

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 29.09.2022 № _____ 5 _____

О присуждении Кириченко Юлии Константиновне, гражданке РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Внутренние оптические потери в мощных полупроводниковых лазерах на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур», по специальности 1.3.11 - физика полупроводников принята к защите «07» июля 2022 г., протокол № 3, диссертационным советом ФТИ 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Кириченко [Бобрецова] Юлия Константиновна, 1993 года рождения, в 2017 г. с отличием окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки 16.04.01 – «техническая физика». С 2018 по 2022 гг. проходила обучение по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» в аспирантуре при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника в лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – Пихтин Никита Александрович, кандидат физико-математических наук, руководитель Центра физики наногетероструктур Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук **Крыжановская Наталья Владимировна**, заведующая Международной лабораторией квантовой оптоэлектроники Санкт-Петербургского филиала федерального государственного автономного образовательного

учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”», 194100, СПб, Кантемировская ул., д.3, корп.1;

2. Кандидат физико-математических наук **Рывкин Борис Соломонович**, старший научный сотрудник лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, СПб, ул. Политехническая, д. 26,

- дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»** (197101, СПб, Кронверкский пр., д.49, лит. А.) в своем заключении, подписанном директором института перспективных систем передачи данных Университета ИТМО, доктором физико-математических наук Владиславом Евгеньевичем Бугровым, утвержденном ректором Университета ИТМО, доктором технических наук Владимиром Николаевичем Васильевым, дала положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенное научное исследование, соответствующее профилю совета 34.01.02 (специальность 1.3.11 – «физика полупроводников»). В отзыве содержатся следующие замечания:

1. В предложенной методике измерения поглощения на свободных носителях в полупроводниковых лазерах при помощи зондирующего излучения в качестве объекта исследования был рассмотрен полупроводниковый лазер с коэффициентами отражения обоих зеркал, равными 5%. Изготавливаемые промышленностью полупроводниковые лазеры обычно обладают другими коэффициентами отражения зеркал и имеют в конструкции глухое и выходное зеркала. Как это учитывалось при формулировании выводов эксперимента? Было бы интересно обсудить границы применимости и целесообразность представленной экспериментальной методики исследования внутренних оптических потерь для различных материалов и конструкций полупроводниковых лазеров.

2. Как была определена точность измерения поглощения на свободных носителях в полупроводниковых лазерах при помощи зондирующего излучения? Была ли использована какая-то референтная методика измерений? Дополнительно было бы полезно прокомментировать динамические характеристики и особенности накопления носителей заряда и связанных с ними внутренних оптических потерь ввиду того, что разработанная автором методика применяется для импульсного режима работы исследуемых лазеров.

3. Учитывалось ли в предложенной автором методике измерения поглощения на свободных носителях, что с ростом тока накачки изменяется ширина спектра лазерной генерации и, возможно, «хвосты» спектров зондирующего излучения и лазерной генерации могут перекрываться, что также дает дополнительный вклад в поглощение?

4. В полупроводниковом лазере положения квазиуровней Ферми после начала лазерной генерации не фиксированы, что хорошо известно из исследований полупроводниковых

лазеров с замкнутой кольцевой модой; может быть показано, что интенсивность спонтанного излучения продолжает расти после начала лазерной генерации. Учитывался ли этот эффект в диссертационной работе? Если да, то какой его относительный вклад в значение внутренних оптических потерь?

5. В теоретической части работы недостаточно подробно раскрывается влияние пространственных неоднородностей распределения носителей заряда и фотонов по длине резонатора на процессы накопления носителей и насыщение выходной мощности.

6. Недостаточно подробно проведено сравнение полученных в работе результатов с результатами мирового уровня и с результатами других научных групп.

7. Научные положения сформулированы в общем виде, однако это компенсируется подробно сформулированными основными результатами работы.

Отмечено, что указанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации. Результаты работы обладают научной и практической ценностью, обоснованы и достоверны. Исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, являются актуальными и своевременными. Результаты диссертации апробированы на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в шести научных статьях в рецензируемых журналах, отвечающих требованиям ВАК.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Кириченко Юлия Константиновна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 4 отзыва, все они положительные.

1. Отзыв кандидата технических наук Симакова Владимира Александровича, Почетного работника науки и высоких технологий Российской Федерации, заместителя начальника научно-производственного комплекса АО НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха (117342, Москва, ул. Введенского, д.3). Отзыв положительный, без замечаний.
2. Отзыв доктора физико-математических наук Ладугина Максима Анатольевича, доцента кафедры «Квантовая электроника» физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), (141701, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9). Отзыв положительный, без замечаний.
3. Отзыв доктора технических наук Тарасова Сергея Анатольевича, заведующего кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197022, СПб, ул. Профессора Попова, д. 5). Отзыв положительный, без замечаний.

4. Отзыв доктора физико-математических наук Цацульникова Андрея Федоровича, заместителя директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (194021, СПб, ул. Политехническая, д. 26). Отзыв положительный, без замечаний.

Научная и практическая значимость работы

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** решен большой комплекс экспериментальных и теоретических задач, которые являются актуальными для современной физики полупроводников в целом и, в частности, для AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур, а именно:

1. Было показано, что зависимость внутренних оптических потерь от плотности тока накачки для лазеров с различными параметрами резонатора (длина, коэффициенты отражения зеркал) по-разному влияет на насыщение ватт-амперной характеристики (ВтАХ) и максимальную оптическую мощность.
2. Экспериментально показано, что в AlGaAs/InGaAs/GaAs лазерах насыщение ВтАХ в импульсном режиме определяется ростом внутренних оптических потерь и падением внутренней квантовой эффективности стимулированного излучения, пропорциональными росту плотности тока накачки лазера.
3. Экспериментально показано, что форма зависимостей внутренних оптических потерь от тока накачки зависит от конструкции лазерной гетероструктуры. Для лазеров с расширенным волноводом выше порога генерации зависимость близка к линейной в диапазоне тока накачки до 60 А при температурах 25-65 °С. Характерные значения внутренних оптических потерь составляют около 1.7 см^{-1} при плотности тока накачки 10 кА/см^2 . Для лазеров со сверхузким волноводом (100-200 нм) выше порога генерации зависимость сублинейна и меньше зависит от тока. При плотности тока накачки 10 кА/см^2 внутренние оптические потери для них находятся в диапазоне $2-3 \text{ см}^{-1}$.
4. Экспериментально показано, что для лазеров с расширенным до 3 мкм волноводом из GaAs при высоких плотностях тока накачки (20 кА/см^2) и при повышенных температурах (более 50°C) наблюдается сверхлинейный рост внутренних оптических потерь с плотностью тока накачки, который сопровождается падением внутренней дифференциальной квантовой эффективности лазера, в силу делокализации носителей заряда из активной области.
5. Экспериментально показано, что в лазерах с расширенным волноводом (1.7-3 мкм) падение внутренней квантовой эффективности (ВКЭ) стимулированного излучения невелико (88%) и наблюдается только для лазеров со слабой локализацией носителей заряда при высоких плотностях тока и температурах.

6. Экспериментально показано, что эффекты делокализации носителей заряда можно практически полностью подавить, используя в составе волновода лазера $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$. При этом наблюдается увеличение градиента токовой зависимости внутренних оптических потерь. За счёт подавления падения квантовой эффективности удалось добиться повышения пиковой оптической мощности до 60 Вт при 100 А (апертура 100 мкм, температура теплоотвода 25 °С, частота 1 кГц, длительность импульса 100 нс).
7. Экспериментально показано, что в лазерах со сверхузким волноводом (100-200 нм) падение ВКЭ стимулированного излучения велико. Для некоторых типов таких гетероструктур ВКЭ составляет всего 60% при плотности тока 12 кА/см² при исходном значении 85-95% на пороге генерации.
8. Повысить ВКЭ в лазерах со сверхузким волноводом (100-200 нм) можно за счёт применения искусственных барьерных слоёв на границе волновод-эмиттер.
9. Для лазеров со сверхузкими волноводами (< 200 нм) наблюдается аномальное снижение внутренних оптических потерь с ростом температуры.
10. Экспериментально показано, что в $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ лазерах насыщение ВтАХ в непрерывном режиме работы определяется ростом внутренних оптических потерь, пропорциональным росту тока накачки и температуры лазера. При более высоких токах в непрерывном режиме наблюдается падение ВКЭ стимулированного излучения.
11. Теоретически описаны экспериментальные результаты, полученные для лазеров с расширенными волноводами. Моделирование позволило оценить вклады различных внутренних механизмов в рост внутренних оптических потерь и падение внутренней квантовой эффективности и обосновать полученные результаты.

Практическая значимость работы состоит в возможном применении полученных результатов для оптимизации лазерных гетероструктур. В частности, были получены следующие практические результаты:

1. Разработаны, изготовлены и протестированы полупроводниковые лазеры различных конструкций. Все изготовленные гетероструктуры обеспечивают стабильную лазерную генерацию в непрерывном режиме с выходной мощностью в диапазоне от единиц до более 10 Вт и с пиковым КПД 40-65%.
2. Достигнуты пиковая оптическая мощность более 65 Вт (в две стороны) для длинных образцов с обеими просветлёнными гранями и пиковая оптическая мощность 90 Вт для стандартных образцов с выводом излучения через переднее зеркало для лазеров на основе гетероструктуры с расширенным AlGaAs волноводом в импульсном режиме работы.
3. Показано, что снижение температуры лазера до 120 К позволяет значительно уменьшить внутренние оптические потери и добиться увеличения линейности ВтАХ. При температуре 120 К были достигнуты оптические мощности 27 Вт в непрерывном и 120 Вт в импульсном режимах.

Диссертация является законченной, последовательной и внутренне согласованной научной работой, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение.

Достоверность и надежность результатов

Основные положения и выводы диссертации надежно обоснованы. Достоверность полученных результатов обусловлена использованием современных экспериментальных и расчетных методов исследования, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также внутренней согласованностью результатов. Полученные результаты полностью коррелируют с известными литературными данными. Представленные результаты не раз проходили апробацию на российских и международных конференциях, а также были представлены в периодических изданиях, входящих в международные базы данных.

Личный вклад автора

Соискатель принимала непосредственное участие в разработке и моделировании различных конструкций гетероструктур на основе твердых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs. Соискатель лично проводила постростовую обработку выращенных гетероструктур.

Соискатель участвовала в разработке экспериментальной методики измерения коэффициента поглощения в волноводе работающего полупроводникового лазера. Проводила сборку, настройку и юстировку экспериментального стенда. Проводила измерения коэффициента поглощения, мощностных и спектральных характеристик для широкой выборки лазерных образцов. Соискатель принимала участие в разработке экспериментального стенда для измерений при температуре 120 К и проводила измерения.

Соискатель проводила обработку и анализ результатов, участвовала в их обсуждении. Участвовала в разработке математической модели для расчета характеристик лазеров, составляла компьютерную программу расчета и проводила ее оптимизацию.

Соискатель принимала участие в апробации работ на конференциях, семинарах и подготовке результатов исследований к публикациям. Постановка задач и целей работы осуществлялась совместно с научным руководителем.

Апробация работы

Результаты данной работы были доложены на следующих конференциях: 5-й Российский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2016), VI Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Москва, 2017), 6-й Российский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2018), 18th International Conference Laser Optics ICLO 2018 (Санкт-Петербург, 2018), 12-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, 2019), XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2019), XXI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2019), Photonics West 2020 (Сан-Франциско, 2020).

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus (в скобках указан личный вклад автора):

1. Веселов Д.А., Шашкин И.С., **Кириченко (Бобрецова) Ю.К.**, Бахвалов К.В., Лютецкий А.В., Капитонов В.А., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. Исследование импульсных характеристик полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом при низких температурах (110-120 К) // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т.50, №10. – С. 1414. (Постростовая часть цикла изготовления образцов, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, подготовка публикации)
2. Veselov D.A., **Kirichenko (Bobretsova) Y.K.**, Leshko A.Y., Shamakhov V.V., Slipchenko S.O., Pikhitin N.A. Measurements of internal optical loss inside an operating laser diode // J. Appl. Phys. – 2019. – Vol. 126, №21. – P.213107. (Постростовая часть цикла изготовления образцов, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, подготовка публикации)
3. **Кириченко (Бобрецова) Ю.К.**, Веселов Д.А., Климов А.А., Вавилова Л.С., Шамахов В.В., Слипченко С.О., Пихтин Н.А. AlGaAs/GaAs/InGaAs-лазеры со сверхузким волноводом // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, №7. – С.661. (Постростовая часть цикла изготовления образцов, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, подготовка публикации)
4. Veselov D.A., **Kirichenko (Bobretsova) Y.K.**, Klimov A.A., Bakhvalov K.V., Slipchenko S.O., Pikhitin N.A. Internal optical loss and internal quantum efficiency of a high-power GaAs laser operating in the CW mode // Semicond. Sci. Technol. – 2021. – Vol. 36, №11. – P. 115005. (Постростовая часть цикла изготовления образцов, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, подготовка публикации)
5. **Кириченко (Бобрецова) Ю.К.**, Веселов Д.А., Подоскин А.А., Воронкова Н.В., Слипченко С.О., Ладугин М.А., Багаев Т.А., Мармалюк А.А., Пихтин Н.А. Экспериментальная методика исследования оптического поглощения в волноводных слоях полупроводниковых лазерных гетероструктур // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51, №2. – С.124. (Постростовая часть цикла изготовления образцов, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, подготовка публикации)
6. **Кириченко (Бобрецова) Ю.К.**, Веселов Д.А., Климов А.А., Бахвалов К.В., Шамахов В.В., Слипченко С.О., Андрушкин В.В., Пихтин Н.А. Оптическое поглощение в волноводе AlGaAs-гетероструктуры n-типа // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51, №11. – С.987. (Постростовая часть цикла изготовления образцов, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, подготовка публикации)

На заседании 29 сентября 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Кириченко Ю.К. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 20 человек, из них 13 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, очно проголосовали 12:

За присуждение Кириченко Юлии Константиновне ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – 12.

Против – 0.

Недействительных бюллетеней – 0.

Из 8 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Кириченко Юлии Константиновне ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали:

«за» - 8

«против» - 0

«воздержались» - 0.

Итого: Из 25 членов совета участвовали в очно-заочном голосовании 20.

За: - 20

Против: - 0

Воздержались: - 0

Зам. председателя диссертационного
совета,
д. ф.-м. н.,

Глазов Михаил Михайлович

Ученый секретарь диссертационного
совета,
д. ф.-м. н.

Сорокин Лев Михайлович

29 сентября 2022 г.