



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»
(Университет ИТМО)

Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А,
Санкт-Петербург, Россия, 197101
Тел.: (812) 480-00-00 | Факс: (812) 232-23-07
od@itmo.ru | itmo.ru

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Университета ИТМО,
доктор технических наук, профессор

_____ Васильев В.Н.

«__» _____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» - на диссертацию Кириченко Юлии Константиновны на тему: «Внутренние оптические потери в мощных полупроводниковых лазерах на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

Диссертационная работа Кириченко Ю.К. посвящена экспериментальному исследованию причин и особенностей роста внутренних оптических потерь в лазерных гетероструктурах различных конструкций и численному определению соотношения вкладов различных внутренних механизмов в процессы роста внутренних оптических потерь и падения внутренней квантовой эффективности.

Актуальность диссертационной работы. Рост внутренних оптических потерь и снижение внутреннего квантового выхода являются основной причиной ограничения оптической мощности полупроводниковых лазеров при увеличении тока накачки. До настоящего времени не существует единого подхода, пригодного для описания наблюдаемых в эксперименте эффектов насыщения ватт-амперных характеристик полупроводниковых лазеров при их работе в импульсном и непрерывном режимах. В то же время достижение высокой выходной мощности и высокой эффективности имеет первостепенное значение для повышения энергоэффективности оптико-электронных систем, используемых в науке, промышленности и медицине. Решаемые в диссертационной работе Кириченко Ю.К. задачи по детальному исследованию физических явлений, влияющих на характеристики лазера при больших токах накачки, по оценке

влияния на них конструктивных особенностей гетероструктуры и по оптимизации структуры лазера, являются актуальными и востребованными в современной физике полупроводников.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается примененным автором комплексным подходом к решению задач исследования, заключающемся в экспериментальном и теоретическом анализе исследуемой проблемы стандартными методами, использовании оригинального метода измерения внутренних оптических потерь и применению единой методологии для описания свойств структур различных конструкций. Где это возможно, полученные автором экспериментальные результаты сравниваются с результатами моделирования. Надежность моделирования обеспечивается применением стандартных расчетных методов и обоснованным выбором параметров моделирования и свойств материалов. Рассчитанные характеристики гетероструктур хорошо согласуются с результатами экспериментов и не противоречат литературным данным.

Структурно диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 182 страницы, включая 110 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 142 источника.

Во введении перечислены сформулированные положения, описаны и обоснованы цели и задачи работы, представлены основные научные и практические результаты.

В первой главе проведен подробный анализ литературы по теме диссертации и рассмотрены основные физические механизмы, ограничивающие эффективность и мощность лазеров.

Вторая глава посвящена разработке, изготовлению и исследованию лазерных гетероструктур различного дизайна.

Третья глава посвящена разработке экспериментальной методики измерения внутренних оптических потерь и сборки стенда для измерений. Для гетероструктур, исследованных во второй главе, по данной методике были получены токовые и температурные зависимости внутренних оптических потерь и внутренней квантовой эффективности, что позволило автору описать взаимосвязь конструкции гетероструктуры с особенностями протекания внутренних физических механизмов.

В четвертой главе проводились исследования лазерных гетероструктур при пониженной температуре и измерение максимальных мощностей.

Пятая глава посвящена математическому моделированию характеристик полупроводниковых лазеров. Теоретический расчет позволил автору подтвердить полученные ранее выводы и результаты и оценить вклад различных физических механизмов в ограничение их мощности и эффективности.

В заключении диссертации подробно перечислены основные результаты работы.

Все основные результаты проведенных автором исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 16 научных работах, из них 6 научных статей, опубликованных в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных научных базах (Scopus, Web of Science), и 10 работ, опубликованных по материалам докладов конференций. Результаты работы представлялись на 8 российских и международных научных конференциях по тематике исследования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты работы могут найти свое применение не только при расчете, конструировании и изготовлении мощных полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs, но также могут быть интересны специалистам, занимающимся исследованием и разработкой других конструкций гетероструктур и другими системами твердых растворов. Среди всех представленных результатов можно выделить следующие наиболее ценные:

1. Разработана методика исследования внутренних оптических потерь в работающем полупроводниковом лазере при различных уровнях токовой накачки и температурах.

2. Качественно описан вид зависимости внутренних оптических потерь и внутренней квантовой эффективности лазера от тока накачки и температуры для различных конструкций гетероструктур.

3. Получены численные значения внутренних оптических потерь для различных конструкций лазерных структур, что позволяет проводить оптимизацию характеристик полупроводниковых лазеров.

4. Продемонстрирована возможность повышения внутренней квантовой эффективности: в лазерах с расширенным волноводом – путем использования $Al_{10}Ga_{90}As$ в составе волновода, в лазерах со сверхузким волноводом – путем введения искусственных энергетических барьеров на границе волновод-эмиттер.

5. Для лазеров с выводом излучения через переднее зеркало на основе гетероструктуры с расширенным волноводом из AlGaAs в импульсном режиме достигнута пиковая оптическая мощность 90 Вт.

6. Продемонстрировано значительное увеличение оптической мощности полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур с расширенным волноводом из

GaAs при уменьшении температуры теплоотода до 120 К за счет снижения внутренних оптических потерь.

7. В результате математического моделирования определен вклад различных внутренних механизмов в рост внутренних оптических потерь и падение внутренней квантовой эффективности полупроводниковых лазеров.

Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации конструкций гетероструктур, что позволяет улучшить энергоэффективность мощных полупроводниковых лазеров, используемые и разрабатываемые в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт физики микроструктур РАН, Университет ИТМО, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Новосибирский государственный технический университет и др.

По материалам диссертационной работы имеются вопросы и 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 обладает другими значениями коэффициентами отражения зеркал и имеют в конструкции глухое и выходное зеркало. 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 фиксировано, 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.

Вышеуказанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации. Результаты работы обладают научной и практической ценностью, обоснованы и достоверны. Все основные результаты работы опубликованы в отечественной и зарубежной печати в профильных журналах, докладывались на ведущих всероссийских и международных конференциях и знакомы специалистам, занимающимся физикой полупроводников. В работе виден решающий вклад автора в полученные результаты.

Общая оценка диссертационной работы. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с исследованием причин ограничения выходной оптической мощности в мощных полупроводниковых лазерах и представляющую в настоящее время как научный, так и практический интерес. Автором применены надежные экспериментальные методики исследования и методы расчета физических процессов в мощных полупроводниковых лазерах, обобщены результаты всех проведенных исследований, четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы диссертационной работы.

Заключение. Диссертационная работа Кириченко Юлии Константиновны на тему: «Внутренние оптические потери в мощных полупроводниковых лазерах на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур», представленная на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников, является законченной научно-квалификационной работой и представляет собой целостное и самостоятельное исследование, выполненное по актуальной тематике на высоком научном уровне. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы и соответствует ее основным положениям.

Работа соответствует специальности 1.3.11 – физика полупроводников и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель, Кириченко Юлия Константиновна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Ю.К. Кириченко была рассмотрена и обсуждалась на семинаре института перспективных систем передачи данных в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО». Настоящий отзыв рассмотрен и принят на заседании института перспективных систем передачи данных, протокол № 2 от 09 сентября 2022 г. На заседании присутствовали 12 человек.

Директор института перспективных систем
передачи данных Университета ИТМО,
д.ф.-м.н., профессор

_____ Бугров В.Е.

Секретарь семинара института
перспективных систем передачи данных
Университета ИТМО, к.ф.-м.н.

_____ Кремлева А.В.

Отзыв составил:

доцент института перспективных систем
передачи данных, старший научный
сотрудник лаборатории однофотонных
детекторов и генераторов Университета
ИТМО, к.ф.-м.н.

_____ Колодезный Е.С.

Сведения о составителе отзыва:

Колодезный Евгений Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент института перспективных систем передачи данных, старший научный сотрудник лаборатории однофотонных детекторов и генераторов Университета ИТМО, e-mail: evgenii_kolodeznyi@itmo.ru, тел.: +7 (953) 354-76-04.