосвязи дефектов поверхности и фотолюминесцентных и лазерных характеристик светодиодных гетероструктур с МКЯ InGaN различной толщины, выращенных на кремниевых подложках. Данные гетероструктуры были выращены с верхним слоем нитрида галлия, легированного магнием (GaN:Mg) толщиной 150 нм.

Состояние поверхности исследуемых образцов было проанализировано при помощи оптического микроскопа в режимах светлого и темного полей и были обнаружены поверхностные дефекты в виде трещин и точек, сильно рассеивающих свет. Показано, что средняя по всей площади образца плотность точечных дефектов сильно варьируется от $3 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ у лучшего образца, до 10^7 см^{-2} . Исследования морфологии поверхности образцов осуществлялись при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) и проводился анализ АСМ-изображений участков поверхности образцов, содержащих поверхностный точечный дефект. Данные точечные дефекты на поверхности слоя GaN имеют вид углублений в форме перевернутой пирамиды с шестиугольным основанием. Такие дефекты в литературе обычно называют V-дефектами. Данный тип дефектов образуется на границах слоев InGaN/GaN в местах, которых достигают проникающие дислокации.

В лазерах с оптической накачкой, на основе светодиодных гетероструктур, выращенных на кремнии, была получена генерация при комнатной температуре.

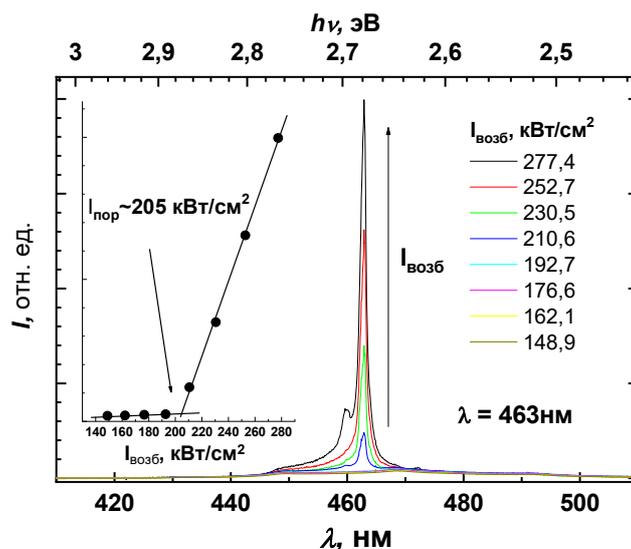


Рисунок 5 – Спектры генерации InGaN/GaN лазера после удаления кремниевой подложки при различных интенсивностях возбуждения. Вставка: пороговая зависимость лазера

На рисунке 6а представлены спектры генерации в диапазоне длин волн 427 – 442 нм 4-х светодиодных гетероструктур с КЯ толщинами 1,3 и 2,5 нм. Генерация была получена в образцах с плотностью V-дефектов менее $2 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$. Как видно на рисунке 6б, порог генерации в интервале от 75 до 1000 кВт/см² почти линейно зависит от плотности V-дефектов, т.е. плотность V-дефектов оказывает наиболее существенное влияние на порог генерации.

На вставке рисунка 6б представлена фотография поверхности лазера, полученная при оптическом возбуждении с уровнем накачки, превышающим пороговое значение. Белыми вертикальными линиями обозначены зеркала резонатора лазера. Как видно из вставки, на поверхности наблюдаются яркие точки, рассеивающие излучение. Это указывает на то, что V-дефекты являются эффективными рассеивающими центрами собственного лазерного излучения. Субмикронные размеры V-дефектов приводят к эффективному рассеянию лазерного излучения, поскольку значительная часть интенсивности генерационной моды первого порядка расположена в области квантовых ям и пассивного слоя (V-дефектов).

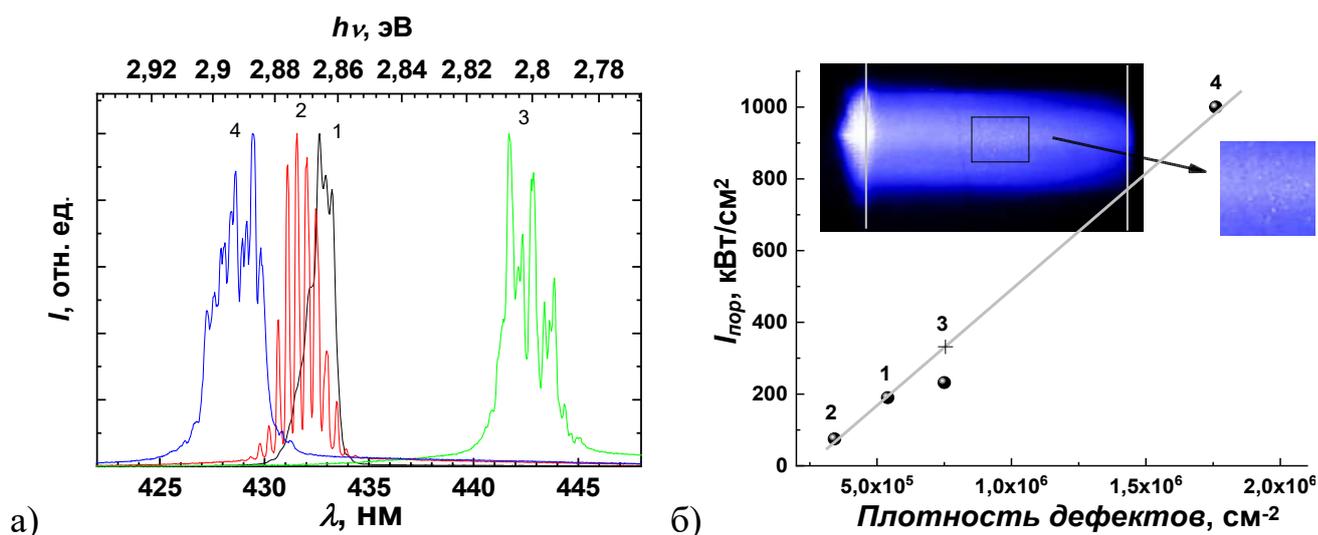


Рисунок 6 – Спектры излучения с торца резонатора образцов №1-4 с КЯ 1,3 и 2,5 нм (а), порог генерации в зависимости от плотности V-дефектов (б)

Оценка оптического усиления светодиодных гетероструктур проводилась двумя экспериментальными методами: варьированием длины полоски возбуждения и зависимостью порога генерации от длины резонатора. Показано, что оба экспериментальных метода могут быть использованы для достоверной оценки оптического усиления.

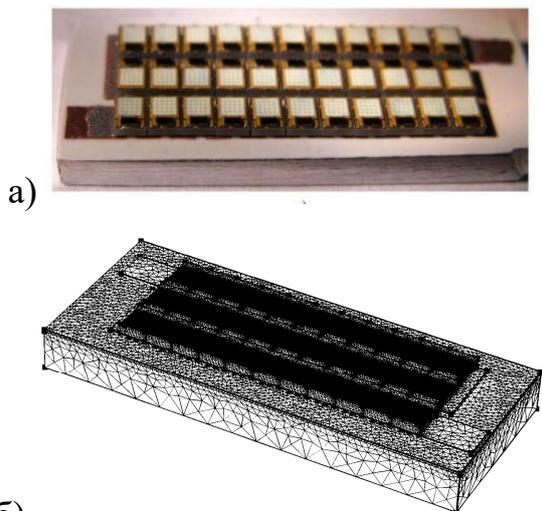
Проведенные оценки коэффициента оптического усиления КЯ толщиной 1,3 нм в светодиодных гетероструктурах InGa_N/Ga_N, выращенных на подложках кремния, показали, что значение оптического усиления InGa_N меняется от $\sim 2000 \text{ см}^{-1}$ при плотности мощности накачки 75 кВт/см^2 до 11000 см^{-1} при накачке 1200 кВт/см^2 . Высокие значения коэффициента усиления InGa_N до 10^4 см^{-1}

показывают, что светодиодные гетероструктуры с квантовыми ямами InGaN, выращенные на подложках кремния, перспективны для создания инжекционных лазеров.

Пятая глава посвящена созданию светодиодов и матриц светодиодов, излучающих в видимом и УФ диапазонах спектра, определению температур активной области светодиодов оптическими методами и разработке моделей, описывающих распределение температуры в объеме матриц таких светодиодов.

На основе светодиодной гетероструктуры InGaN с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN, выращенной на кремниевой подложке, изготовлен макет светодиода со средневзвешенным значением ЭЛ ~ 490 нм. Оценка перегрева активной области светодиодов на кремниевой и сапфировой подложке показала, что для структур, выращенных на кремниевой подложке, перегрев оказывается в 3 раза меньше, чем у аналогичных по дизайну структур с подложкой Al_2O_3 .

Созданы матрицы светодиодов на сине-зеленую (500 нм, рисунок 7а) и ультрафиолетовую (365 нм) области спектра. Разработаны цифровые трехмерные модели матриц светодиодов видимого (рисунок 7б) и УФ диапазонов, которые позволяют произвести расчет распределения температуры светодиодов в матрицах, при различных значениях подводимой к светодиодам мощности. На рисунке 8 приведены средневзвешенные значения спектров ЭЛ светодиода Rebel LXZ1-PE01-0048 с длиной волны излучения ~ 500 нм, в зависимости от тока инжекции при импульсном (кривая 1) и непрерывном (кривая 2) возбуждении. Измерения проводились при значениях токов от 1 до 1000 мА. Как видно, с увеличением импульсного тока происходит только коротковолновое смещение спектра ЭЛ, причина которого в заполнении состояний в квантовых ямах InGaN. Поведение кривой 2 обусловлено, помимо заполнения состояний, уменьшением ширины запрещенной зоны InGaN, которое вызвано нагревом с ростом значений непрерывного тока. Вычитая положения спектральных максимумов ЭЛ при импульсном токе из положений спектральных максимумов ЭЛ при таких же значениях непрерывного тока, получим зависимость изменения длины волны электролюминесценции от тока $\Delta\lambda(I)$, обусловленную только нагревом. Зависимость положения спектра ЭЛ светодиода LXZ1-PE01-0048 от температуры при импульсном токе 100 мА представлена на рисунке 8 (кривая 3). Из наклона данной зависимости получен коэффициент температурного смещения $\Delta T/\Delta\lambda = 29,71$ °C/нм.



а)
б)
Рисунок 7 – Изображение матрицы светодиодов (а) и ее цифровой 3D-модели (б)

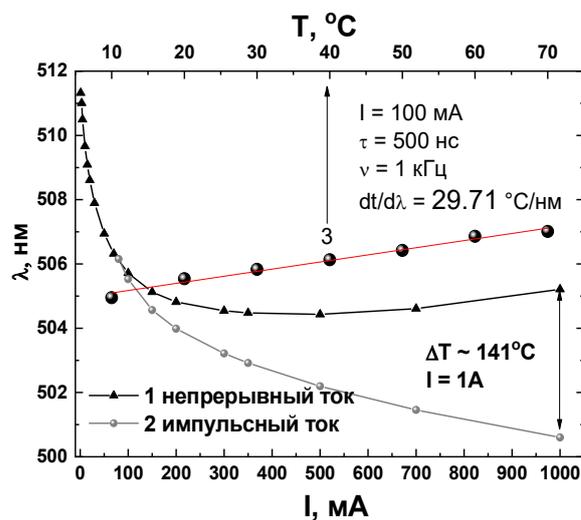


Рисунок 8 – Зависимости положений максимумов спектров ЭЛ светодиода LXZ1-PE01-0048 от тока инжекции при импульсном (1) и непрерывном (2) токе, от температуры при импульсном токе 100 мА (3)

Из зависимости $\Delta\lambda(I)$ с учетом коэффициента $\Delta T/\Delta\lambda$ получаем зависимость превышения температуры активной области светодиода над комнатной от тока инжекции. Сравнение температур кристаллов светодиодов, полученных различными методами – по смещению спектров излучения, в результате моделирования (рисунок 9а), а также по измерениям при помощи тепловизора (рисунок 9б) показали, что как максимальная температура активной области светодиодов в матрицах, так и наклон зависимостей температуры от тока хорошо согласуются между собой (рисунок 9в).

Разработана и изготовлена матрица светодиодов с оптической мощностью ~ 120 Вт, с целью создания равномерной засветки исследуемых объектов. Данная матрица представляет собой 60 ультрафиолетовых светодиодов марки NICHIA NC4U133A(T) с длиной волны излучения 365 нм. На основании модели матрицы на видимую область спектра, а также экспериментальных данных создана модель распределения температуры в матрице УФ светодиодов. Показано, что значения температуры светодиодов, полученные при помощи моделирования, близки к соответствующим значениям, полученным из оптических измерений.

На основе ультрафиолетовых светодиодов разработаны референсные источники излучения для УФ диапазонов СИЕ А, В и С. Полученные мощности излучения, которые составили 1 мВт для источников на УФ диапазоны В и С, и 400 мВт для источника на диапазон А, достаточны для калибровки УФ радиометров.

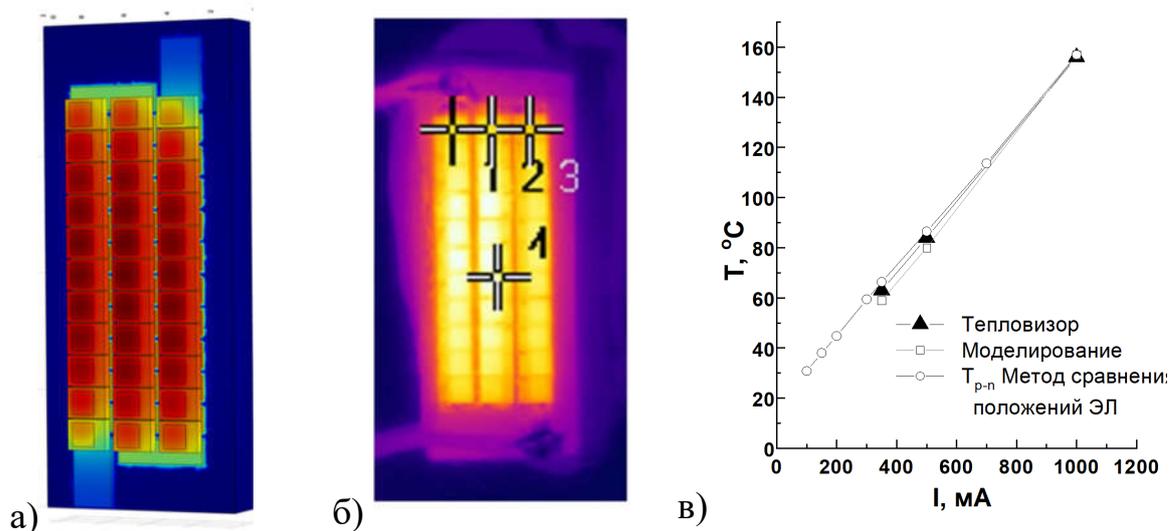


Рисунок 9 – Карта распределения температуры (а) и тепловизионное изображение (б) матрицы светодиодов при постоянном токе 350 мА; максимальная температура светодиодов в зависимости от тока, полученная различными методами (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально показано, что в оптически накачиваемых лазерах на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами InGaN, выращенных на подложках кремния, переход от квантовых ям толщиной 2,1 нм к более тонким квантовым ямам толщиной 1,8 нм сопровождается уменьшением угла наклона зависимости порога от длины волны генерации, что позволяет реализовать генерацию в более длинноволновой области. Показано, что это обусловлено меньшей эффективностью спонтанной рекомбинации неравновесных носителей заряда в квантовых ямах большей толщины и большим содержанием индия за счет уменьшения перекрытия волновых функций электронов и дырок. В исследуемых гетероструктурах получена лазерная генерация в диапазоне длин волн от 440 до 465 нм, пороги генерации составили от 137 до 300 кВт/см² [2, 9, 14].

2. Установлено, что в в оптически накачиваемых лазерах на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами InGaN после удаления кремниевой подложки происходит уменьшение порога генерации в 1,5 раза, что объясняется в основном уменьшением оптических потерь на выход лазерного излучения для мод высокого порядка при отсутствии поглощения лазерного излучения в кремниевой подложке. В лазере после удаления подложки получена генерация на длине волны 473 нм на моде более высокого порядка, чем в лазере с подложкой на длине волны генерации 465 нм [1].

3. Установлено что доминирующим механизмом, влияющим на порог генерации в оптически накачиваемых лазерах на основе гетероструктур InGaN/GaN

с пятью квантовыми ямами InGaN, толщинами барьеров ~18 нм и верхним волноводным слоем GaN толщиной 150 нм, выращенных методом MOCVD на кремниевых подложках, являются оптические потери на рассеяние и поглощение излучения V-дефектами. Рост плотности V-дефектов от $3,4 \times 10^5$ до $1,7 \times 10^6$ см⁻² приводит к увеличению порога генерации от 75 до 1000 кВт/см² при оптическом возбуждении за счет увеличения рассеяния излучения в области КЯ и верхнем слое нитрида галлия на V-дефектах [6, 7, 13, 15].

4. Проведена оценка перегрева активной области светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами InGaN на кремниевых подложках, с максимумом излучения на длине волны ~ 490 нм. Показано, что для структур, выращенных на подложке Si(111), перегрев в 3 раза меньше перегрева аналогичных по дизайну структур с подложкой Al₂O₃ [8, 12, 16, 17].

5. На основании цифровых трехмерных моделей матриц светодиодов оценены распределения температуры при различных значениях мощности, подводимой к светодиодным кристаллам. Показано, что температуры светодиодов матриц, излучающих в сине-зеленой (500 нм) и ультрафиолетовой (365 нм) областях спектра, полученные при помощи моделирования близки к значениям температур, полученным из оптических измерений. С использованием результатов моделирования на основе ультрафиолетовых светодиодов разработаны референсные источники излучения для УФ диапазонов СИЕ А, В и С. Полученная мощность излучения достаточна для калибровки УФ радиометров в указанных диапазонах [3-5, 8, 10-12, 18, 19].

Рекомендации по практическому использованию результатов

В результате проведенных исследований были получены сведения о влиянии толщин квантовых ям и качества поверхностного слоя нитрида галлия гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ, выращенных на подложках кремния, на их излучательные характеристики. Полученные сведения могут применяться при создании в Республике Беларусь технологии эпитаксиального роста нитридных гетероструктур на кремнии в ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси. Результаты исследований могут быть использованы при разработке и производстве нитридных гетероструктур для светодиодов, инжекционных лазеров для отечественных предприятий ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» и ОАО «Интеграл», а также для других предприятий электронной промышленности.

Полученные в ходе выполнения работы сведения по значениям температур матриц светодиодов ультрафиолетового излучения могут быть использованы в метрологическом обеспечении при изготовлении референсных источников излучения для УФ диапазонов СИЕ А, В и С.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах

1. Optically pumped InGaN/GaN MQW lift-off lasers grown on silicon substrates / E.V. Lutsenko, A.V. Danilchuk, N.P. Tarasuk, V.N. Pavlovskii, A.L. Gurskii, G.P. Yablonskii, L. Rahimzadeh Khoshroo, H. Kalisch, R.A. Jansen, Y. Dikme, B. Schineller, M. Heuken // *Superlattices Microstruct.* – 2007. – Vol. 41, № 5–6. – P. 400–406.

2. Laser threshold and optical gain of blue optically pumped InGaN/GaN multiple quantum wells (MQW) grown on Si / E.V. Lutsenko, A.V. Danilchuk, N.P. Tarasuk, A.V. Andryieuski, V.N. Pavlovskii, A.L. Gurskii, G.P. Yablonskii, H. Kalisch, R.H. Jansen, Y. Dikme, B. Schineller, and M. Heuken // *Phys. Status Solidi Curr. Top. Solid State Phys.* – 2008. – Vol. 5, № 6. – P. 2263–2266.

3. Моделирование распределения температуры в матрице InGaN светодиодов с высокой плотностью мощности излучения / А.В. Данильчик, А.Г. Войнилович, Н.В. Ржеуцкий, П.В. Шпак, В.В. Борушко, Ю.В. Трофимов, В.И. Цвирко, Е.В. Луценко, Г.П. Яблонский // ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ. Серыя фіз.-мат. Навук. – 2016. – №. 1. – С. 84–89.

4. Photoinduced grafting polymerization onto the surface with the use of radiation of high-power ultraviolet light-emitting diodes / O.N. Tretinnikov, A.A. Gorbachev, E. V. Lutsenko, A.V. Danilchuk, L.V. Shkrabatovskaya, L.K. Prikhodchenko // *Polymer Science - Series B.* – 2016. – Vol. 58, № 3. – P. 278–283.

5. Никоненко С.В. /Референсные светодиодные источники излучения для ультрафиолетовых диапазонов спектра СИЕ В и С / С.В. Никоненко, А.В. Данильчик, Е.В. Луценко // *Український метрологічний журнал.* – 2019. – №. 1, – С. 47–53.

6. Влияние плотности поверхностных V-дефектов на лазерные свойства гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, выращенных на кремниевых подложках / А.В. Данильчик, А.В. Нагорный, Н.В. Ржеуцкий, А.Г. Войнилович, В.Н. Павловский, Е. В. Луценко // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2021. – Том. – 88, № 6. – С. 895–899.

Статьи в сборниках статей и материалов конференций

7. High optical gain InGaN/GaN MQW electroluminescent heterostructures grown on silicon by MOCVD / E.V. Lutsenko, N.P. Tarasuk, A.G. Vainilovich, A.V. Danilchuk, V.N. Pavlovskii, and G.P. Yablonskii, H. Kalisch, R.H. Jansen, H. Behmenburg, Y. Dikme, B. Schineller, M. Heuken. // *Proceedings of CAOL 2008: 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers.* Alushta, Crimea, Ukraine. – 2008. – P. 360–362.

8. Исследование перегрева активной области светодиода на основе InGaN/GaN, выращенной на кремниевой подложке. / Н.В. Ржеуцкий, А.В. Данильчик, В.З. Зубелевич, Е.В. Луценко, Г. П. Яблонский, Х. Калиш, Р. Янсен, М. Хойкен, Х. Беменбург, Б. Шинеллер // Молодежь в науке – 2009: приложение к журналу “Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі”: в 5ч. (Минск, 21-24.04.2009) / Национальная академия наук Беларуси, Совет молодых ученых НАН Беларуси. – Минск, 2009. – С. 16–19.

9. Influence of InGaN/GaN/Si electroluminescent heterostructure design and quantum well thickness on their luminescent and laser properties / V.N. Pavlovskii, E.V. Lutsenko, A.V. Danilchik, V.Z. Zubialevich, A.V. Muravitskaya, G.P. Yablonskii, H. Kalisch, R.H. Jansen, B. Schineller, M. Heuken / IEEE 5th International CONFERENCE on ADVANCED OPTOELECTRONICS and LASERS (CAOL'2010). Sevastopol, Crimea, Ukraine. – 2010. – P. 265–267.

10. Reference hemispherical UVA LED source / S.V. Nikanenka, A.V. Danilchik, V.A. Dlugunovich, A.V. Kreidzich, M.V. Rzhetski, E.V. Lutsenko // 3th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2017). Tokyo. – 2017. P. 114–115.

11. REFERENCE UV LED SOURCES / Nikanenka, S., Lutsenko, E., Scums, D. V., Rzhetski, M., Kreidzich, A., Dlugunovich, V., Danilchik, A. // International Commission on Illumination. – 2018. – P. 984–989.

12. Nikanenka S.V. / COMPACT REFERENCE UV-LEDS SOURCES WITH CONICAL DIFFUSE REFLECTOR/ S.V. Nikanenka, A.V. Danilchik, E.V. Lutsenko // International Commission on Illumination. – 2019. – P. 1193–1194.

Тезисы докладов

13. Lasing and optical gain at optical pumping in InGaN/GaN electroluminescent test heterostructures grown on silicon / E.V. Lutsenko, A.V. Danilchik, A.G. Voinilovich, V.Z. Zubialevich, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, B. Schineller, M. Heuken, Y. Dikme, H. Kalisch, R.A. Jansen, H. Behmenburg, T.C. Wen, M.B. Danailov, A.A. Demidovich // Proceeding of 14th International Workshop on Inorganic and Organic Electroluminescence & 2008 International Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting, Rome, Italy.– 2008. – P. 245–248.

14. Optical gain spectra and laser action of InGaN/GaN MQWs grown on silicon at pumping by femtoseconds pulses / A.V. Danilchik, E.V. Lutsenko, V.Z. Zubialevich, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, B. Schineller, M. Heuken, Y. Dikme, L. Khoshroo, H. Kalisch, R.A. Jansen, M.B. Danailov, A.A. Demidovich // Proceedings of the International Conference, NANOMEETING 2009. Physics, Chem. Appl. Nanostructures - Proc. Int. Conf. NANOMEETING 2009. – Minsk, 2009. – P. 156–159.

15. AlInGaN гетероструктуры для оптоэлектронных применений / Е.В. Луценко, А.В. Данильчик, А.Г. Войнилович, Н.В. Ржеуцкий, В.З. Зубелевич, В.Н. Павловский, Г.П. Яблонский, А.С. Шуленков, В.Н. Жмерик, А.М. Мизеров, С.В. Иванов, П.С. Копьев, Н. Kalisch, R.H. Jansen, V. Schineller, M. Heuken // 7-й Белорусско-Российский семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе” 1-5 июня Сборник статей. – Минск, 2009 г. – С. 233–238.

16. Determination of active region overheating temperature of GaN-based light emitting diodes promising for laser media pumping / E.V. Lutsenko, V.N. Pavlovskii, A.V. Danilchuk, M.V. Rzhetski, A.G. Vainilovich, V.Z. Zubialevich, A.V. Muravitskaya, G.P. Yablonskii // IEEE 5th International CONFERENCE on ADVANCED OPTOELECTRONICS and LASERS (CAOL'2010), September 10 - 14, 2010. Sevastopol, Crimea, Ukraine. – P. 219–221.

17. Влияние температуры на эффективность излучения светодиодов / А.В. Данильчик, Е.В. Луценко, Н.В. Ржеуцкий, В.Н. Павловский // Сборник научных трудов VIII Международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии». 27 – 30 сентября 2010 года, Минск. Беларусь. Том. 2. – С. 105–108.

18. Матрица светодиодов с принудительным охлаждением / А.В. Данильчик Е.В. Луценко, А.Г. Войнилович, Н.В. Ржеуцкий, М.С. Леоненя, В.Н. Павловский, Г.П. Яблонский // Сборник статей 9-го Белорусско-Российского Семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”. 28 - 31 мая 2013 г., Минск, Беларусь, – С. 178–181.

19. Температуры нагрева ультрафиолетовых светодиодов в матрице с высокой мощностью излучения / А.В. Данильчик, Б.Д. Урманов, Н.В. Ржеуцкий, Е.В. Луценко // Сборник статей 11-го Белорусско-Российского Семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”. 22 - 26 мая 2017 г., Минск, Беларусь, – С. 183–185.

Патенты

20. Эталонный монохромный светодиод: Пат. RU115889 на полезную модель / А.В. Данильчик, Е.В. Луценко, С.В. Никоненко. – Оpubл. 10.05.2012.

21. Эталонный источник излучения на основе белого светодиода: Пат. RU115890 на полезную модель / А.В. Данильчик, Е.В. Луценко, С.В. Никоненко. – Оpubл. 10.05.2012.

22. Эталонный монохромный светодиод: Пат. BY8354 на полезную модель / А.В. Данильчик, Е.В. Луценко, С.В. Никоненко. – Оpubл. 30.06.2012.

РЕЗЮМЕ

Данильчик Александр Викторович

Лазеры с оптической накачкой и светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках

Ключевые слова: полупроводник, квантовая яма, гетероструктура, нитрид галлия, кремниевая подложка, матрица светодиодов, генерация, фотолюминесценция, электролюминесценция

Целью диссертационной работы является создание лазеров на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках и определение пороговых условий генерации при оптическом возбуждении; создание светодиодов, на основе данных гетероструктур; разработка матриц светодиодов на сине-зеленую и УФ области спектра, цифровых моделей распределения температуры в матрицах светодиодов и верификация полученных данных с экспериментальными.

Методы исследования: измерение и анализ спектров и интенсивностей фотолюминесценции и генерации излучения гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках при возбуждении лазерным излучением, экспериментальное определение оптическими методами оптического усиления, температуры активной области светодиодов и сопоставление с данными моделирования распределения температуры в светодиодах и матрицах светодиодов.

Полученные результаты: Показано, что в гетероструктурах с верхним тонким слоем GaN (50 нм) и размерами барьеров (9,6 нм) большее влияние на порог генерации оказывает толщина квантовых ям. Методом жидкостного химического травления удалена подложка кремния оптически накачиваемых лазеров на основе InGaN гетероструктур с квантовыми ямами. Получено уменьшение пороговой плотности мощности генерации на длине волны ~ 465 нм в 1,5 раза, а также получена генерация на длинах волн, сдвинутых на 9 нм в длинноволновую область. В гетероструктурах InGaN/GaN с толстым слоем GaN (150 нм) и толщинами барьеров (~ 18 нм) высокие значения плотности V-дефектов приводят к росту пороговой накачки при оптическом возбуждении за счет увеличения рассеяния излучения в области квантовых ям. Разработаны компьютерные модели, описывающие распределение температуры в матрицах светодиодов в зависимости от потребляемой электрической мощности. Получено хорошее согласование результатов моделирования с измерениями температуры светодиодов оптическими методами. На полученных данных разработаны референсные источники излучения УФ диапазонов СIE А, В и С.

Рекомендации по использованию и область применения: Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития технологии производства инжекционных лазеров и светодиодов на основе GaN, выращенных на кремнии, а также создания источников излучения ультрафиолетового и видимого диапазонов спектра.

РЭЗІЮМЭ

Данільчык Аляксандр Віктаравіч

Лазеры з аптычнай накачкай і святлодыёды на аснове гетэраструктур з квантавымі ямамі InGaN/GaN на крамянёвых падкладках

Ключавыя словы: паўправаднік, квантавая яма, гетэраструктура, нітрыд галію, крамянёвая падкладка, матрыца святлодыёдаў, генерацыя, фоталюмінесцэнцыя, электралюмінесцэнцыя

Мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца стварэнне лазераў на аснове гетэраструктур з многымі квантавымі ямамі InGaN/GaN на крамянёвых падкладках і вызначэнне парогавых умоў генерацыі пры аптычным узбуджэнні; стварэнне святлодыёдаў, на аснове дадзеных гетэраструктур; распрацоўка матрыц святлодыёдаў на сіне-зялёную і УФ вобласці спектру; лічбавых мадэляў размеркавання тэмпературы ў матрыцах святлодыёдаў і верыфікацыя атрыманых дадзеных.

Метады даследавання: вымярэнне і аналіз спектраў і інтэнсіўнасцяў фоталюмінесцэнцыі і генерацыі выпраменьвання гетэраструктур з квантавымі ямамі InGaN/GaN на крамянёвых падкладках пры ўзбуджэнні лазерным выпраменьваннем, эксперыментальнае вызначэнне аптычнымі метадамі аптычнага ўзмацнення, тэмпературы актыўнай вобласці святлодыёдаў і супастаўленне з дадзенымі мадэлявання размеркавання тэмпературы ў святлодыёдах.

Атрыманыя вынікі: Паказана, што ў гетэраструктурах з верхнім тонкім пластом GaN (50 нм) і таўшчынямі бар'ераў (9,6 нм) большы ўплыў на парог генерацыі аказвае таўшчыня квантавых ям. Метадам вадкаснага хімічнага вытручвання выдаленая падкладка крэмнію аптычна напампоўваемых лазераў на аснове InGaN гетэраструктур з квантавымі ямамі. Атрымана памяншэнне парогавай шчыльнасці магутнасці генерацыі на даўжыні хвалі ~465 нм у 1,5 разы, а таксама атрымана генерацыя на даўжынях хваль, ссунутых на 9 нм у даўгахвалеваю вобласць. У гетэраструктурах InGaN/GaN з тоўстым пластом GaN (150 нм) і таўшчынямі бар'ераў (~18 нм) высокія значэнні шчыльнасці V-дэфектаў прыводзяць да росту парогавых значэнняў пры аптычным узбуджэнні за кошт павелічэння рассеявання выпраменьвання ў вобласці квантавых ям. Выкананы кампутарныя мадэлі, якія апісваюць размеркаванне тэмпературы ў матрыцах святлодыёдаў у залежнасці ад спажываемай электрычнай магутнасці. Атрымана добрае ўзгадненне вынікаў мадэлявання з вымярэннямі тэмпературы святлодыёдаў і матрыцы святлодыёдаў аптычнымі метадамі. На атрыманых дадзеных распрацаваны рэфэрэнсныя крыніцы для УФ дыяпазонаў СІЕ А, В і С.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення: Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для далейшага развіцця тэхналогіі вытворчасці інжэкцыйных лазераў і святлодыёдаў на аснове GaN, вырашчаных на крэмніі, а таксама стварэння крыніц выпраменьвання ультрафіялетавага і бачнага дыяпазонаў спектру.

SUMMARY

Danilchyk Aliaksandr Viktaravich

Optically pumped lasers and LEDs based on InGaN/GaN quantum well heterostructures on silicon substrates

Keywords: semiconductor, quantum well, heterostructure, gallium nitride, silicon substrate, LED matrix, generation, photoluminescence, electroluminescence.

The aim of the dissertation is to create lasers based on InGaN/GaN multiple quantum well heterostructures on silicon and to determine the threshold conditions for generation upon optical excitation; creation of light-emitting diodes on the basis of data of heterostructures; development of LED arrays for the blue-green and UV regions of the spectrum, digital models of temperature distribution in LED arrays and verification of the obtained data.

Research methods: measurement and analysis of spectra and intensities of photoluminescence and laser action of InGaN/GaN quantum-well heterostructures on silicon substrates upon excitation by laser radiation, experimental determination of optical amplification and temperature of the active region of LEDs by optical methods and comparison with the data of modeling the temperature distribution in LEDs and LED arrays.

Results: It is shown that in heterostructures with thin GaN upper layer (50 nm) and barrier thickness (9,6 nm), the quantum well thickness has a greater effect on the generation threshold. The silicon substrate of optically pumped lasers based on InGaN heterostructures with QWs was removed by liquid chemical etching. A decrease in the threshold power density of generation at a wavelength of ~465 nm by a factor of 1,5 was obtained, and generation was also obtained at wavelengths shifted by 9 nm to the long wavelength region. In InGaN/GaN heterostructures with a thick GaN layer (150 nm) and barrier thickness (~18 nm), high V-defect densities lead to an increase in the threshold values upon optical excitation due to an increase in radiation scattering in the QW region. Computer models have been developed that describe the temperature distribution in LED arrays depending on the electrical power consumed. A good agreement between the simulation results and the temperature measurements of LEDs and matrices of LEDs by optical methods is obtained. Based on the obtained data, reference sources for the CIE A, B and C UV ranges were developed.

Recommendations for use and scope of application: The obtained results can be used for further development of the technology for production of the injection lasers and LEDs based on GaN grown on silicon, as well as for creation of the radiation sources for ultraviolet and visible spectral ranges.

ДАНИЛЬЧИК
Александр Викторович

**ЛАЗЕРЫ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ И СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN/GaN НА
КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Подписано в печать 29.12.2022 г. Формат 60x90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать: ризография.
Объем: 1,5 усл. печ. л., 1,3 уч.–изд.л.
Тираж 60 экз. Заказ №

Государственное научное учреждение «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
имени Б.И.СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»
220072, Минск, пр. Независимости, 68-2
Отпечатано на ризографе ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси