

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.205.02 ПРИ
ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ
НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф.ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.06.2019 г. № 12

о присуждении Цацульникову Андрею Федоровичу ученой степени
доктора физико-математических наук.

Диссертация «Светоизлучающие III-N гетероструктуры с трехмерной локализацией носителей заряда» по специальности 01.04.10 физика полупроводников принята к защите 20.03.2019 г., протокол № 9 п.1 диссертационным советом Д 002.205.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», расположенного по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 11 апреля 2012 приказом ВАК РФ № 105/нк.

Соискатель Цацульников Андрей Федорович, 1966-го года рождения, окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ) в 1989 году. С 1989 по 1992 обучался в очной аспирантуре Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина) (факультет электронной техники, базовая кафедра оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе), В 1992 г. в ФТИ им. А.Ф. Иоффе защитил кандидатскую диссертацию на тему «Структура и свойства глубоких акцепторных центров, создаваемых элементами подгруппы меди в GaAs». С июля 1992 г. по апрель 2016 г. работал в ФТИ им. А.Ф. Иоффе последовательно в должностях

младшего научного сотрудника, научного сотрудника и старшего научного сотрудника. С 2016 г. работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологическом центре микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук в должности заместителя директора по научной работе.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, 194021, СПб, ул. Политехническая 26) и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологическом центре микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, 194021, СПб, ул. Политехническая 26).

Официальные оппоненты:

1. Журавлев Константин Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией молекулярно лучевой эпитаксии соединений АЗВ5 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН» (ИФП СО РАН), 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.
2. Мармалюк Александр Анатольевич, доктор технических наук, начальник НТЦ, Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (АО «НИИ «Полюс»), 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1.
3. Зубков Василий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 190103, г. Санкт-Петербург, Рижский пр. 26. в своем положительном заключении, подписанном Главным научным сотрудником лаборатории приборов и методов эпитаксиальных нанотехнологий доктором физико-математических наук Горай Леонидом Ивановичем и председателем научного семинара, главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук Фофановым Яковом Андреевичем и утвержденном директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), доктором технических наук, профессором Владимиром Ефимовичем Курочкиным указали, что по актуальности темы, новизне и степени обоснованности результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их научной и практической значимости диссертационная работа А.Ф. Цацульникова «Светоизлучающие III-N гетероструктуры с трехмерной локализацией носителей заряда» полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Цацульников Андрей Федорович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников. Отзыв содержит следующие замечания.

«1. В работе получены актуальные результаты по эпитаксиальному росту светодиодных структур с монокристаллической активной областью, однако не представлены результаты сравнения длительностей эпитаксиального процесса роста такой монокристаллической светодиодной структуры и стандартной светодиодной структуры, излучающей в синем области спектра.

2. В работе не отражена возможность практического использования полученных результатов по разработке технологии эпитаксиального роста

гетероструктур для светодиодов желто-зеленого диапазоне для изготовления источников освещения, например, RGB источников белого света.»

Соискатель имеет более 250 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 51 работа, опубликованная в рецензируемых научных изданиях, входящих в базу Web of Science / Web of Knowledge.

Среди опубликованных статей наиболее важными по теме диссертации являются следующие работы:

1. Musikhin Yu.G., Gerthsen D., Bedarev D.A., Bert N.A., Lundin W.V., Tsatsulnikov A.F., Sakharov A.V., Usikov A.S., Alferov Zh.I., Krestnikov I.L., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D. Influence of metalorganic chemical vapor deposition growth conditions on In-rich nanoislands formation in InGaN/GaN structures // Appl. Phys. Lett. – 2002 – Vol. 80 (12) - Pp. 2099-2101 (статья, вклад соискателя: участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

2. Krestnikov I.L., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D., Sakharov A.V., Lundin W.V., Tsatsul'nikov A.F., Usikov A.S., Alferov Zh.I., Musikhin Yu.G., Gerthsen D. Quantum dot origin of luminescence in InGaN-GaN structures. // Phys. Rev. B – 2002 – Vol. 66 - P. 155310 (статья, вклад соискателя: участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

3. Цацульников А.Ф., Лундин В.В, Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Черкашин Н.А., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Мизеров М.Н., Park Hee Seok, Nuytch M., Hue F. Варизонная активная область на основе короткопериодных InGaN/GaN сверхрешеток для мощных светоизлучающих диодов диапазона 440-470 нм // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (1) - Стр. 96-100 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции и

электролюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

4. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Крыжановская Н.В., Сеницын М.А., Сизов В.С., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Монолитный белый светодиод с активной областью на основе квантовых ям InGaN, разделенных короткопериодными InGaN/GaN сверхрешетками // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (6) - Стр. 837-840 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции и электролюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

5. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Сизов В.С., Усов С.О., Мусихин Ю.Г., Gerthsen D. Влияние водорода на локальную фазовую сепарацию в тонких слоях InGaN и свойства светодиодных структур на их основе // Физика и техника полупроводников – 2011 – Т. 45 (2) - Стр. 274-279 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции и электролюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

6. Single quantum well deep-green LEDs with buried InGaN/GaN short-period superlattice W.V. Lundin, A.E. Nikolaev, A.V. Sakharov, E.E. Zavarin, G.A. Valkovskiy, M.A. Yagovkina, S.O. Usov, N.V. Kryzhanovskaya, V.S. Sizov, P.N. Brunkov, A.L. Zakgeim, A.E. Cherniakov, N.A. Cherkashin, M.J. Hytch, E.V. Yakovlev, D.S. Bazarevskiy, M.M. Rozhavskaya, A.F. Tsatsulnikov // Journal of Crystal Growth 315 (2011) 267–271 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции и

электролюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

7. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Мусихин Ю.Г., Усов С.О., Мизеров М.Н., Черкашин Н.А. Гетероструктуры InGaN/GaN, выращенные методом субмонослойного осаждения // Физика и техника полупроводников – 2012 – Т. 46 (10) - Стр. 1357-1362 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

8. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Рожавская М.М., Усов С.О., Брунков П.Н., Сеницын М.А., Давыдов Д.В., Мизеров М.Н., Черкашин Н.А. Композитные InGaN/GaN/InAlN-гетероструктуры, излучающие в желто-красной области спектра // Физика и техника полупроводников – 2012 – Т. 46.(10) - Стр. 1304-1308 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

9. Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V., Sakharov A.V., Nikolaev A.E., Zavarin E.E., Usov S.O., Yagovkina M.A., Hÿtch M.J., Korytov M., Cherkashin N. Formation of Three-Dimensional Islands in the Active Region of InGaN Based Light Emitting Diodes Using a Growth Interruption Approach // Science of Advanced Materials - 2015 - Vol. 7 - Pp. 1629–1635 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции и электролюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

10. Titkov I.E., Yadav A., Karpov S.Yu., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Slight T.J., Gorodetsky A., Rafailov E.U. Superior color rendering with a

phosphor-converted blue-cyan monolithic light-emitting diode // Laser Photonics Rev. – 2016 – Vol. 10 (6) – Pp. 1031–1038 (статья, вклад соискателя: постановка задачи, участия в исследованиях технологии роста, участие в исследованиях экспериментальных спектров фотолюминесценции, анализ полученных результатов, участие в подготовке текста статьи).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. из Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета РАН от чл.-корр. РАН, доктора физико-математических наук, проректора по науке, заведующего лабораторией нанофотоники Жукова Алексея Евгеньевича, отзыв положительный, замечания:

«Замечание или, скорее, пожелание, возникшее по материалам диссертации, следующее. Автором обсуждается возможность создания источников света, излучающих одновременно на нескольких длинах волн, за счет применения нескольких отличающихся по химическому составу активных областей. Предпринимались ли попытки промоделировать протекание тока в таких структурах с целью объяснения темпов излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар в более коротковолновой и более длинноволновой активной области в зависимости от конструкции структуры, величины тока накачки, температуры?»

2. из ООО «Коннектор Оптике» от технического директора, чл.-корр. РАН, доктора физико-математических наук, профессора факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики Егорова Антона Юрьевича, отзыв положительный, без замечаний.

3. из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» от директора института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике доктора технических наук,

профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, Каргина Николая Ивановича, отзыв положительный, без замечаний.

4. из Института проблем машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН), от доктора физико-математических наук, заведующего лабораторией структурных и фазовых превращений в конденсированных средах Института проблем машиноведения (ИПМаш) РАН, заслуженного деятеля науки РФ, Кукушкина Сергея Арсеньевича, отзыв положительный, без замечаний.

5. из Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. декана Факультета Лазерной Фотоники и Оптоэлектроники, от доктора физико-математических наук, ведущего профессора Романова Алексея Евгеньевича, отзыв положительный, замечания:

«В качестве замечания по автореферату отмечу, что при упоминании высокой эффективности излучения и высокой квантовой эффективности полученных структур и приборов (см. стр. 5 автореферата) было бы полезно указать их значения».

6. из Государственного научного учреждения «Института физики имени Б.И. Степанова (Институт физики НАН Беларуси) Национальной академии наук Беларуси», от заведующего центром «Полупроводниковые технологии и лазеры» доктора физико-математических наук, профессора Яблонского Геннадия Петровича и от заместителя заведующего центром «Полупроводниковые технологии и лазеры», заведующего отраслевой лабораторией «Молекулярно пучковой эпитаксии нитридных гетероструктур» кандидата физико-математических наук, доцента, Луценко Евгения Викторовича, отзыв положительный, без замечаний.

7. из АО «Элма-Малахит» от заместителя генерального директора по развитию, кандидата технических наук Цыпленкова Игоря Николаевича, отзыв положительный, замечания:

«К сожалению, имея богатый экспериментальный материал, автор не сделал попытки каким-то образом представить механизм влияния состава газовой фазы и других технологических факторов на формирование неоднородностей в слое InGaN, предложить возможную модель этого эффекта. Это позволило бы расширить фундаментальные представления о процессе формирования эпитаксиальных слоев сложных составов, а также усилило бы физико-математический аспект рассматриваемой работы».

8. из ООО «Софт-Импакт», от кандидата физико-математических наук, ведущего специалиста Карпова Сергея Юрьевича, отзыв положительный, без замечаний.

9. из Санкт-Петербургского Государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) от кандидата технических наук, доцента Тихомирова Владимира Геннадьевича, отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается близостью областей научных исследований, наличием публикаций в соответствующей области науки, согласующихся с тематикой диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые продемонстрирована in-situ трансформация сплошной квантовой ямы InGaN в массив изолированных островков, обеспечивающая трехмерную локализацию носителей заряда, стимулированная условиями эпитаксиального роста: прерываниями роста в азот-водородной атмосфере после осаждения квантовой ямы InGaN и увеличением давления при использовании прерываний роста.

2. Впервые проведено комплексное исследование влияния технологических параметров эпитаксиального роста квантовой ямы InGaN (температуры роста, потока индия, давления, состава газовой атмосферы в реакторе) на формирование локальных In-обогащенных областей, в том числе на формирование квантовых точек.

3. Впервые для InGaN/GaN гетероструктур предложен и изучен метод субмонослойного роста.

4. Впервые методом циклической конвертации слоя InGaN в GaN при прерываниях роста в азот-водородной атмосфере созданы короткопериодные сверхрешетки InGaN/GaN.

5. Впервые для III-N материалов предложены и изучены композитные гетероструктуры InGaN/GaN/InAlN, позволяющие расширить спектр излучения квантовых ям InGaN.

6. Впервые предложены и изучены светоизлучающие структуры синего и желто-зеленого диапазона, а также светоизлучающие структуры с монокристаллической активной областью, основанные на комбинации короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN, сформированных методом конвертации InGaN в GaN, и трансформированных в островки квантовых ям InGaN.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. Разработанные методы формирования как пространственно неоднородных, так и пространственно однородных квантовые ямы InGaN, позволяют контролировать длину волны и ширину линии излучения, подавлять транспорт носителей к центрам безызлучательной рекомбинации и создавать светоизлучающие приборы с высокой эффективностью излучения.

2. Разработанные технологии и конструкция активной области светодиодных структур синего и желто-зеленого диапазона, позволили продемонстрировать высокую квантовую эффективность для излучения в диапазонах 430-460 нм и 540-560 нм.

3. На основе монокристаллических светодиодных структур, излучающих в диапазоне 430-510 нм, созданы белые светодиоды, обеспечивающие предельные значения индекса цветопередачи $Ra(8)=98.6$ и $Ra(14)=97.4$ при коррелированной цветовой температуре $CCT=3300-3500$ К, что соответствует лучшему мировому уровню.

Достоверность и надежность результатов.

Достоверность и надежность полученных результатов обусловлена современным уровнем исследований, в частности, использованием промышленного технологического оборудования ГФЭ МОС для эпитаксиального роста гетероструктур. Используемое ростовое оборудование позволяло применять специализированные методы контроля параметров эпитаксиального роста. Для исследования структурных, оптических и электрофизических свойств гетероструктур использовалось разнообразное измерительное оборудование, включая рентгеновскую дифрактометрию, растровую электронную микроскопию, атомно-силовую микроскопию, просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения, вторичную ионную масс спектроскопию, фото- и электролюминесценцию, спектроскопию отражения и измерения ток-мощностных характеристик светодиодов. Достоверность проводимых измерений подтверждалась воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Результаты работы опубликованы в авторитетных реферируемых российских и международных журналах и докладывались на различных международных и всероссийских конференциях и симпозиумах по физике и технологии полупроводников.

Личный вклад автора.

Представленная диссертационная работа является обобщением научных результатов, полученных автором при выполнении исследований в лаборатории физики полупроводниковых гетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе и НТЦ Микроэлектроники РАН.

Личный вклад Цацульникова А.Ф. в исследования, представленные в диссертации, заключался в постановке задач, разработке плана исследований, проведении исследований оптических и электрических свойств гетероструктур, систематизации и обобщении полученных результатов. Цацульников А.Ф. исследовал взаимосвязь технологических параметров эпитаксиального роста III-N гетероструктур с их структурными и оптическими свойствами и занимался разработкой новых подходов к созданию светоизлучающих приборов на основе III-N гетероструктур. В совместных работах Цацульников А.Ф. участвовал в написании публикаций, а также представлял результаты исследований на научных конференциях.

На заседании 27.06.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Цацульникову А.Ф. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 15 докторов наук, по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 21, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ

Диссертационного Совета Д 002.205.02

Академик, доктор физико-математических наук

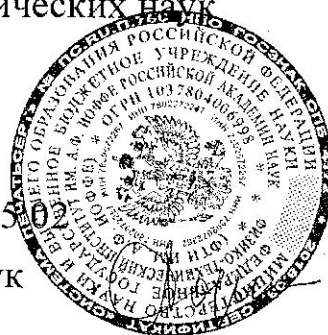


Р.А. СУРИС

УЧЕНЬЙ СЕКРЕТАРЬ

Диссертационного Совета Д 002.205.02

доктор физико-математических наук



Л.М. СОРОКИН