

## Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора С.Д. Якубовича на диссертацию Олещенко Владислава Александровича «Моделирование тепловых полей и экспериментальные исследования с целью повышения мощности инжекционных лазеров», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

Для многих практических применений полупроводниковых лазеров их выходная оптическая мощность является ключевым параметром. Целью диссертационной работы В. А. Олещенко, выполнившейся, судя по публикациям, более 7-ми лет, было исследование тепловых полей в мощных инжекционных лазерах. Актуальность этой задачи не вызывает сомнений, т.к. эти исследования направлены на решение проблемы отвода от активной области лазерного кристалла тепловых потоков высокой плотности. Повышение температуры активной области, особенно в непрерывном режиме работы, является одной из основных физических причин, ограничивающих выходную мощность и срок службы инжекционных лазеров.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав основного текста и заключения. Объём диссертации составляет 132 стр., включая 5 таблиц, 55 рисунков и список использованной литературы.

Во введении сформулирована актуальность выбранной темы диссертации, её научная новизна, научная и практическая ценность исследований, а также приведены обоснования достоверности полученных результатов.

В первой главе приводится анализ современного состояния исследований в области мощных лазерных диодов, затрагивая проблематику получения высокой мощности и долговечности. Приводятся оценки оптических и тепловых нагрузок, которым подвергаются мощные диодные лазеры и анализируются возможные методы решения задачи повышения их выходных параметров и срока службы, кратко характеризуется современный уровень выходных параметров мощных инжекционных лазеров ближнего ИК-диапазона спектра.

Вторая глава посвящена численному моделированию распределения тепловых полей в конструкции мощного инжекционного лазера в 3D модели и расчёту полного к.п.д. в зависимости от величины тепловой нагрузки и параметров применяемых конструктивных элементов. Полученные трёхмерные распределения температуры и изотермические поверхности представляют интерес для понимания деталей отвода тепловых потоков экстремальной плотности от активной области мощного диодного лазера, а также для сравнения и оптимизации различных конструкций теплоотводящих элементов. На основе результатов расчёта трёхмерных тепловых профилей для кристаллов мощных лазерных диодов, смонтированных на широко применяемых на практике теплоотводящих элементах типа С-маунт и F-маунт, получены важные сравнительные результаты по эффективности отвода тепла и распределению температуры по длине лазерного резонатора. Эти результаты имеют методический и практический интерес, поскольку затрагивают вопрос влияния распределения температуры по длине лазерного резонатора на выходные параметры мощных диодных лазеров вследствие температурной зависимости спектра усиления активной полупроводниковой среды. Значительный практический интерес представляют также результаты расчётов для перспективных конструкций мощных лазерных диодов с применением сабмаунтов, имеющих высокую теплопроводность, в частности изготовленных из синтетических алмазов.

Идея применения алмаза, имеющего рекордную теплопроводность, при отводе тепла от кристалла диодного лазера возникла практически одновременно с его изобретением, тем не менее до сих пор этот потенциал не реализован в промышленности. Главными

препятствиями для практического применения алмазов и композитов на основе алмазов в мощных лазерных диодах являются: высокая стоимость выращивания и обработки алмазов, технологические проблемы их обработки и металлизации, существенная разница в коэффициенте температурного расширения алмаза и материалов лазерных гетероструктур, а также недостаточная изученность физических механизмов распространения тепла на границах металл-диэлектрик при переходе от электронной подсистемы к фононной. Полученные в диссертации результаты по применению бюджетных синтетических поликристаллических алмазов, выращенных в ИОФРАН, являются обнадёживающими. В диссертации показана принципиальная возможность повышения выходной мощности излучения и обеспечения достаточно высокой надёжности лазерных диодов, смонтированных с применением синтетических бюджетных алмазных сабмаунтов.

Приведённые в диссертации зависимости средней по длине резонатора температуры активной области, а также температуры активной области на выходном и заднем зеркалах резонаторов от величины тепловой нагрузки также имеют важное практическое значение, в частности при моделировании и оценке надёжности и долговечности зеркал.

Представляют интерес полученные в диссертации результаты оптимизации параметров сабмаунтов и зависимости температуры активной области лазерного диода от основных геометрических параметров сабмаунтов и их теплопроводности, которые позволяют, в частности, оценить целесообразность повышения теплопроводности алмазных сабмаунтов и увеличения их геометрических размеров, а также обосновать отсутствие необходимости применения высококачественных и дорогостоящих монокристаллических алмазов.

Третья глава посвящена экспериментальной реализации результатов численного моделирования и разработке технологий изготовления лабораторных образцов мощных диодных лазеров. Приводятся результаты разработки технологий обработки и подготовки поверхностей базовых теплоотводящих элементов и алмазных сабмаунтов и их металлизации. Приводятся результаты измерения выходных параметров изготовленных экспериментальных образцов мощных лазерных диодов в непрерывном и импульсном режимах работы. Благодаря разработанному в диссертации оригинальному комплексу технологий монтажа лазерных кристаллов для конструкций без применения сабмаунтов с высокой теплопроводностью получены результаты на уровне рекордных по непрерывной выходной мощности для ЛД с длинами волн 808 нм и 970 нм.

В четвёртой главе обсуждаются возможности восстановления номинальных излучательных параметров мощных лазерных диодов. На основе разработанного метода температурно-токовой тренировки и проведения кратковременных ресурсных испытаний диссидентом показана принципиальная возможность улучшения параметров забракованных по данным предварительных измерений мощных лазерных диодов. По данным автора, применение такой методики позволяет восстановить номинальные выходные параметры значительного количества образцов. (Например, для лазеров с длиной волны излучения 808 нм - более 50% от забракованных экспериментальных образцов).

В заключении автором сформулированы выводы и основные результаты работы.

Ценность диссертационной работы В.А. Олещенко заключается в том, что ему удалось самостоятельно решить комплекс расчётных и экспериментальных задач: изготовить экспериментальные образцы нескольких типов мощных лазерных излучателей на различных типах теплоотводящих элементов, провести численное моделирование их тепловых параметров при различных уровнях накачки и экспериментально изучить их основные выходные параметры, включая выходную мощность, К.П.Д. и спектры излучения, тем самым подтвердив на практике достоверность полученных результатов теоретического моделирования.

Полученные в работе результаты по исследованию теплового сопротивления представляет интерес в методическом плане и вносят вклад в понимание границ адекватности применения подхода на языке «теплового сопротивления» для оценки и сравнения тепловых параметров лазерных диодов различных производителей.

Работа выполнена в условиях чистой зоны с использованием современного технологического оборудования и инструментария, а также сертифицированных драйверов и приборов для измерения абсолютной мощности излучения, что дало возможность изготовить экспериментальные образцы, обладающие ресурсным потенциалом, и достоверно измерить их характеристики.

Следует отметить отдельные недостатки работы:

1. В первой главе достижения мирового уровня в области мощных лазерных диодов (ЛД) ближнего ИК-диапазона спектра представлены весьма фрагментарно. Было бы целесообразно привести таблицу, содержащую основные параметры серийно выпускаемых ЛД данного типа. Кроме того, было бы желательно привести более подробные сведения о гетероструктурах, на основе которых были изготовлены исследованные в диссертационной работе лазерные диоды.

2. Было бы полезным выполнить расчёты величины термоупругих напряжений в лазерном кристалле, возникающих, в частности, в результате обнаруженных в работе существенных изменений температуры вдоль оси лазерного резонатора.

3. Вывод о том, что наработка ЛД в течение 100-200 часов практически без изменения выходной мощности может свидетельствовать о сроке службы в тысячи часов, является излишне оптимистичным. Такой подход возможен и широко используется, но только после проведения полномасштабных ресурсных испытаний.

4. Раздел 4.2 «Метод восстановления параметров» назван не вполне корректно. По сути дела происходит повышение эффективности ЛД в результате ступенчатой токовой тренировки. К сожалению, приводятся только предположения относительно физических механизмов этого процесса. Затрудняюсь оценить новизну этой методики в отношении мощных ЛД. Что же касается некоторых типов суперлюминесцентных диодов (СЛД), то подобная методика используется нами уже много лет.

Сделанные замечания на снижают ценности проведенных исследований и не подвергают сомнению достоверность полученных результатов.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном и технологическом уровне, написана понятным и грамотным языком, хотя и не свободна от опечаток.

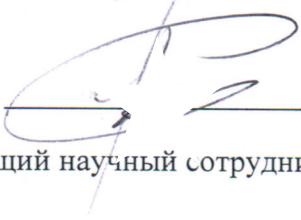
Считаю, что диссертационная работа является достоверным и добрым научным исследованием, в котором получены оригинальные расчётные и экспериментальные физические результаты, имеющие методический и практический интерес.

Работа достаточно широко апробирована. По материалам диссертации опубликовано десять статей в журналах, рекомендованных ВАК, получен патент РФ, результаты докладывались соискателем лично на 5 международных конференциях.

Работа прекрасно оформлена. Автореферат достаточно полно отображает основное содержание диссертации.

Считаю, что содержание диссертационной работы, её оформление, актуальность полученных результатов, новизна и значимость основных положений, выносимых на защиту, соответствуют требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям. По моему мнению, Владислав

Александрович Олещенко безусловно достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

 доктор физико-математических наук, профессор

ведущий научный сотрудник ООО «ОПТОН» Якубович Сергей Дмитриевич

« 09 » ноябрь 2016

ООО «ОПТОН», 119330, Москва, ул. Мосфильмовская, д.17Б

Тел. +7-495-6548621, e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Подпись Якубовича Сергея Дмитриевича заверяю:

Генеральный директор ООО «ОПТОН»



Сафин Дмитрий Сергеевич

« 09 » ноябрь 2016

Список основных работ С.Д. Якубовича по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Лапин П.И., Мамедов Д.С., Якубович С.Д. «Изменение выходных характеристик широкополосных суперлюминесцентных диодов в ходе продолжительной работы», Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 7. С. 595-601.
2. Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Кукушкин И.А., Ладугин М.А., Лапин П.И., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. «Широкополосные суперлюминесцентные диоды и полупроводниковые оптические усилители спектрального диапазона 750 — 800 нм», Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 8. С. 677-680.
3. Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. «Суперлюминесцентные диоды "ближайшего" ИК диапазона с шириной спектра 100 нм», Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 11. С. 961-963.
4. Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, М.А.Ладугин, П.И.Лапин, А.А.Мармалюк, С.Д. Якубович «Широкополосные СЛД диапазона 800-900 нм с колоколообразной формой спектра». Квантовая электроника, 43(8), стр. 751-756, (2013)
5. Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, М.А.Ладугин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, М.В.Шраменко, С.Д. Якубович «Широкополосные ПОУ спектрального диапазона 750-1100 нм». Квантовая электроника, 43(11), стр. 994-998, (2013)
6. Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, С.Д. Якубович «Поперечно-одномодовые СЛД ближнего ИК диапазона спектра с непрерывной выходной мощностью до 100 мВт». Квантовая электроника, 44(10), стр. 903-906, (2014)
7. Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.В.Курнявко, В.Н.Лукьянов, В.Р.Шидловский, С.Д. Якубович «Мощные высоконадёжные СЛД с тремя одномодовыми активными каналами». Квантовая электроника, 46(7), стр. 594-596, (2016)
8. К.А.Верещагин, С.Н.Ильченко, В.Б.Морозов, А.Н.Оленин, В.Г.Тункин, Д.В.Яковлев, С.Д. Якубович «Параметрическое усиление широкополосного излучения непрерывного суперлюминесцентного диода при пикосекундной накачке», Квантовая электроника, 46(9), стр. 811 - 814, (2016)

\_\_\_\_\_  
доктор физико-математических наук, профессор  
ведущий научный сотрудник ООО «ОПТОН» Якубович Сергей Дмитриевич

« 09 » ноябрь 2016

Подпись Якубовича Сергея Дмитриевича заверяю:

Генеральный директор ООО «ОПТОН»



Сафин Дмитрий Сергеевич

« 09 » ноябрь 2016