

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор Белорусского
государственного университета
_____ Д.М.Курлович
« 03 » января 2023 г.

ОТЗЫВ

оппонирующей организации по диссертационной работе
ДАНИЛЬЧИКА Александра Викторовича

«Лазеры с оптической накачкой и светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика (принят на заседании объединенного научного семинара кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета и кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники факультета радиофизики и компьютерных технологий 19 января 2023 г., протокол № 9)

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Александра Викторовича Данильчика посвящена установлению закономерностей излучательных свойств оптически накачиваемых лазеров на основе гетероструктур InGaN/GaN с квантовыми ямами, выращенных на подложке кремния, исследованию влияния дефектов поверхности нитрида галлия на характеристики лазеров с множественными квантовыми ямами InGaN, а также оптимизации температурных характеристик светодиодов и матриц светодиодов, излучающих в сине-зеленом и УФ диапазонах спектра. Область исследований и результаты диссертационной работы соответствуют отрасли наук «физико-математические науки». Задачи, содержание, полученные результаты соответствуют пунктам: 2 (физика активных сред, полупроводников), используемых для усиления и генерации оптического излучения. 5 (методы управления параметрами лазерного излучения), 6 (полупроводниковые лазеры) раздела III паспорта специальности 01.04.21 – лазерная физика и удовлетворяют требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

2. Научный вклад соискателя в разработку научной проблемы с оценкой его значимости

Светодиоды и лазерные диоды на основе нитридных гетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN обладают большим потенциалом для широкого применения в производстве дисплеев, автомобильном освещении, волоконной и подводной беспроводной связи, а также в устройствах хранения данных с высокой плотностью записи. Создание светоизлучающих нитридных гетероструктур, в частности лазерных диодов на подложках кремния является перспективной и актуальной задачей с точки зрения возможности интеграции светоизлучающих устройств на основе соединений нитрида галлия с традиционной кремниевой микроэлектроникой с использованием хорошо отработанных автоматизированных технологических линий кремниевого производства. Однако рост нитридных гетероструктур на несогласованных подложках кремния приводит к ухудшению морфологии поверхности, при этом поверхностные дефекты могут оказывать существенное влияние на излучательные свойства и характеристики лазерного излучения гетероструктур InGaN/GaN. Диссертационная работа А.В. Данильчика, которая носит преимущественно экспериментальный характер, посвящена исследованию физических аспектов генерации в полупроводниковых лазерах, содержащих наборы квантовых ям InGaN/GaN. Соискатель устанавливает закономерности влияния толщины квантовых ям и V-дефектов на пороговые характеристики лазеров, влияния распределения температуры на оптимальные характеристики матриц светодиодов. Таким образом, вносит значимый вклад в развитие актуального научного направления – разработки полупроводниковых источников излучения ультрафиолетового диапазона на основе гетероструктур InGaN/GaN.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Основные результаты диссертации А.В. Данильчика, за которые может быть присуждена учёная степень кандидата физико-математических наук, а также положения, выносимые на защиту, являются новыми и оригинальными. Наиболее важные из них следующие:

1. Экспериментально установлено, что порог генерации лазеров с оптической накачкой на основе гетероструктур InGaN с множественными квантовыми ямами, выращенных на кремнии, изменяется от 137 до 300 кВт/см² при увеличении длины волны генерации от 440 до 465 нм, что связано с ростом поглощения в кремниевой подложке, при этом минимальный порог генерации реализуется на моде пятого порядка.

2. 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

слоем GaN толщиной 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 коэффициента потерь из-за рассеяния излучения в области квантовых ям.

3. На основании экспериментальных данных по определению температур активной области светодиодов проведено компьютерное прогнозирование распределения температуры в матрицах светодиодов в зависимости от потребляемой электрической мощности, что позволило создать матрицы светодиодов, излучающих в сине-зеленой и УФ областях спектра, с улучшенными характеристиками. Получено хорошее согласование результатов моделирования со значениями температур светодиодов в матрицах, полученных оптическими методами.

Практическое значение этих результатов заключается в том, что они направлены на отработку в Республике Беларусь технологии эпитаксиального роста нитридных гетероструктур на кремнии, что необходимо для разработки и производства светодиодов и гетеролазеров синего и УФ диапазонов.

4. Замечания по работе

При общей положительной оценке диссертационной работы необходимо сделать ряд замечаний:

1. В работе получены перспективные результаты по лазерной генерации при оптической накачке в InGaN/GaN гетероструктурах на подложке Si (111). Постоянная решетки растворов InGaN ~0,3189-0,3545 нм, а кремния ~0,541 нм. Каким образом нивелировались возникающие напряжения в слоях?
2. В 3 главе говорится о том, что «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...». Следовало бы показать распределение волновых функций электронов и дырок для квантовых ям различной толщины.
3. В 3 главе исследуется влияние подложки на спектральные и пороговые характеристики лазерных структур. Показано на рис. 3.10-3.11, что при удалении подложки Si на спектре фотолюминесценции сглаживаются ярко выраженные пики, наблюдаемые в структурах с подложкой Si. Какие механизмы, кроме роста шероховатостей прилегающего к подложке Si слоя после стравливания, приводят к уширению спектра.
4. Оценивались ли оптические потери при рассеянии излучения из квантовых ям на V-дефектах?
5. В работе на основе экспериментальных измерений определялся коэффициент материального усиления. Целесообразно было бы

- проводить анализ пороговых характеристик с указанием модового усиления, что облегчило бы сравнение с коэффициентом потерь.
6. В 4 главе упоминается возможность p -легирования. Как проводилось легирование и какие достигались концентрации легирующих примесей в образцах? Какие трудности стоят, чтобы сделать инжекционный лазер с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN?
 7. Также следует отметить имеющиеся в тексте диссертации и в автореферате небольшие стилистические погрешности и неточности, связанные с оформлением отдельных формул и графического материала. Так на стр. 6-7 автореферата есть повторение отдельных фраз.

Сделанные замечания не затрагивают сути и высокого качества работы и не влияют на её положительную оценку в целом.

5. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует.

Анализ содержания диссертации А.В. Данильчик позволяет сделать вывод, что соискатель обладает глубокими знаниями в области полупроводниковых лазерных и светодиодных гетероструктур с квантовыми ямами на основе InGaN/GaN. Все основные результаты, определяющие научную и практическую значимость работы, включая исследования образцов и объяснение полученных экспериментальных данных, выполнены автором лично. Результаты диссертационного исследования представлялись на ведущих научных конференциях и опубликованы в авторитетных отечественных и зарубежных научных журналах, среди которых «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фіз.-мат. навук», «Журнал прикладной спектроскопии», «Superlattices Microstructures», «Phys. Status Solidi», «Polymer Science - Series B». С учётом высокого научного уровня публикаций можно заключить, что **научная квалификация А.В. Данильчика соответствует искомой учёной степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертационная работа Данильчика Александра Викторовича является завершённым самостоятельным квалификационным исследованием, соответствует требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, пунктам 20-21 «Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий», **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика за:

- экспериментальную реализацию в оптически накачиваемых гетероструктурах InGaN/GaN с набором квантовых ям на кремниевых подложках лазерной генерации в области 430-480 нм и установлению закономерностей влияния толщины квантовых ям на пороговые характеристики;

- экспериментальное определение влияния потерь из-за рассеяния лазерного излучения V-дефектами в активном и волноводном слоях на порог генерации оптически накачиваемых лазеров на основе гетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN, выращенных на подложках кремния.
- развитие оптических методов определения значений температур активных областей светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, позволившими на основе прогнозирования распределения температуры в зависимости от потребляемой электрической мощности, создать оптимальные матрицы светодиодов на сине-зеленую и ультрафиолетовую области излучения, а также референсные источники для УФ диапазонов СИЕ А, В и С.

Отзыв о диссертации Данильчика Александра Викторовича «Лазеры с оптической накачкой и светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика, согласно приказу Первого проректора БГУ от 19.01.2023 № 29-ОД обсужден и принят на заседании объединенного научного семинара кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета и кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники факультета радиофизики и компьютерных технологий 19 января 2023 г. протокол № 9.

На заседании присутствовали д.ф.-м.н. проф. Толстик А.Л., заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии (председатель научного семинара); д.ф.-м.н. доц. Ушаков Д.В., декан факультета радиофизики и компьютерных технологий (эксперт); д.ф.-м.н. проф. Афоненко А.А., заведующий кафедрой квантовой радиофизики и оптоэлектроники; д.ф.-м.н. проф. Воропай Е.С., профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии; к.ф.-м.н. доц. Мельникова Е.А., доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии; к.ф.-м.н. доц. Сташкевич И.В., доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии; к.ф.-м.н. доц. Горбач Д.В., доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии; к.ф.-м.н. доц. Буров Л.И., доцент кафедры общей физики; к.ф.-м.н. Свито И.А., заведующий кафедрой энергофизики; к.ф.-м.н. доц. Мазаник А.В., ведущий научный сотрудник кафедры энергофизики; к.ф.-м.н. Янковский Ю.Н., ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников и наноэлектроники; Казючиц Н.М., заведующий НИЛ кафедры физики полупроводников и наноэлектроники; Байко Д.С., ведущий инженер кафедры энергофизики (всего: 4 доктора наук, 7 кандидатов наук).

СЛУШАЛИ:

1. Доклад Данильчика Александра Викторовича, который изложил краткое содержание, основные положения и выводы представленной диссертации.

2. Проект отзыва оппонировающей организации, представленный д.ф.м.н. Д.В.Ушаковым – экспертом оппонировающей организации, назначенным приказом № 29-ОД от 19.01.2023 г.

В обсуждении диссертации приняли участие: профессор А.Л.Толстик, профессор Е.С.Воропай, профессор А.А.Афоненко, доцент Д.В.Ушаков, доцент А.В.Мазаник.

В голосовании приняли участие 11 членов семинара, имеющие ученые степени. Результаты открытого голосования: «За» – 11, «Против» – нет, «Воздержались» – нет.

ПОСТАНОВИЛИ:

1. Рекомендовать к защите диссертацию Данильчика Александра Викторовича «Лазеры с оптической накачкой и светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.
2. Одобрить заключение оппонировающей организации.

Председатель научного семинара -
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ



А.Л.Толстик

Эксперт -
доктор физико-математических наук,
доцент, декан факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ



Д.В.Ушаков

Ученый секретарь на заседании -
кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ



Е.А.Мельникова



МІНІСТЭРСТВА АДУКАЦЫІ
РЭСПУБЛІКІ БЕЛАРУСЬ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ



**БЕЛАРУСКІ ДЗЯРЖАЎНЫ
ЎНІВЕРСІТЭТ**

пр. Незалежнасці, 4, 220030, г. Мінск
тэл. (017) 209 50 44, факс (017) 270 59 40
E-mail: bsu@bsu.by
Разліковыя рахункі: бюджэтны
BY12BLBB36040100235722001001,
пазабюджэтны
BY88BLBB36320100235722001001
у Дырэкцыі ААТ «Белінвестбанк» па г. Мінску
і Мінскай вобласці, адрас банка:
г. Мінск, вул. Калектарная, 11, БИК BLBBBY2X,
УНП 100235722, АКПА 02071814

24 ЯНВ 2023

№ 5.1/644

на _____ ад _____

[_____]

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск
тел. (017) 209 50 44, факс (017) 270 59 40
E-mail: bsu@bsu.by
Расчетные счета: бюджетный
BY12BLBB36040100235722001001,
внебюджетный
BY88BLBB36320100235722001001
в Дирекции ОАО «Белинвестбанк» по г. Минску
и Минской области, адрес банка:
г. Минск, ул. Коллекторная, 11, БИК BLBBBY2X,
УНП 100235722, ОКПО 02071814

Председателю Совета по защите
диссертаций Д.01.05.01
Белому В.Н.

Об отзыве на диссертацию
Данильчика А.В.

Уважаемый Владимир Николаевич!

В соответствии с письмом от 09.01.2023 № 10-03/3 Белорусский государственный университет направляет отзыв на диссертацию Данильчика Александра Викторовича «Лазеры с оптической накачкой и светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Белорусский государственный университет выражает согласие на размещение данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси в сети Интернет.

Приложение: Отзыв на диссертацию Данильчика Александра Викторовича «Лазеры с оптической накачкой и светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевых подложках» на 6 л. в 2 экз.

Первый проректор

Д.М.Курлович