

## Отзыв

официального оппонента, кандидата физико-математических наук Васильевского Ивана Сергеевича, 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.

Диссертационная работа Олещенко Владислава Александровича посвящена численному моделированию тепловых полей в мощных инжекционных лазерах и экспериментальной реализации результатов моделирования для повышения мощности излучения лазеров ближнего инфракрасного диапазона в непрерывном и импульсном режимах генерации.

### Актуальность темы

Выбранная цель исследования относится к актуальной научной и практической проблеме в области лазерной физики и технологии - повышение непрерывной и импульсной мощности излучения лазерных диодов. С фундаментальной точки зрения важно исследовать влияние теплового режима лазеров на спектральные характеристики, влияние уровня накачки на тепловые режимы и на механизмы деградации лазерного чипа. С практической точки зрения, оптимизация конструкции и технологии создания теплоотвода решает практическую задачу по увеличению к.п.д. и мощности одиночного лазера.

В настоящее время инжекционные гетероструктурные лазерные диоды уступают другим типам лазеров по яркости излучения, что не позволяет использовать одиночные лазеры в системах обработки материалов. В существующих технологических аппаратах лазерной сварки для получения требуемой мощности  $\sim 4$  кВт приходится суммировать излучение нескольких матриц диодных лазеров. Именно поэтому повышению выходной мощности и яркости лазерных диодов посвящены наиболее актуальные исследования, проводимые за рубежом (например, в рамках проекта BRIDLE в Германии).

Диссертационная работа В.А. Олещенко состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложена на 132 стр., содержит 5 таблиц, 55 рисунков и 48 наименований цитированной литературы.

Во **Введении** разобрана актуальность темы диссертации, научная новизна, обоснована научная и практическая ценность исследований, приведены положения, выносимые на защиту, данные об апробации результатов и личном вкладе соискателя.

В **первой главе** приводится анализ состояния проблемы в области мощных лазерных диодов, приводятся сведения о достижениях в данной предметной области в России и за рубежом. На основе анализа литературы приведены данные, касающиеся современного мирового уровня выходных параметров мощных инжекционных лазеров обоснована необходимость проведения поставленных в работе задач, включая основные операции изготовления экспериментальных образцов, изучение их электрических и излучательных параметров, а также проведение ресурсных испытаний в условиях чистых зон. Кратко описаны сведения о вычислительной базе и экспериментальном оборудовании. Обоснована возможность увеличения эффективности отвода тепла от активной области мощных лазерных диодов для повышения их выходной мощности и надёжности.



Во **второй главе** диссертации приведены результаты численного моделирования распределения тепловых полей в мощном лазерном диоде в модельной программе Comsol. Анализ тепловых полей проделан в 3D модели, что позволяет проанализировать особенности карты тепловых потоков при использовании теплоотводящих элементов различных типов, сравнить и оценить эффективность и однородность отвода тепла в разных конструкциях, включая сложные конструкции с применением т.н. промежуточных сабмаунтов. Расчёты проведены для основных применяемых на практике материалов сабмаунтов, согласованных по коэффициенту термического расширения (к.т.р.) с лазерной гетероструктурой, а также для сабмаунтов с высокой теплопроводностью, изготовленных на основе алмазов и алмазных композитов в зависимости от уровня тепловой нагрузки. Полученные в работе изотермические поверхности являются наглядной иллюстрацией распространения тепловых потоков в конструкциях мощных лазерных диодов, они представляют методический интерес не только для оптимизации мощных лазерных диодов, но и для других типов энергонасыщенных полупроводниковых приборов. Важное практическое значение имеют полученные автором результаты по распределениям температуры активной области вдоль оси лазерного резонатора в зависимости от тепловой нагрузки и установленные полуэмпирические критерии ресурсного режима. Кроме того, значительный практический интерес представляют результаты, полученные для конструкций мощных лазерных диодов на алмазном теплоотводе, обладающем рекордной теплопроводностью среди других материалов. Несмотря на значительные технологические трудности, автору удалось изготовить экспериментальные образцы таких лазеров и исследовать их параметры. Несомненным достижением является получение на таких экспериментальных образцах ресурсного режима генерации. Этот результат имеет перспективы промышленного освоения.

Интересными и полезными с практической точки зрения являются результаты оптимизации геометрических параметров сабмаунтов с высокой теплопроводностью, которые автор сравнивает по механизму функционирования с «отрицательной тепловой линзой», а также оригинальные построенные автором квази-4х-мерные зависимости температуры активной области от основных параметров теплоотводящих элементов (теплопроводности, ширины и толщины), построенные для разной величины тепловой нагрузки.

**Третья глава** посвящена изготовлению экспериментальных образцов инжекционных ИК лазеров на теплоотводящей сборке и измерению их параметров. Эта глава является наиболее важной для практического использования, поскольку здесь приводятся весьма интересные результаты разработки базовых технологий получения высококачественных теплоотводящих поверхностей на медных теплоотводящих элементах и создания на них металлизации, в совокупности обеспечивающих получение рекордных излучательных параметров лазерных диодов за счет повышения эффективности отвода тепла.

Также приведены результаты измерений параметров образцов мощных лазерных диодов в непрерывном и импульсном режимах работы. Несомненным достижением являются разработанные в диссертации оригинальные подходы к технологиям монтажа лазерных кристаллов.

В **четвёртой главе** рассматриваются проблемы срока службы мощных лазерных диодов. Для разработанных экспериментальных образцов обоснована возможность отбора



потенциально ресурсных лазеров на основе проведения кратковременных ресурсных испытаний в течение 100 часов наработки. Предложен метод температурно-токовой тренировки, в 50% случаев приводящий к восстановлению номинальных излучательных параметров мощных лазерных диодов, забракованных по результатам предварительных измерений.

**Выводы**, сформулированные автором в заключении, адекватно отражают основные результаты работы.

Текст диссертации достаточно полно отражает проделанную автором работу и полученные расчётные и экспериментальные результаты, материал изложен последовательно, кратко и ясно. **Автореферат** соответствует содержанию диссертационной работы.

Достоверность приведенных результатов не вызывает сомнений. Работа представляет собой законченное комплексное научно-техническое исследование, содержащее новые и актуальные научные результаты, полученные на современном технологическом оборудовании в условиях чистой зоны. При измерении лазерных параметров использовано современное оборудование. Для выполнения 3D численного моделирования использовались современные быстродействующие многопроцессорные компьютеры.

**Отмечу важнейшие, на мой взгляд, результаты диссертационной работы:**

1) результаты оптимизации геометрических параметров сабмаунтов с высокой теплопроводностью, установленные зависимости температуры активной области от теплопроводности, ширины и толщины теплоотводящих элементов, построенные для разной величины тепловой нагрузки;

2) разработанные подходы к технологиям монтажа лазерных кристаллов, позволившие реализовать близкую к теоретическому пределу непрерывную выходную мощность излучения на уровне более 25 Вт на длинах волн 808 нм и 970 нм. в непрерывном режиме генерации и до 140 Вт в импульсном режиме при длительности импульса около 100 нс на длине волны 808 нм;

3) Обнаруженный эффект восстановления номинальных излучательных параметров мощных лазерных диодов, забракованных по результатам предварительных измерений, за счет разработанного метода температурно-токовой тренировки. По данным автора удавалось восстановить номинальные выходную мощность на более чем 50% от забракованных экспериментальных образцов излучающих на длине волны 808 нм.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации:**

Полученные новые ценные расчётные и экспериментальные результаты имеют методический и практический интерес, в том числе для развития производственных технологий лазерного монтажа, созданию мощного лазерного оборудования. Результаты диссертации представляют практическую ценность для обучения специалистов-инженеров в области физики и технологии мощных твердотельных лазеров.

Тем не менее, **по содержанию и оформлению диссертации следует сделать ряд замечаний:**

1. Не приведены подробные сведения о гетероструктурах, используемых в работе для изготовления чипов лазерных диодов, т.к. особенности их слоевой конструкции



также могут влиять на деградацию параметров при эксплуатации в режиме высокой мощности.

2. Технология поверхностного монтажа лазерного кристалла, обеспечившая рекордную мощность излучения в непрерывном режиме, приведена недостаточно подробно. Также не указаны особенности электрической схемы импульсных измерений, в том числе, вопрос согласования источника с лазерным кристаллом по импедансу.
3. Некоторые термины, использованные в тексте диссертации, являются «жаргонными», т.е. специфическими для данной области и понятны только узкому кругу специалистов, и не полностью расшифрованы в списке терминов и сокращений. Также в тексте встречаются пунктуационные ошибки и погрешности в оформлении графиков.

Приведенные замечания, однако, не снижают общей высокой оценки диссертационной работы в целом.

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

### **Заключение**

Считаю, что диссертационная работа Олещенко В.А. соответствуют требованиям к диссертациям на соискание ученых степеней согласно п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.), а сам соискатель - Владислав Александрович Олещенко, заслуживает присвоения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

Официальный оппонент

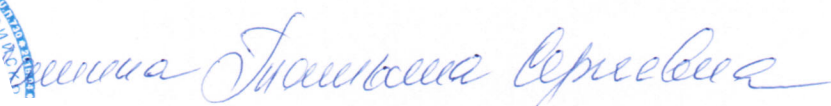
доцент кафедры № 67 Физики конденсированных сред  
Национального ядерного университета "МИФИ",  
кандидат физико-математических наук



Васильевский Иван Сергеевич

« 09 » 11 2016 г.

тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8170  
e-mail: ivasilevskii@mail.ru  
115409, г. Москва, Каширское ш., 31.





**Список основных работ Васильевского Ивана Сергеевича по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.**

1. Васильевский И.С., Пушкарёв С.С., Грехов М.М., Виниченко А.Н., Лаврухин Д.В., Коленцова О.С., «Особенности диагностики метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии в режиме  $\omega$ -сканирования». Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 4. С. 567-573.
2. Садофьев Ю.Г., Мартовицкий В.П., Клековкин А.В., Сарайкин В.В., Васильевский И.С., «Наноструктуры Ge/GeSn с высоким содержанием олова, выращенные на подложках (001) GaAs и Si методом молекулярно-пучковой эпитаксии». Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 12. С. 1612-1618.
3. Галиев Г.Б., Васильевский И.С., Климов Е.А., Клочков А.Н., Лаврухин Д.В., Пушкарёв С.С., Мальцев П.П., «Фотолюминесцентные свойства модулированно-легированных структур  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с напряженными нановставками InAs и GaAs в квантовой яме», Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 9. С. 1243-1253.
4. Д.М., Каргин Н.И., Коленцова О.С., Мартюк П.А., Стриханов М.Н., «Фотолюминесценция массивов квантовых колец GaAs/AlGaAs», Сибирмовский Ю.Д., Васильевский И.С., Виниченко А.Н., Еремин И.С., Жигунов Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 5. С. 652-657.
5. Галиев Г.Б., Васильевский И.С., Климов Е.А., Клочков А.Н., Лаврухин Д.В., Пушкарёв С.С., Мальцев П.П., «Особенности фотолюминесценции hemt-наногетероструктур с составной квантовой ямой InAlAs/InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs», Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 2. С. 241-248.
6. Садофьев Ю.Г., Мартовицкий В.П., Базалевский М.А., Клековкин А.В., Аверьянов Д.В., Васильевский И.С., «Гетероструктуры Ge/GeSn, выращенные на Si (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии», Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 1. С. 128-133.

*10* 

кандидат физико-математических наук  
Васильевский Иван Сергеевич

«*09*» *11* ..2016

тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8170  
e-mail: ivasilevskii@mail.ru  
115409, г. Москва, Каширское ш., 31.



*Иван Сергеевич Васильевский*