

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Олещенко Владислав Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ  
ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 01.04.21 - Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Безотосный Виктор Владимирович** (ФИАН)

Официальные оппоненты:

**Якубович Сергей Дмитриевич**

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Общества с Ограниченной Ответственностью «ОПТОН».

**Васильевский Иван Сергеевич**

кандидат физико-математических наук,  
доцент Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Ведущая организация: **Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха»**

Защита диссертации состоится 19 декабря 2016 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН, расположенном по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Автореферат разослан «\_\_»

2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук

Золотько А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Работа посвящена исследованию тепловых полей в мощных инжекционных лазерах различных конструкций, в том числе с использованием сабмаунтов изготовленных из материалов с высокой теплопроводностью. Тепловая проблема в вопросе получения мощных и ярких источников когерентного излучения является одной из основных. Мощный инжекционный лазер является исключительно энергонасыщенным объектом, характеризуемым экстремально высокими плотностью теплового потока (более  $5-10 \text{ кВт/см}^2$ ) и плотностью оптической мощности на выходном зеркале (на уровне  $20 \text{ МВт/см}^2$ ). Различные научные группы, входящие в состав исследовательских лабораторий университетов и производственных компаний, работающих в сфере оптоэлектроники, самым серьёзным образом занимаются вопросами влияния температуры на выходные параметры и срок службы мощных инжекционных лазеров, используя для анализа и решения проблемы эффективного охлаждения трёхмерное моделирование [1],[2]. В недавней работе [3] экспериментально показано, что тепловая и оптическая нагрузки в сумме приводят к катастрофической оптической деградации выходного зеркала, вызывая его локальный перегрев выше  $1580^\circ\text{C}$  - температуры плавления материала лазерной гетероструктуры на основе AlGaAs/GaAs.

Существует несколько основных методов повышения эффективности охлаждения лазерных кристаллов и компенсации возникающих термоупругих напряжений. Сравнительные исследования наиболее удачных конструкций теплоотводящих элементов приведены в [4]. Для решения проблемы эффективного отвода тепла и согласования к.т.р. используются сабмаунты - термокомпенсаторы из керамических и композитных материалов, согласованные по к.т.р. с лазерным кристаллом и имеющие теплопроводность как правило ниже, чем у меди, а также сабмаунты с высокой теплопроводностью [5].

Микроканальное охлаждение [6] обеспечивает рекордно низкие значения теплового сопротивления лазерных диодов на уровне  $1,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$ , но в силу усложнения конструкции и высокой стоимости исполь-

зуется в основном для охлаждения мощных интегральных приборов, таких как непрерывные лазерные линейки и матрицы.

Одним из наиболее мощных инжекционных лазеров ближнего ИК-диапазона является прибор с ресурсной мощностью 18 Вт, смонтированный на термокомпенсаторе AlN, разработанный компанией nLight, он имеет следующие параметры: длина резонатора 5мм, ширина полоскового контакта 150 мкм, максимальный к.п.д. 65%. [7].

Для решения многих научных и прикладных задач требуется достижение ещё более высоких выходных параметров лазерных диодов, при этом, вследствие высокой конкуренции, необходимо также обеспечить снижение их стоимости, что диктует необходимость более тщательного моделирования, поиска новых материалов, методов отвода тепла и разработки новых конструктивных решений.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

**Целью диссертационной работы** являлось изучение физики тепловых процессов, ограничивающих предельные мощности одиночных лазерных диодов и ресурс работы в непрерывном и импульсном режимах генерации. Поставлены и решены следующие конкретные задачи:

1. Создана трёхмерная модель для расчёта тепловых потоков во всех элементах различных конструкций мощных одиночных диодных лазеров с целью получения и анализа картины тепловых полей в зависимости от параметров конструкции и уровня накачки.

2. Разработаны технологические основы для практической реализации результатов расчётов на основе 3-х мерной тепловой модели и создания экспериментальных образцов мощных лазерных диодов с конкурентоспособными параметрами для внедрения на отечественном производстве.

3. Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы мощных одиночных лазерных диодов на актуальных длинах волн ближнего ИК-диапазона (808нм, 970нм, 1064нм) смонтированные на теплоотводящих элементах различного типа, в том числе включая сабмаунты с высокой теплопроводностью из синтетических алмазов. Исследованы

выходные параметры различных вариантов конструкций, проведена оценка целесообразности их использования и внедрения в производство.

4. Проведены поисковые исследования возможности восстановления номинальных электрических и оптических параметров мощных лазеров не прошедших отбор по данным предварительных измерений.

### **Научная новизна работы**

1. На основе трёхмерного моделирования тепловых полей всей конструкции мощного лазерного диода включающей чип полоскового лазерного диода на основе полупроводниковой гетероструктуры с омическими контактами, слои припоя, металлизированные для монтажа лазерного чипа сабмаунт и основной теплоотводящий элемент, впервые получены расчётные 3-мерные распределения температуры в зависимости от конструктивных параметров лазерного кристалла (ширины кристалла, ширины полоскового контакта, длины резонатора, толщины кристалла) при различной теплопроводности сабмаунта, а также в зависимости от величины тепловой нагрузки (с учётом зависимости полного к.п.д. лазера от уровня накачки).

2. Обоснован диапазон значений теплопроводности и геометрических размеров для сабмаунтов изготовленных из доступного набора материалов, используемых при монтаже мощных одиночных лазерных диодов, в том числе согласованных по к.т.р. с лазерным кристаллом сабмаунтов из керамических и композитных материалов, а также из синтетических поликристаллических алмазов.

3. Изучены распределения температуры активной области по длине резонатора при монтаже лазерного кристалла на базовые теплоотводящие элементы типа С-маунт и F-маунт, включая выходное зеркало и заднее глухое зеркало резонатора лазера при различном уровне тепловой нагрузки. Показано преимущество использования F-маунтов для повышения предельной и ресурсной мощностей излучения. Расчётные результаты подтверждены экспериментально, получено 1,5 кратное увеличение предельной и ресурсной мощности при монтаже лазерного кристалла на F-маунты.

4. На основе проделанных расчётов, а также разработанных конструкций и технологий получены параметры мощных одиночных лазерных диодов близких к предельно возможным, в частности максимальная непрерывная

выходная мощность 25 Вт на длине волны 808 нм от лазера с шириной полоскового контакта 100 мкм при монтаже на медном С-маунте, и 27 Вт на длине волны 970 нм, от лазера с шириной полоскового контакта 95 мкм при монтаже на медном F-маунте, без использования сабмаунтов.

5. Разработаны и изготовлены лазерные диоды с применением сабмаунтов на основе бюджетных поликристаллических синтетических алмазов выращенных методом plasma-CVD в ИОФРАН. Разработана технология металлизации таких алмазных сабмаунтов и технология изготовления экспериментальных образцов лазерных диодов с применением алмазных сабмаунтов. На экспериментальных образцах с использованием алмазных сабмаунтов получен ресурсный непрерывный режим генерации при повышенной на 20 % выходной мощности.

6. При непосредственном монтаже лазерного кристалла на медный теплоотводящий элемент типа F-маунт (без использования термокомпенсаторов (сабмаунтов), согласованных по к.т.р. с материалом лазерной гетероструктуры и сабмаунтов с высокой теплопроводностью), экспериментально получено увеличение ресурсной выходной мощности на 50 % в сравнении с идентичными лазерными кристаллами, собранными на медных С-маунтах, получена рекордная ресурсная мощность 15 Вт от непрерывного лазерного диода с шириной полоскового контакта 95 мкм на длине волны 970 нм.

### **Научно-практическая ценность работы**

1. Проведенное трёхмерное моделирование тепловых параметров позволило определить и обосновать диапазоны ресурсной выходной мощности для чипов лазерных диодов излучающих на разных длинах волн и имеющих фиксированные параметры полного к.п.д., последовательного сопротивления, ширины полоскового контакта и длины резонатора при монтаже на теплоотводящие элементы типа С-маунт и F-маунт.

Развитые в работе подходы и методы применимы к анализу тепловых параметров других типов лазерных кристаллов и других конструкций теплоотводящих элементов и сабмаунтов, а также к анализу тепловых параметров других (не лазерных) электронных и оптоэлектронных приборов, в том числе с высоким уровнем тепловыделения.

2. Полученные новые теоретические и расчётные результаты данной работы по моделированию тепловых параметров, включая моделирование полного к.п.д., могут быть применены при выборе сабмаунтов (термокомпенсаторов) для эффективного охлаждения радиоэлектронных компонентов при использовании сабмаунтов и базовых теплоотводящих элементов с теплопроводностью в диапазоне 100 – 2400 Вт/м•К с учётом их геометрических размеров и типа металлизации.

3. На основе проведённых в работе теоретических расчётов были разработаны технологии и конструкции лазеров, на основе которых были получены рекордно высокие непрерывные предельные мощности лазеров в ближнем ИК-диапазоне, в частности на длинах волн 808 нм и 970 нм соответственно 25 Вт и 27 Вт.

4. Впервые обнаружен и описан эффект восстановления параметров мощных лазерных диодов спектрального диапазона 808 нм, разработана имеющая практический интерес оригинальная методика восстановления выходных параметров.

5. Впервые обнаружены особенности на спектральном контуре излучения лазерных диодов с длиной волны 970 нм в диапазоне ресурсной выходной мощности 5-15 Вт. Разработана имеющая практическую ценность методика определения максимума спектрального распределения при наличии особенностей на спектральном контуре, впервые определены зависимости теплового сопротивления от уровня возбуждения, при токах накачки вблизи максимума полного к.п.д. получены значения теплового сопротивления близкие к рекордным опубликованным результатам для идентичных лазерных чипов при использовании наиболее продвинутых схем охлаждения.

6. На основе проведённых расчётных и экспериментальных исследований разработана новая конструкция мощного лазерного диода, защищённая патентом РФ № 2582302.

## **Защищаемые положения**

1. Использование алмазных сабмаунтов с теплопроводностью не менее 1200 Вт/м•К обеспечивает снижение температуры выходного зеркала резонатора лазерного кристалла более чем на 15%, и более чем пятикратное

снижение перепада температур по длине резонатора.

2. Теплоотводящий элемент из меди типа F-маунт при 20°C обеспечивает непрерывную ресурсную мощность 15 Вт от лазерного диода с шириной полоскового контакта 95 мкм на длине волны 970 нм без использования сабмаунтов и термокомпенсаторов.

3. Тепловое сопротивление лазерного диода зависит от уровня накачки, поэтому при анализе и сравнении тепловых параметров различных конструкций лазеров необходимо указывать ток накачки.

4. Ступенчатая токовая тренировка в сочетании с методом низкотемпературного отжига позволяют восстановить номинальные параметры значительной части (более 50 %) инжекционных лазеров на длине волны 808 нм, забракованных по результатам первого измерения.

### **Апробация результатов работы**

Вошедшие в диссертационную работу положения и результаты опубликованы в 10 научных статьях в журналах, входящих в базу данных Web of Science. Полный перечень статей представлен на стр. 17. Полученные результаты были представлены автором лично на международных и всероссийских научных конференциях, список которых приведен на стр. 18.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 132 страницы, включая 55 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 48 наименований.

### **Личный вклад автора**

Автором работы была создана трёхмерная модель тепловых потоков в мощном диодном лазере при различных уровнях тепловой нагрузки для различных типов конструкций теплоотводящих элементов, в том числе при использовании сабмаунтов. Лично соискателем экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований, получены экспериментальные образцы лазерных диодов с рекордными предельными уровнями выходной мощности и ре-

кордными уровнями ресурсной мощности для лазеров ближнего ИК-диапазона, в том числе с использованием в конструкции синтетических plasma-CVD алмазов. Соискателем была разработана значительная часть оригинальной технологии металлизации алмазных сабмаунтов, технология монтажа лазерных кристаллов на синтетические поликристаллические алмазные сабмаунты, а также методика восстановления номинальных выходных параметров мощных лазерных диодов диапазона 808 нм.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулирована научная новизна, показана практическая значимость работы и представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Главе 1** «Мощные инжекционный лазеры» описаны основные физические причины влияющие на параметры инжекционных лазеров, приведен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных повышению выходной мощности, а также увеличению надёжности и ресурса мощных диодных лазеров и линеек на их основе.

В разделе 1.1 приведены краткие сведения по актуальности темы диссертации.

Раздел 1.2 посвящен основным физическим механизмам, обуславливающим и ограничивающим выходные параметры полупроводниковых лазеров. Приведены некоторые модели, описывающие эти механизмы.

Раздел 1.3 содержит сведения об использованном для моделирования программном пакете, а также использованных при выполнении экспериментальных исследований технологическом оборудовании, измерительных приборах и стендах.

В разделе 1.4 представлены экспериментальные, теоретические и расчётные исследования, непосредственно относящиеся к теме диссертации.

В разделе 1.5 приведены выводы о фактическом состоянии исследований в области инжекционных лазеров в настоящее время.

В Главе 2 «Моделирование тепловых процессов в мощных инжекционных лазерах» решается задача теплопроводности (1) для различных конструкций мощных инжекционных лазеров, моделируются распределения тепловых полей, проводится сравнительный анализ эффективности отвода тепла.

$$\vec{q} = -\kappa \text{grad}(T) \quad (1)$$

Формула 1. Закон теплопроводности Фурье.

Раздел 2.1 посвящен расчёту полного к.п.д. мощных инжекционных лазеров с целью определения величины мощности тепловой нагрузки  $P_{therm}$  (2) отводимой от многомодового лазера с широким полосковым контактом в зависимости от уровня накачки. Описывается выбор параметров и задание граничных условий тепловой задачи, решаемой численными методами в программной среде трёхмерного моделирования ComSol MultiPhysics.

$$P_{therm} = P_{total}(1 - \eta_{total}) \quad (2)$$

$P_{therm}$  – тепловая нагрузка

$P_{total}$  – полная вложенная мощность

$\eta_{total}$  – полный к. п. д.

В разделе 2.2 приведены результаты численных расчётов трёхмерной модели. Обсуждаются и сравниваются результаты для двух типов теплоотводящих элементов (типа С-маунт и F-маунт). Изучаются распределения изотермических поверхностей для С-маунтов и F-маунтов (Рис.1.).

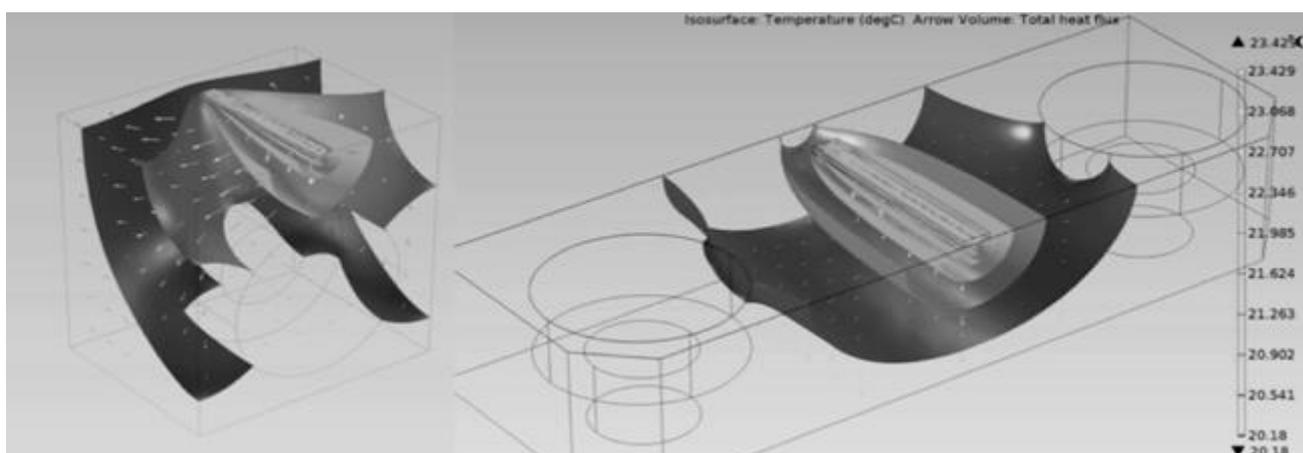


Рис. 1 - Тепловые поля и изотермические поверхности в диодном лазере, смонтированном на С-маунте (слева) и F-маунте (справа).

Полученные значения температур, дают возможность сделать вывод, о том, что при использовании теплоотводящих элементов из меди, при замене типа теплоотводящего элемента с С-маунта на F-маунт, можно увеличить величину тепловой нагрузки с 25 Вт до 35 Вт с сохранением температуры зеркал и средней температуры активной области лазерного кристалла.

В разделе 2.3 обсуждаются результаты численного моделирования с использованием трёхмерной модели тепловых параметров мощных диодных лазеров смонтированных на теплоотводящих элементах типа С-маунт и F-маунт с использованием сабмаунтов из материала с высокой теплопроводностью. Использование сабмаунта с высокой теплопроводностью реализует механизм «отрицательной тепловой линзы», который позволяет реализовать быстрое растекание теплового потока от активной области лазерного кристалла в теплоотводящий элемент.

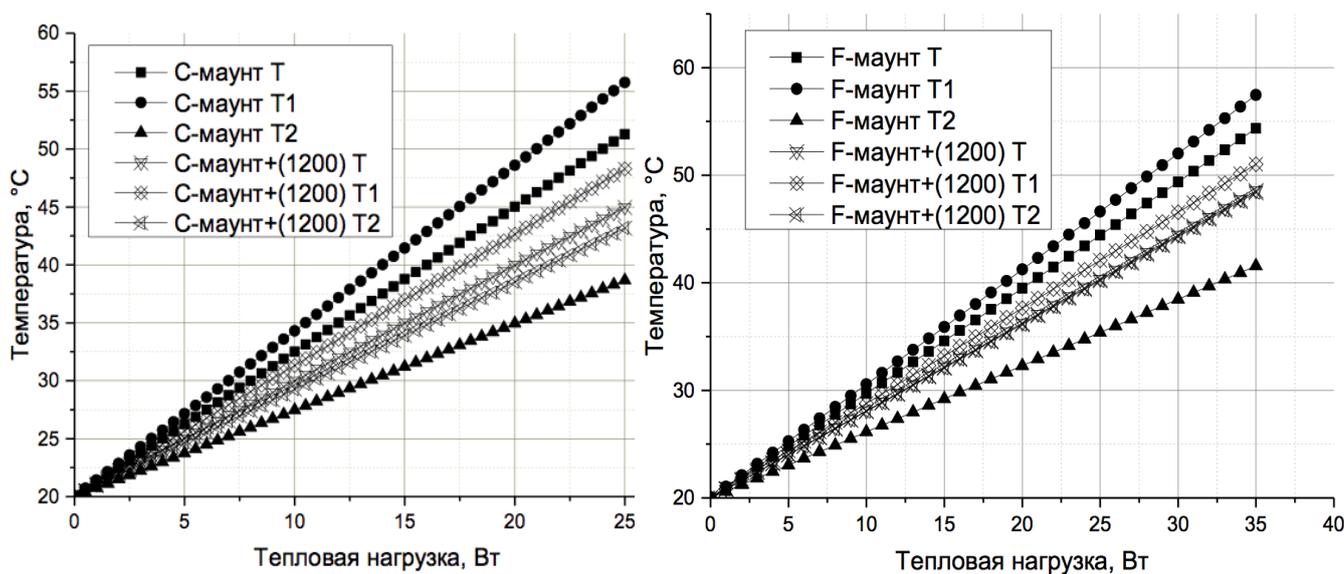


Рис. 2 - Расчетные зависимости температуры от тепловой нагрузки при монтаже кристаллов на С-маунт и F-маунт. Т – средние температуры активной области, Т1 - на переднем выходном и Т2 –на заднем глухом зеркалах соответственно при монтаже без сабмаунта и при использовании сабмаунта с теплопроводностью 1200 Вт/м·К

Как видно на графиках Рис.2, в случае использования сабмаунтов с теплопроводностью 1200 Вт/м·К, средняя температура активной области мощного диодного лазера стремится к температуре не выходного, а заднего зеркала, все три температурные зависимости стремятся к одному значению в отличие от конструкции без сабмаунта. Использование сабмаунтов с теплопроводностью 1200

Вт/м•К, которая может быть достигнута на сабмаунтах из алмаза, возможно снижение температур зеркал резонатора лазерного кристалла более чем на 15%, а также более чем пятикратное снижение перепада температур по длине резонатора. Указанные преимущества снижают, как тепловую нагрузку на зеркала лазерного кристалла, так и снижают величину термоупругих напряжений, связанных с перепадом температур по длине резонатора лазерного кристалла.

Раздел 2.4 посвящён поиску оптимума геометрических параметров сабмаунтов (ширина, толщина), в сочетании с их теплопроводностью. За базовый теплоотводящий элемент принимается F-маунт, длина сабмаунта принималась равной 4 мм и равной длине резонатора лазерного кристалла.

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование алмазных и алмаз-композитных сабмаунтов целесообразно в диапазоне теплопроводностей 1000-1200 Вт/м•К, при геометрических размерах сабмаунта около 4мм x 4мм x 0,3 мм. Таким образом, для решения задач охлаждения мощных лазерных диодов, нецелесообразно повышать теплопроводность сабмаунтов значительно выше указанного диапазона, т.е. нет необходимости использовать дорогостоящие высококачественные монокристаллические и тем более изотопически чистые алмазы.

**Глава 3 «Экспериментальные исследования»** посвящена экспериментальным аспектам реализации рассчитанных тепловых параметров различных конструкций мощных диодных лазеров, созданию экспериментальных образцов, в том числе смонтированных на сабмаунте и исследованию их выходных параметров.

Раздел 3.1. содержит описание разработанных технологий с использованием которых были получены экспериментальные образцы лазерных диодов: предварительная и финишная обработка заготовок, подготовка рабочих поверхностей медного теплоотводящего элемента, её металлизация, термоциклы монтажа лазерных кристаллов и изоляторов, монтаж подводящих ток электродов, приварка верхних золотых проводников.

Раздел 3.2. посвящён исследованию параметров лазерных диодов в импульсном - периодическом режиме работы. ВТAX изготовленных непрерывных лазерных диодов в импульсном режиме.

Раздел 3.3. описывает результаты сравнительных исследований параметров экспериментальных образцов двух типов лазеров в непрерывном режиме работы, при монтаже на медный теплоотвод типа С-маунт, а также на С-маунт с использованием образцов алмазных сабмаунтов, выращенных методом plasma-CVD, с теплопроводностью около 800 Вт/м·К, и габаритами 2x4x0,3мм.

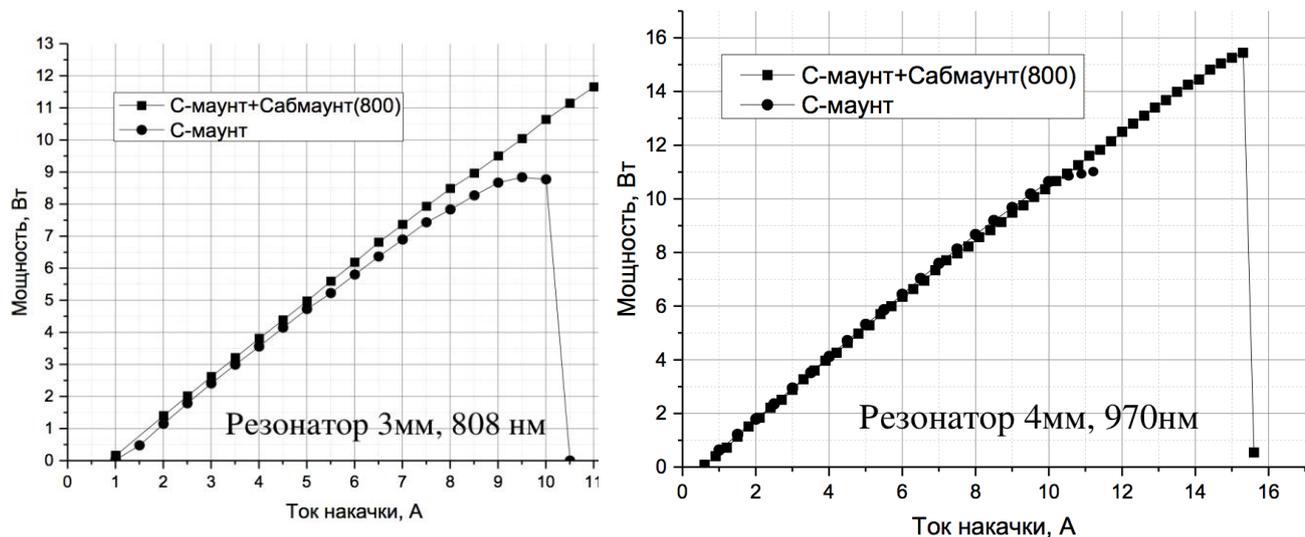


Рис.3 – Экспериментальные ВтАХ лазерных диодов двух типов, смонтированных на С-маунте без сабмаунта и с использованием поликристаллического алмазного сабмаунта с теплопроводностью 800 Вт/м·К.

Для диодов на 808 нм с резонатором 3мм и полоском 100 мкм, линейный участок ВтАХ без использования алмазного сабмаунта заканчивался при мощности 8 Вт. Применение сабмаунта позволило продлить линейный участок вплоть до 12 Вт, при этом данный диод проработал в таком режиме в течении 24 часов без изменения мощности. Образец с лазерным кристаллом на 970 нм, резонатором 4мм и полоском 95 мкм, смонтированный на медный С-маунт, продемонстрировал загиб ВтАХ при мощности 11 Вт, при монтаже данного кристалла на конструкцию дополненную сабмаунтом, линейность ВтАХ наблюдалась до выходной мощности 15 Вт, сразу после загиба ВтАХ лазер вышел из строя вследствие катастрофического разрушения выходного зеркала. Необходимо отметить, что введение дополнительного элемента – алмазного сабмаунта в конструкцию мощного лазерного диода, создаёт множество технологических сложностей, начиная с процесса металлизации химически инертного и не проводящего ток алмаза, и заканчивая необходимостью проведения процессов много-ступенчатого монтажа лазерного кристалла, сабмаунта, изолятора и базового теплоотводящего элемента.

В разделе 3.4. обсуждаются экспериментальные и расчётные данные предельных характеристик мощных диодных лазеров двух типов, оценивается их мощностной и ресурсный потенциал. Предельная непрерывная мощность смонтированного на С-маунт, без термокомпенсатора, диода на 808 нм составила 25 Вт, для диода на 970 нм - 20 Вт. Изученные зависимости максимума огибающей спектров излучения лазера позволили экспериментально оценить температуру активной области при высоких уровнях токов накачки и сравнить полученные данные с расчётными результатами.

Раздел 3.5. затрагивает тему методики экспериментального определения теплового сопротивления лазерных диодов при сложном спектральном контуре.

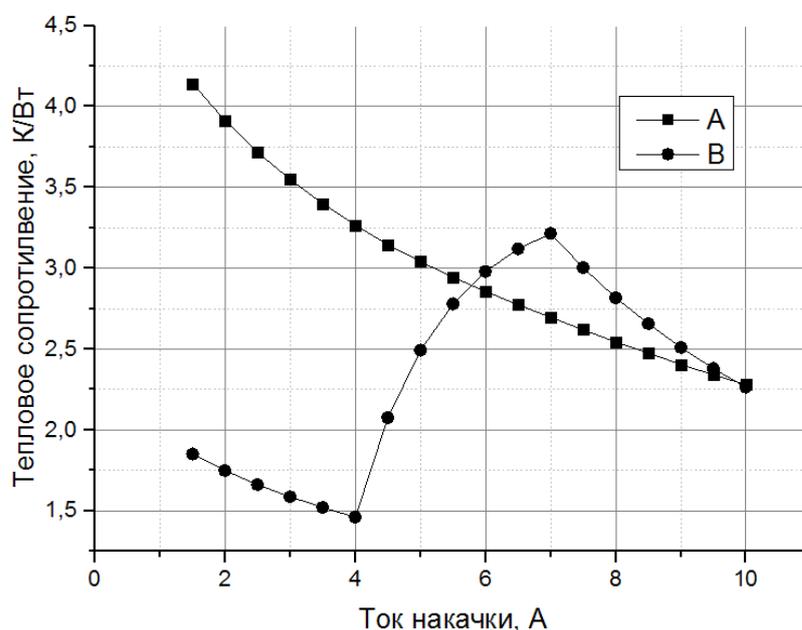


Рис.4 – Тепловое сопротивление от тока накачки А) при линейной аппроксимации спектра, В) при аппроксимации спектра тремя линиями.

Тепловое сопротивление лазерного диода – отношение величины прироста температуры активной области к приросту вложенной тепловой мощности. Тепловая мощность, выделяемая лазером напрямую зависит от полного к.п.д., а к.п.д. зависит от уровня возбуждения лазера. Поэтому тепловое сопротивление сильно зависит от тока накачки (Рис.4). При оценке теплового сопротивления лазера обязательно необходимо указывать ток накачки при котором оно было измерено. Для изготовленных нами лазеров при токах накачки вблизи максимума к.п.д. получены значения теплового сопротивления близкие к рекордным, около 1,5 К/Вт.

Раздел 3.6. подводит итоги проверки теоретических расчётов экспериментальными исследованиями, сравниваются параметры лазеров собранных на двух типах теплоотводящих элементов, С-маунт и F-маунт. ВтАХ изготовленных на его основе двух мощных диодов, смонтированных на С-маунте и F-маунте, приведены на Рис.5. Экспериментально удалось реализовать преимущества F-маунта над С-маунтом без использования сабмаунтов. Предельные мощности диодов составили 21 Вт и 27 Вт соответственно.

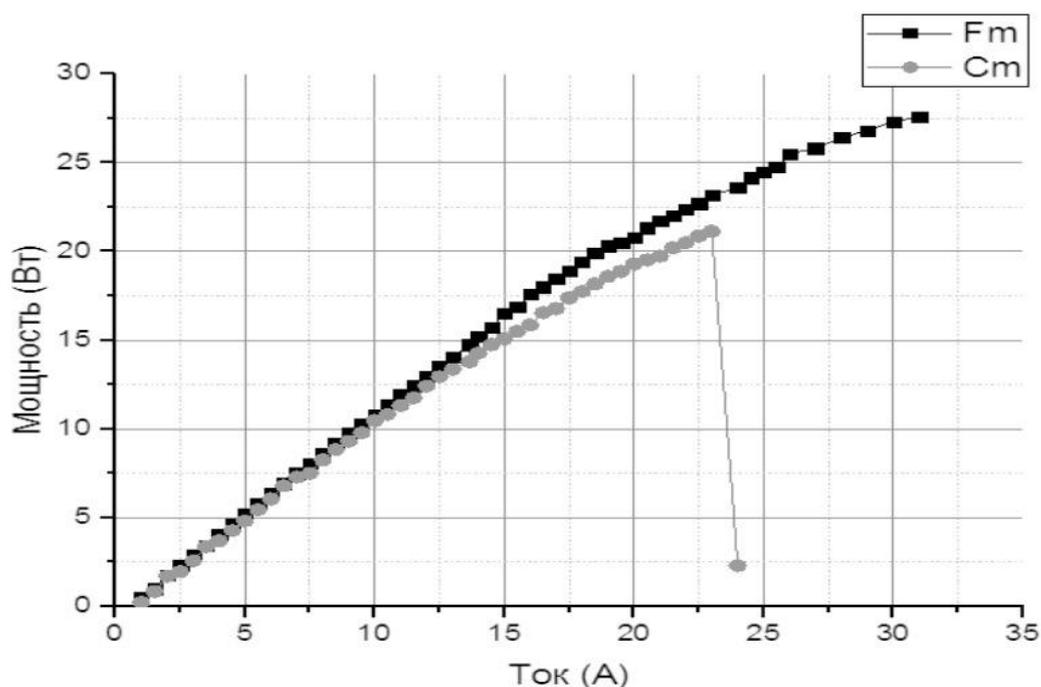


Рис. 5 - ВтАХ ЛД с длиной резонатора 4мм, ширина полоскового контакта 95 мкм, длина волны 970 нм, монтаж на медных С-маунт и F-маунт.

Использование полученных расчётных и экспериментальных данных позволило реализовать рекордные параметры, кристалл лазерного диода на длине волны 970 нм с шириной полоска 95 мкм, смонтированный непосредственно на медный теплоотвод типа F-маунт без использования сабмаунтов, проработал 120 часов без изменения мощности в непрерывном режиме при температуре базового теплоотводящего элемента 20 °С на выходной мощности 15 Вт.

**Глава 4** «Прогнозирования срока службы и поиск методов восстановления параметров» .

Раздел 4.1 «Ресурсные испытания». В разделе приведены сведения о методах проведения ресурсных испытаний и использованных для испытаний ресурсных стендах.

Раздел 4.2. «Методика восстановления параметров» посвящён разработке комбинированной методики, которая заключается в комбинации ступенчатой токовой тренировки и метода низкотемпературного отжига образцов мощных лазерных диодов, забракованных при первом измерении, позволяющей восстанавливать номинальные параметры значительного количества лазеров. На Рис.6 демонстрируется эффект применения ступенчатой температурно-токовой тренировки.

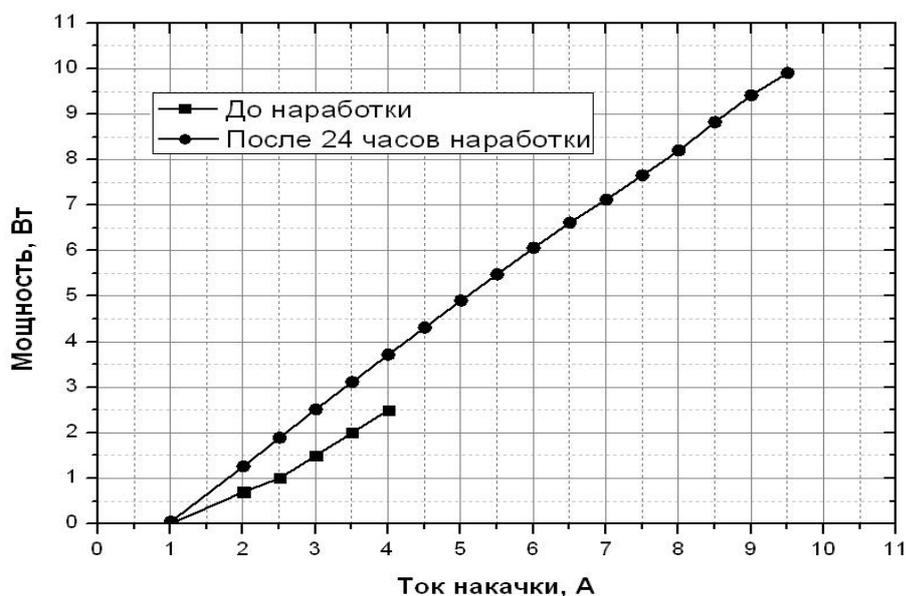


Рис.6. ВАХ мощного лазерного диода до ступенчатой температурно-токовой тренировки и после 24 часов тренировки.

В результате тренировки получено полное восстановление номинальных параметров, т.е. мощности 10 Вт при токе накачки 9,5 А. в ЛД на длине волны 808 нм. На отдельных партиях лазерных чипов удалось восстановить номинальные параметры более чем 50 % образцов

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В **Заключении** диссертационной работы приведены основные результаты моделирования и экспериментальных исследований:

1. На основе трёхмерного моделирования тепловых полей в конструкции мощного лазерного диода включающей чип полоскового лазерного кристалла на основе полупроводниковой гетероструктуры, сабмаунт и основной теплоотводящий элемент, впервые получены расчётные 3-х мерные распределения температуры в зависимости от конструктивных параметров лазерного кристалла (ширины, ширины полоскового контакта, длины резонатора,

толщины) и параметров сабмаунта (геометрических размеров и теплопроводности) в диапазоне теплопроводности сабмаунтов 100-2400 Вт/м•К, а также в зависимости от величины тепловой нагрузки (с учётом зависимости полного к.п.д. лазера от уровня накачки).

2. Обоснован диапазон значений теплопроводности (1000 – 1200 Вт/м•К) и геометрических размеров около (4x2x0,3 мм) для сабмаунтов изготовленных из синтетических алмазов и композитов на основе алмаза используемых для монтажа мощных одиночных лазерных диодов.

3. Изучены распределения средней по длине резонатора температуры активной области, а также температуры выходного зеркала и заднего глухого зеркала резонатора лазера при различном уровне тепловой нагрузки при монтаже лазерного кристалла, как непосредственно на базовые теплоотводящие элементы типа С-маунт и F-маунт из меди, так и при использовании сабмаунтов с высокой теплопроводностью. Показано преимущество использования F-маунтов для повышения предельной и ресурсной мощностей излучения. Расчётные результаты подтверждены экспериментально, получено 1,5 - кратное увеличение предельной и ресурсной мощности при монтаже лазерного кристалла на F- маунты.

4. На основе проделанных расчётов, а также разработанных конструкций и технологий получены предельные параметры мощных одиночных лазерных диодов близких к теоретически возможным по результатам численного моделирования, в частности предельная непрерывная выходная мощность 25 Вт на длине волны 808 нм от лазера с шириной полоскового контакта 100 мкм при монтаже на медном С-маунте, и 27 Вт на длине волны 970 нм, от лазера с шириной полоскового контакта 95 мкм при монтаже на медном F-маунте.

5. Разработаны и изготовлены лазерные диоды с применением сабмаунтов на основе бюджетных поликристаллических синтетических алмазов выращенных методом plasma-CVD. Разработана технология металлизации таких алмазных сабмаунтов и технология изготовления экспериментальных образцов лазерных диодов. На экспериментальных образцах с использованием таких алмазных сабмаунтов получен ресурсный непрерывный режим генерации при повышенной на 20 % выходной мощности.

6. При непосредственном монтаже лазерного кристалла на медный теплоотводящий элемент типа F-маунт без использования термокомпенсаторов (сабмаунтов), согласованных по к.т.р. с материалом лазерной гетеро-

структуры, экспериментально получено увеличение ресурсной выходной мощности на 50 % в сравнении с идентичными лазерными кристаллами, собранными на медных С-маунтах, получена рекордная ресурсная мощность 15 Вт от непрерывного лазерного диода с шириной полоскового контакта 95 мкм на длине волны 970 нм.

7. Обнаружен и описан эффект восстановления параметров мощных лазерных диодов спектрального диапазона 808 нм на основе разработанной, имеющей практический интерес оригинальной комбинированной методики температурно-токовой тренировки и низкотемпературного отжига.

8. Измерены зависимости теплового сопротивления от тока накачки, вблизи максимума к.п.д. лазерных диодов получены значения теплового сопротивления близкие к рекордным опубликованным результатам 1,5 К/Вт полученным для идентичных лазерных чипов при использовании наиболее продвинутых схем охлаждения.

9. На основе проведённых расчётных и экспериментальных исследований разработана новая конструкции мощного лазерного диода, защищённая патентом РФ № 2582302.

10. Результаты диссертационной работы внедряются на предприятии «НПП «ИНЖЕКТ» в рамках Соглашения № 14.575.21.0047 с Минобрнауки РФ, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях журналов, входящих в базу данных Web of Science:*

1. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Кривонос М.С., Олещенко В.А., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Мощные лазерные диоды спектрального диапазона 808 нм и 980 нм», Краткие сообщения по физике. 2010. № 5. с. 25-27.

2. Безотосный В.В., Олещенко В.А., Чешев Е.А. «Исследование эффекта восстановления излучательных параметров мощных лазерных диодов на основе напряженных гетероструктур GaAsP/AlGaAs/GaAs на длине волны 808 нм», Физика и техника полупроводников. 2014. т. 48. № 1. с. 109-113.

3. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А., «Предельные параметры мощных однополоско-

вых лазерных диодов диапазона 800-808 нм в импульсном режиме», Физика и техника полупроводников. 2014. т. 48. № 1. с. 114-119.

4. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Крохин О.Н., Микаелян Г.Т., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Одиночные лазерные диоды спектрального диапазона 808 нм с максимальной мощностью 25 Вт», Квантовая электроника. 2009. т. 39. № 3. с. 241-243.

5. Ашкинази Е.Е., Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Коваленко В.И., Конов В.И., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Попович А.Ф., Ральченко В.Г., Чешев Е.А. «Повышение выходной мощности одиночных лазерных диодов спектральной области 808 нм при использовании алмазных теплоотводящих элементов, полученных методом осаждения из газовой фазы в СВЧ-плазме», Квантовая электроника. 2012. т. 42. № 11. с. 959-960.

6. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Моделирование теплового режима мощных лазерных диодов, смонтированных с использованием сабмаунтов различного типа», Квантовая электроника. 2014. т. 44. № 10. с. 899-902.

7. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Излучательные параметры и тепловой режим мощных одиночных лазерных диодов спектрального диапазона 980 нм», Квантовая электроника. 2014. т. 44. № 2. с. 145-148.

8. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Тепловой режим мощных лазерных диодов», Краткие сообщения по физике. 2015. т. 42. № 3. с. 36-43.

9. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Лазерные диоды на длине волны 980 нм с непрерывной мощностью 15 Вт на теплоотводящих элементах типа F-маунтов», Квантовая электроника. 2015. т. 45. № 12. с. 1088-1090.

10. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Особенности спектров генерации и тепловое сопротивление непрерывных лазерных диодов с длиной волны излучения 976 нм и мощностью 15 Вт», Квантовая электроника. 2016, т.46. №8. с. 679-681.

### *Тезисы докладов на конференциях и симпозиумах:*

1. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Олещенко В.А., Ашкинази Е.Е., Певцов В.Ф., Коваленко В.И., Попов Ю.М., Крохин О.Н., Чешев Е.А. Пути повышения выходной мощности одиночных непрерывных лазерных диодов на 808нм и 980нм и контроль спектров излучения. 8-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Минск, Беларусь, 17-20 мая 2011 года.

2. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. Мощные инжекционные лазеры спектральных диапазонов 808нм, 980нм и 1064нм. 3-й Всероссийский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». Санкт-Петербург, 13-16 ноября 2012 года.

3. Безотосный В.В., Олещенко В.А., Ашкинази Е.Е., Певцов В.Ф., Коваленко В.И., Ральченко В.Г., Попович А.Ф., Конов В.И., Попов Ю.М., Крохин О.Н., Чешев Е.А. Мощные непрерывные лазерные диоды в спектральном диапазоне вблизи 975нм с ресурсной мощностью 10Вт и полным к.п.д. до 65% на теплоотводящих элементах типа С-маунт. 9-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Минск, Беларусь, 28-31 мая 2013 года.

4. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. Влияние типа теплоотводящего элемента и параметров сабмаунта на тепловой режим мощных лазерных диодов. 4-й Всероссийский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». Санкт-Петербург, 10-13 ноября 2014 года.

5. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. Лазерные диоды на длине волны 980нм с непрерывной мощностью 15Вт на теплоотводящих элементах типа F-маунт. 5-й Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, Москва-Звенигород 23-26 ноября 2015 года.

**Получен патент РФ на изобретение № 2582302 «Полупроводниковый лазер на основе эпитаксиальной гетероструктуры» зарегистрированный 31 марта 2016 г.**

## ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Winterfeldt, P. Crump, H. Wenzel, G. Erbert, G. Trankle «Experimental investigation of factors limiting slow axis beam quality in 9xx nm high power broad area diode lasers». *Journal of applied physics* 116, 063103 (2014). p.1-14.
- [2] Kaiser Martin, Yan Zheng, Avram Bar-Cohen, «Numerical Modeling and Simulation of Laser Diode Diamond Microcoolers» *14th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems May 27-30, 2014*. p.59-63.
- [3] Martin Hempel, Jens W. Tomma "Defect Temperature Kinetics during Catastrophic Optical Damage in High Power Diode Lasers". *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIII, edited by Alexey A. Belyanin, Peter M. Snowton, Proc. of SPIE Vol. 9002, 90021H, 2014 SPIE*. p.1-12.
- [4] Xiaoning Li, Yanxin Zhang, Jingwei Wang, et al «Influence of Package Structure on the Performance of the Single Emitter Diode Laser» *Senior Member, IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology Vol.2, No.10, October 2012*. p.1592-1599.
- [5] Jingwei Wang, Xiaoning Li Dong Hou<sup>1</sup>, Feifei Feng, Yalong Liu, Xingsheng Liu «Advances in Bonding Technology for High Power Diode Laser Bars». *Components and Packaging for Laser Systems, edited by Alexei L. Glebov, Paul O. Leisher, Proc. of SPIE Vol. 9346, 93460. 2015*. p.1-21.
- [6] Anna Kozłowska, Piotr Łapka, Mirosław Seredynski, Marian Teodorczyk, Elzbieta Dabrowska-Tumanska "Experimental study and numerical modeling of micro-channel cooler with micro-pipes for high-power diode laser arrays" *Applied Thermal Engineering* 91 (2015), p. 279-287.
- [7] L. Bao, J. Bai, K. Price, M. DeVito, et. al «Reliability of High Power/Brightness Diode Lasers Emitting from 790 nm to 980 nm». *nLight Corporation. Vancouver, WA 98665, USA*. p.1-11.