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 ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Безотосный Виктор Владимирович

Москва 2016

Оглавление ……... 1

Введение …… 3

Предмет диссертации и её актуальность.…… 3

Цель работы ……..…...…..……..……... 5

Научная новизна ……..…..……..……..... 7

Научно-практическая ценность работы ……...……..…….……. 8

Положения, выносимые на защиту …….…..... 9

Апробация результатов работы ……..…….....…. 10

Личный вклад соискателя……..…..…… 11

Структура и объём диссертации …….…..…… 11

Глава 1. Мощные инжекционные лазеры

1.1 Введение к обзору литературы…..……. 12

1.2 Мощные лазерные диоды…….……..…..……..... 14

1.3 Вычислительная и экспериментальная база……. ……..... 16

1.4 Охлаждение мощных инжекционных лазеров….. ……..... 19

1.5 Современные мощные инжекционные лазеры ……...…….… 22

1.6 Выводы ……..... 23

Глава 2. Моделирование тепловых процессов в мощных инжекционных лазерах

2.1 Расчет полного к.п.д и постановка тепловой задачи..……..… 24

2.2 Результаты численного моделирования тепловой задачи…... 34

2.3 Результаты расчетов при использовании сабмаунтов…….. 51

2.4 Оптимум параметров сабмаунта…..…….……61

2.5 Выводы……...……..….67

Глава 3. Экспериментальные исследования

3.1 Создание экспериментальных образцов……..... 69

3.2 Исследование образцов в импульсно-периодическом режиме.....78

3.3 Экспериментальные образцы с plasma-CVD алмазами…..……..91

3.4 Предельные выходные параметры…….…..…97

3.5 Исследование теплового сопротивления……..……101

3.6 Сравнение экспериментальных лазеров собранных на C и F-маунтах..107

Глава 4. Прогнозирование срока службы и поиск методов восстановления параметров

4.1 Ресурсные испытания ……. 114

4.2 Метод восстановления параметров……..…..……..117

Заключение ……... 122

Благодарности …….. 125

Список публикаций автора по теме диссертации……...…..……. 125

Список используемой литературы ……..……. 128

Список использованных терминов и сокращений

МОЛД – мощный одиночный лазерный диод.

КОД – катастрофическая оптическая деградация зеркала резонатора лазерного диода.

ТОЭ – теплоотводящий элемент.

MOCVD – МОС-гидридная эпитаксия.

MBE – молекулярно-пучковая эпитаксия.

Чип – кристалл лазерного диода на основе эпитаксиальной гетероструктуры.

Ресурсная мощность – предельная мощность излучения лазера, прогнозируемая в течение не менее 3000 часов.

Предельная мощность – максимальная, многократно повторяемая мощность лазера в кратковременном непрерывном режиме.

Введение

Предмет диссертации и её актуальность

В настоящее время направление мощных инжекционных (диодных) лазеров, линеек лазерных диодов, матриц и мощных модулей на их основе продолжает бурно развиваться. Указанные приборы имеют широкий спектр практических применений, в том числе в медицине [1-4], в технологиях обработки материалов [5-9], в системах для анализа экологических загрязнений [10-12], в высокоскоростных линиях оптической связи [13-15], в системах накачки твердотельных и волоконных лазеров [16-19], системах оптической локации, навигации, слежения и наведения, в робототехнике, оборонной технике и многих других областях науки и индустрии.

Диодные лазеры являются основными изделиями современной квантовой электроники и лазерной техники, в области оптоэлектроники и фотоники диодные лазеры функционально являются источником когерентного оптического излучения, их можно сравнить с двигателем автомобиля, без которого работа всех систем включая движение автомобиля невозможны.

Диодные лазеры за более чем 50 лет после своего изобретения прошли большой эволюционный путь развития, тем не менее их резервы, которые предсказывает теория пока в полной мере не реализованы. В частности это касается получения предельно высокой мощности в ресурсном непрерывном и импульсном режимах генерации, повышения яркости, повышения полного КПД, повышения надёжности в режимах высокой мощности излучения, увеличения срока службы и т.д.

Полупроводниковые диодные гетеролазеры в процессе своего изготовления и создания готового компактного рабочего модуля требуют проведения целого ряда прецизионных нанотехнологических операций, правильное выполнение которых обеспечивает достижение высоких выходных параметров и гарантирует надёжную долговременную работу приборов и систем на их основе.

Предметом диссертации является использование научного подхода к

решению комплекса проблем связанных с технологическими процессами монтажа полупроводниковых кристаллов на теплоотводящие элементы корпуса, что является одним из важнейших этапов в полном технологическом цикле изготовления, испытания и сертификации готовых приборов, поскольку эти операции должны обеспечить надежность и длительный срок службы лазерных кристаллов при экстремальных условиях работы. Высокое качество и долговременная стабильность соединения лазерного кристалла с теплоотводящим элементом, обеспечивающие однородность электрического и теплового контактов, являются ключевыми факторами, которые способствуют достижению надежности и большого срока службы мощных излучателей на основе лазерных диодов.

Особо важный момент, касающийся мощных диодных лазеров – поиск конструктивных решений, обоснование и формулировка технических требований к материалам, технологиям их обработки и параметрам техпроцессов, поиск и разработка методов контроля качества материалов, в том числе чипов кристаллов и комплектующих элементов. Особенно важным является обеспечение эффективного отвода тепла от активной области диодного лазера, что во многом определяет ресурсную и предельную мощность генерации, а также является необходимым условием обеспечения надёжности работы приборов.

Ключевой является решение проблемы отвода от активного слоя полупроводникового лазера экстремальных по плотности непрерывных тепловых потоков. Эта проблема должна решаться в совокупности с проблемой термоупругих напряжений, неизбежно возникающей в лазерной гетероструктуре при монтаже кристалла на теплоотводящие элементы из материалов с высокой теплопроводностью, имеющих к.т.р. существенно отличные от полупроводниковых лазерных гетероструктур. Указанные проблемы определяют предельные и ресурсные мощности, а также срок службы. Решению указанной проблемы посвящено значительное количество

работ, проводимых в России и в особенности за рубежом, в частности работы [20-23].

Полупроводниковые лазеры в силу своей компактности, в указанных выше областях применений по совокупности технических параметров не имеют конкурентов. Действительно, размеры кристалла (чипа) современного мощного лазерного диода составляют 0.5x0.15x4мм, размеры наиболее компактного теплоотводящего элемента типа С-маунт составляют 7x6.4x4.5мм, а размеры современного оптического модуля, содержащего ЛД, термоэлектрический элемент Пельтье, термистор и фотодиод контроля мощности составляют всего 30x12.7x8мм. При этом полный к.п.д. современного мощного непрерывного лазерного диода в максимуме может превышать 70 %.

Цель работы

Основной целью работы являлось повышение ресурсной и предельной мощностей одиночных лазерных диодов в непрерывном и импульсном режимах генерации, повышение надёжности и срока службы, изучение наиболее важных для практических применений параметров мощных ЛД, включая спектральные параметры в непрерывном, а также в импульсном режимах работы.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Создание трёхмерной компьютерной модели расчёта тепловых потоков во всех элементах конструкции мощных одиночных диодных лазеров для получения и анализа картины тепловых полей при высоком уровне возбуждения.

2. Проведение исследований тепловых режимов мощного одиночного лазерного диода на основе разработанной трёхмерной тепловой модели с целью поиска оптимальных конструктивных решений для наиболее полной практической реализации потенциала лазерного кристалла, в том числе

повышения полного к.п.д. и повышения выходной мощности излучения в ресурсном режиме генерации за счёт снижения последовательного омического сопротивления и повышения эффективности отвода тепла от активной области лазерного полупроводникового кристалла в теплоотводящий элемент.

3. Разработка технологических основ для практической реализации результатов расчётов на основе 3-х мерной тепловой модели и создания экспериментальных образцов.

4. Разработка и изготовление экспериментальных образцов мощных одиночных лазерных диодов на актуальных длинах волн ближнего ИК-диапазона (808нм, 976нм, 1064нм) смонтированных на теплоотводящих элементах различного типа, в том числе включая сабмаунты с высокой теплопроводностью из синтетических алмазов.

5. Экспериментальные исследования ватт-амперных характеристик, вольт-амперных характеристик, предельной и ресурсной мощности излучения, электрических параметров, моделирование и экспериментальные исследования эффективности и полного к.п.д. экспериментальных образцов мощных одиночных лазерных диодов.
6. Экспериментальное изучение спектров излучения экспериментальных образцов мощных лазерных диодов при высоком уровне возбуждения, разработка методики определения теплового сопротивления при высоком уровне накачки, сравнение полученных результатов с мировым уровнем.

7. Повышение непрерывной предельной и ресурсной мощности излучения, повышение предельной и ресурсной мощности в импульсном режиме генерации.

8. Разработка адаптированных технологий и конструкций непрерывных лазерных диодов с высокими выходными параметрами для внедрения в производство.

Научная новизна

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 получены расчётные 3-х мерные распределения температуры в зависимости от конструктивных параметров лазерного кристалла (ширины, ширины полоскового контакта, длины резонатора, толщины) при различной теплопроводности материала теплоотводящего элемента и сабмаунта 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 керамических и композитных теплоотводящих элементов.
3. Изучены распределения температуры активной области по длине резонатора при монтаже лазерного кристалла на базовые теплоотводящие элементы типа C-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 мощности 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, в частности предельная непрерывная выходная мощность 27 Вт на длине волны 808нм от лазера с шириной полоскового контакта 100мкм при монтаже на медном C-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 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 базового теплоотводящего элемента экспериментально получено увеличение ресурсной выходной мощности на 50 % в сравнении с образцами собранными на медных С-маунтах, получена рекордная ресурсная мощность 15 Вт от непрерывного лазерного диода с шириной полоскового контакта 95 микрон на длине волны 976нм.

Научно-практическая ценность работы

1. Проведенное трёхмерное моделирование тепловых параметров позволило определить и обосновать диапазоны ресурсной выходной мощности для чипов лазерных диодов различных спектральных диапазонов 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 лазерного кристалла и других конструкций теплоотводящих элементов, а также к анализу тепловых параметров других (не лазерных) электронных и оптоэлектронных приборов 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 радио-электронных компонентов при использовании сабмаунтов и базовых теплоотводящих элементов с теплопроводностью в диапазоне от 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 предельные мощности лазеров в ближнем ИК-диапазоне, в частности на длинах волн 808нм и 970нм соответственно 25 Вт и 27 Вт.
4. Впервые обнаружен и описан эффект восстановления параметров мощных лазерных диодов спектрального диапазона 808нм, разработана имеющая практический интерес оригинальная методика восстановления выходных параметров.
5. Впервые обнаружены особенности на спектральном контуре излучения лазерных диодов с длиной волны 980нм 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, но при использовании наиболее продвинутых схем охлаждения.
6. На основе проведённых расчётных и экспериментальных исследований разработана новая конструкции мощного лазерного диода, защищённая патентом РФ № 2582302.

Положения, выносимые на защиту

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˚С обеспечивает непрерывную ресурсную мощность 15 Вт от лазерного диода с шириной полоскового контакта 95мкм на длине волны 970нм без использования термокомпенсаторов.

3. Тепловое сопротивление лазерного диода зависит от уровня возбуждения, поэтому при анализе и сравнении тепловых параметров различных конструкций на базе такого подхода 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 808нм забракованных по результатам первого измерения.

Апробация результатов работы

Вошедшие в диссертационную работу положения и результаты были опубликованы в 10 научных статьях в реферируемых журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Полный перечень статей представлен на стр.125. Полученные результаты были представлены автором лично на следующих международных и всероссийских научных конференциях:

1. 8-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Минск, Беларусь, 17-20 мая 2011 года.
2. 9-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Минск, Беларусь, 28-31 мая 2013 года.
3. 4-й Всероссийский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». Санкт-Петербург, 10-13 ноября 2014 года.
4. 5-й Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, Москва-Звенигород 23-26 ноября 2015 года.

5. 5-й Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, Москва-Звенигород 23-26 ноября 2015 года

Личный вклад соискателя состоит в создании трёхмерной модели тепловых потоков в мощных одиночных лазерных диодах (МОЛД) при различных уровнях тепловой нагрузки для различных типов конструкций теплоотводящего элемента (ТОЭ), в том числе при использовании сабмаунтов. Лично соискателем экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований, получены экспериментальные образцы рекордных предельных мощностей и рекордных ресурсных мощностей МОЛД ближнего ИК-диапазона. Изготовлены экспериментальные образцы МОЛД с применением в качестве сабмаунтов синтетических plasma-CVD поликристаллических алмазов, для которых соискателем была разработана значительная часть технологии металлизации синтетических алмазов и технологии монтажа на них лазерных кристаллов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Первая глава посвящена обзору литературы посвященной экспериментальным и теоретическим работам по повышению выходных параметров мощных инжекционных лазеров. Во второй и третьей главах представлены результаты исследований трёхмерного моделирования тепловых полей и его результаты для различных типов конструкций теплоотводящих элементов, в том числе с использованием сабмаунтов. Четвёртая глава содержит результаты экспериментальных исследований выходных параметров мощных инжекционных лазеров, приводятся методики повышения этих параметров.

Общий объём работы составляет 132 страниц, включая 55 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 48 наименований.

Глава 1. Мощные инжекционные лазеры

1.1 Введение к обзору литературы

Задача повышения ресурсной мощности и яркости лазерных диодов не теряет своей актуальности [24–30]. Продолжается совершенствование конструкций базовых гетероструктур, операций планарного процессинга, пассивации и защиты зеркал резонаторов, а также методов монтажа для повышения эффективности отвода тепла и получения ресурсного режима при более высоком уровне выходной оптической мощности. Мощный лазерный диод является экстремально нагруженной структурой по насыщенностью энергией. Удельная плотность тепловой мощности выделяемой в активной области мощного однополоскового лазера в непрерывном режиме работы составляет около 5 ГВт/см^3, плотность теплового потока отводимого от лазерного кристалла может превышать 5 кВт/см^2, а плотность оптической мощности на выходном зеркале составляет около 20 МВт/см^2. При такой колоссальной тепловой и оптической нагрузке удаётся реализовать наработку лазерного диода в 3000-5000 часов и более. Очевидно, что ресурсный режим при таких экстремальных нагрузках может быть реализован только при эффективном охлаждении активной области лазерного кристалла. Для дальнейшего повышения указанных параметров требуется более подробно исследовать детали распространения тепловых потоков как экспериментально, так и на основе расчётных моделей.

Каждый дефект, возникший на этапе роста или в процессе монтажа МОЛД является «горячей точкой», как в непрерывном режиме работы, так и при импульсном режиме работы, температура такой горячей точки на выходном зеркале резонатора, как показано в [24] может достигать температуры плавления гетероструктуры - более 1580˚С, приводя к КОД выходного зеркала лазера. Пример КОД в экспериментальном образце изготовленного нами МОЛД на длине волны 808нм приведён на Рис. 1

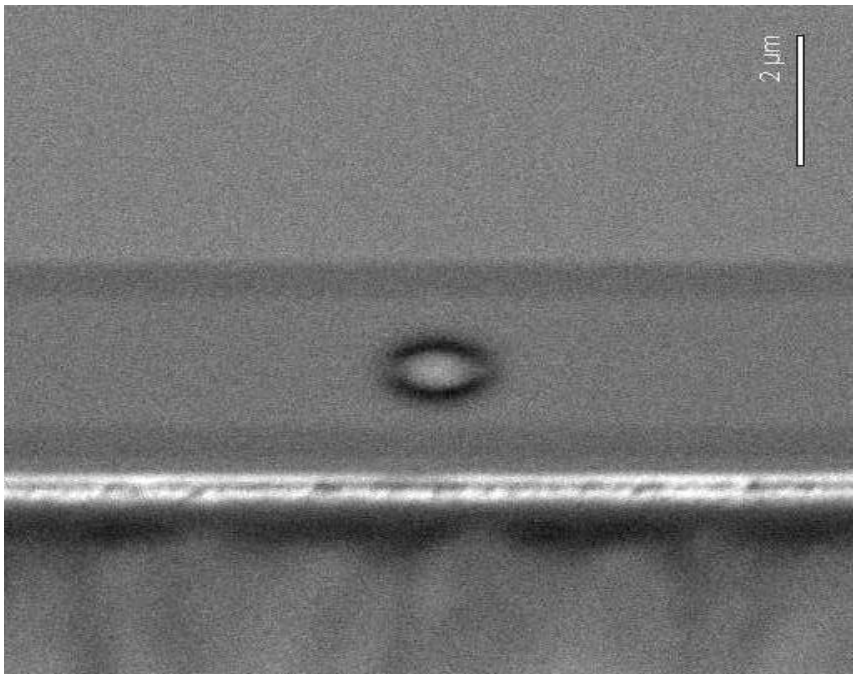
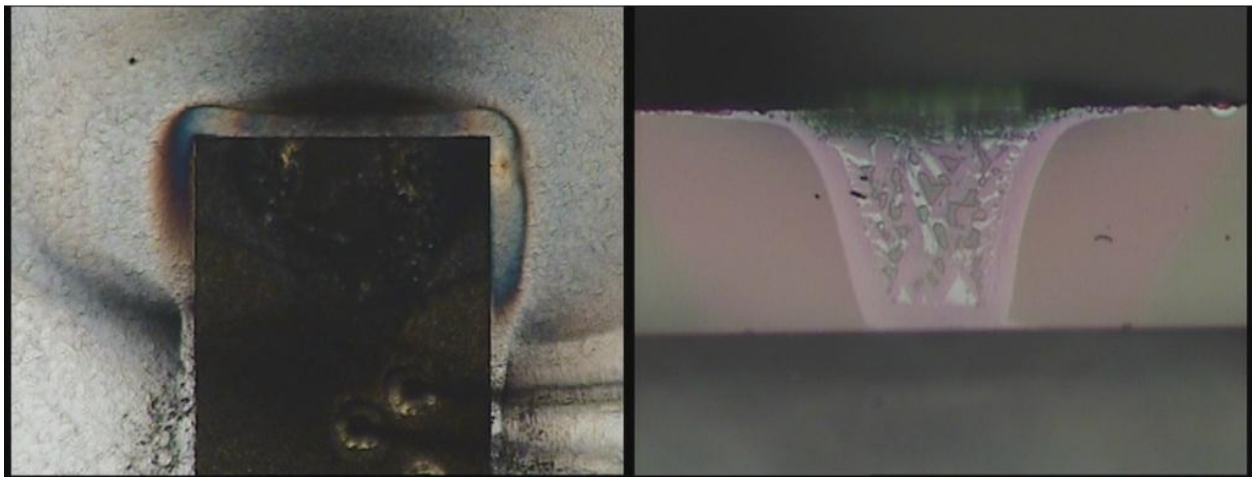


Рис. 1 - Микрофотография на сканирующем электронном микроскопе локального прогара выходного зеркала (КОД) вследствие экстремальных нагрузок во время работы МОЛД в непрерывном режиме работы при выходной мощности более 25 Вт. Светлая полоска – слой припоя между теплоотводящим элементом (внизу) и лазерным кристаллом (вверху).

При таких экстремальных тепловых нагрузках мы наблюдали довольно экзотический случай КОД на заднем глухом зеркале лазерного резонатора в случае, когда тепловой контакт чипа с ТОЭ был недостаточно эффективен. При этом КОД сопровождался электрическим пробоем заднего зеркала с расплавлением припоя и материала гетероструктуры. Микрофотографии указанного явления в плоскости монтажа лазерного кристалла и со стороны торца заднего зеркала представлены соответственно на Рис. 2 а, б.



а) б)

Рис.2 - Микрофотографии КОД и электрического пробоя заднего зеркала мощного диодного лазера а) вид сверху, б) вид со стороны заднего зеркала резонатора.

Для решения поставленных задач необходимы теоретические оценки, позволяющие получить адекватные значения распределений температуры активной области в зависимости от конструктивных параметров и уровня накачки, а именно требуется создание трёхмерной компьютерной модели расчёта тепловых потоков во всех элементах конструкции мощных одиночных диодных лазеров для получения и анализа картины тепловых полей при высоком уровне возбуждения. Необходимо понять, что уже сделано в данном направлении теоретически и экспериментально, каковы основные подходы к решению указанных проблем.

1.2 Мощные лазерные диоды

Изначально параметры инжекционного лазера заложены в гетероструктуре. Для получения экстремально-высоких выходных параметров мощных непрерывных лазерных диодов, используют hi-end технологии, эпитаксиального MOCVD и MBE-роста слоёв высокого качества из газовой фазы с чрезвычайно низкой плотности дефектов. Сколотые зеркала, например, на фирме nLight, обрабатываются по собственной уникальной технологии пассивации зеркал nLight’s extended lifetime (nXLT). Кристаллы монтируют p-подложкой на металлизацию AuSn, нанесённую на

термокомпенсирующий сабмаунт нитрида алюминия (AlN), согласованный по к.т.р. с лазерный кристаллом[25].

Коллективом авторов из ФТИ им. А.Ф. Иоффе была опубликована работа по мощным лазерным диодам, главными итогами которой стала разработка наногетероструктур с ассиметричным расширенным волноводом. Методом МОС-гидридной эпитаксии были выращены симметричные с узким волноводом и асимметричные с широким волноводом лазерные гетероструктуры GaInAsP/GaInP/AlGaInP. Из лазерных гетероструктур были изготовлены мезаполосковые лазеры с апертурой 100мкм, излучающие на длине волны 808нм, и исследованы их излучательные характеристики. Максимальная оптическая мощность в лазерах с узким симметричным волноводом составила 5.1 Вт, а для лазеров с широким асимметричным волноводом — 9.9 Вт. [26].

В НИИ «Полюс», ООО «Сигм Плюс», совместно с ОАО НПП «Инжект» получены важные практические результаты по технологии выращивания лазерных гетероструктур методом МОС-гидридной эпитаксии и созданию на их основе мощных диодных лазеров. Разработана технология по снижению термоупругих напряжений решающая проблему «смайла» в линейках лазерных диодов [27]. В этой работе изготовлены и исследованы традиционные лазерные гетероструктуры AlGaAs/GaAs и скомпенсированные гетероструктуры в системе AlGaAs/ AlGaPAs/GaAs, а также линейки ЛД на их основе, излучающие на длине волны 850нм. Результаты измерений радиуса кривизны показывают, что введение в гетероструктуры AlGaAs/GaAs слоев, содержащих фосфор, способствует снижению механических напряжений и, следовательно, препятствует изгибу многослойных гетероструктур. Показано, что использование скомпенсированной гетероструктуры AlGaPAs/GaAs улучшает ближнее поле линеек ЛД и способствует сохранению наклона ватт-амперной характеристики при высоких токах накачки благодаря более однородному, чем в случае линеек на основе AlGaAs/GaAs, тепловому контакту всех

излучающих элементов линейки лазерных диодов с теплоотводом (в том числе и расположенных ближе к краям).

Один из методов повышения импульсной мощности инжекционных лазеров – использование эпитаксиально-интегрированных структур, где излучающие апертуры p-n переходов находятся друг над другом. Получены и исследованы двойные интегрированные лазерные гетероструктуры AlGaAs/GaAs содержат две различные активные области, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии в едином процессе роста. Типичный наклон ватт-амперной характеристики составил 2.3 Вт/А, что почти вдвое выше, чем у лазерного диода (1.2 Вт/А). Продемонстрирована генерация излучающих областей двухволновых лазеров в спектральном диапазоне 800 — 815нм. Расстояние между спектральными максимумами составило ~7нм. Исследована зависимость длины волны генерации активных областей как двухволновых, так и одиночных лазеров от тока накачки и показано, что более удаленная от теплоотвода излучающая область чувствительнее к увеличению тока накачки. Указанные структуры являются перспективными для импульсных приборов, к сожалению в непрерывном режиме они не могут конкурировать с традиционными структурами ввиду высокого последовательного сопротивления и повышенного напряжения питания эпитаксиально-интегрированных структур [28].

1.3. Вычислительная и экспериментальная база

Для создания тепловой модели был использован лицензионный софт Comsol Multiphysics, позволяющий решать методом численного моделирования широкий спектр задач. Особенностью Comsol Multiphysics является возможность совмещать решения задач из разных областей физики в одной модели.

Создание экспериментальных образцов МОЛД проводилось в комплексе чистых помещений НФО ФИАН, класса 10000 с локальными чистыми зонами класса 100 и другими требуемыми приборами и оборудованием

обеспечения, включая генератор чистого азота, компрессор очищенного воздуха и т.д.

На Рис.3 показан шкаф ламинарного потока воздуха для дополнительной очистки рабочей зоны над установкой для монтажа кристаллов лазерных диодов, под ним установка монтажа лазерных кристаллов на ТОЭ Lambda A6 (модернизированная). Слева находится установка для исследования параметров лазерных диодов и линеек лазерных диодов TL500, которая дополнена также сертифицированным оборудованием: измерителем мощности Gentec Solo PE, спектрометром OceanOptics HR4000 и драйвером лазерных диодов и линеек NewPort 5600. Установка HB12 ультразвуковой разварки использовалась для приварки верхних золотых электродов питания лазерных структур. Ресурсные испытания лазерных диодов в течение сотен часов производились на ресурсных стендах IPG-GROUP LDT-6 и LDT-10.

Нанесение слоёв металлизации проводилось не установке магнетронного напыления, оснащённой 3-мя магнетронными источниками авторской оригинальной конструкции, используемыми для напыления металлических плёнок и оригинальным дополнительным магнетроном, используемым для финишной очистки аргона. Вакуумная установка создана на базе сверхвысоковакуумной установки УСУ-4 и оснащена высокопроизводительной системой откачки на основе турбомолекулярного насоса TurboVac, На указанной установке, позволяющей получать чистую предварительную откачку до уровня 10^{-8} проводились исследования по нанесению слоёв металлизации на теплоотводящие элементы для монтажа мощных лазерных диодов, в частности исследовалось влияние режимов напыления плёнок на их параметры. Кроме высокой адгезии плёнок к поверхности теплоотводящих элементов, для повышения эффективности теплопередачи разрабатывались режимы напыления, обеспечивающие получение безвискерных металлических плёнок высокой плотности и однородности как по материальному составу, так и по толщине.

Часть исследований проводилась на сканирующем электронном микроскопе JSM-5910LV (фирма JEOL, 2001 г.) с аналитической системой INCA ENERGY (фирма OXFORD INSTRUMENTS), включающей приставки для рентгеновского микроанализа (EDS и WDS) и приставку CRYSTAL для исследований методом дифракции обратно-рассеянных электронов. Микроскоп позволяет получать изображения объектов в режиме вторичных и отраженных электронов с увеличением до x300000 в высоком и низком вакууме; проведение локального микроанализа элементов от B до U.



Рис.3. - В центре сверху шкаф ламинарного потока воздуха для дополнительной очистки рабочей зоны над установкой для монтажа кристаллов лазерных диодов, слева - стенд для измерения выходных параметров МОЛД.

Для моделирования тепловых параметров использованы современные высокопроизводительные персональные компьютеры.

1.4. Охлаждение мощных инжекционных лазеров

Главным методом повышения выходных параметров МОЛД, использованным в работе, был метод повышения эффективности отвода тепла от полоскового контакта. Сравнительному исследованию параметров мощных лазерных диодов на длине волны 808нм, собранных на С-маунтах и F-маунтах посвящена работа [29], в которой в непрерывном режиме были получены максимальные мощности соответственно 12.6 Вт и 10.9 Вт. на теплоотводящих элементах типа F и С -маунт. Этот результат к сожалению не позволяет определить вклад геометрии самого теплоотводящего элемента, поскольку диод, смонтированный на С-маунте, судя по приведённой в статье фотографии, имел предположительно термокомпенсатора из CuW, а в конструкции второго образца, кроме базового теплоотводящего элемента типа F- маунт, был применён термокомпенсатор AlN, согласованный по к.т.р. с лазерным кристаллом. Полученные в данной статье экспериментальные результаты противоречивы, в частности спектры излучения лазеров смонтированных на F-маунте сильнее смещены в длинноволновую область, чем спектры излучения лазеров, смонтированных на С-маунте. Между тем конструкция F-маунт более эффективна с точки зрения охлаждения, чем конструкция С-маунта, что будет показано ниже в нашей работе, на основе расчетных и экспериментальных результатов. Очевидно, в рассмотренном авторами, работы [29] случае важную роль играет теплопроводность термокомпенсаторов, составляющая половину от теплопроводности меди (400 Вт/м•К). Вместе с тем, снижение термоупругих напряжений за счёт термокомпенсатора положительно сказывается на ресурсе лазера. Полученные в статье значения теплового сопротивления лазеров собранных на F-маунт и С-маунт составили соответственно 2,24 К/Вт и 3,02 К/Вт. Обратим внимание на то, что тепловое сопротивление лазера в данной работе, как и во многих других работах, приводится без указания соответствующего ему тока накачки. Между тем, лазер — прибор, к.п.д. которого сильно зависит от ток накачки, подробнее в главе 4.

В отличие от упомянутой работы, в экспериментальной части данной диссертации был проведён эксперимент, где оба типа теплоотводящих элементов изготовлены на том же оборудовании одним и тем же методом, методом из одной партии меди с одинаковым качеством обработки поверхностей и ребер и отличались только геометрией, что гарантирует более адекватные для сравнения экспериментальные результаты, а также возможность их сопоставления с расчётными данными.

Трёхмерное моделирование существенно помогает в поисках оптимальных конструкций МОЛД. Моделированию теплового режима посвящено множество работ, в частности [29- 33]. В данной работе, моделирование тепловых потоков проводилось в 3-х мерной модели, что позволило получить профили распределения температур по всем координатам в зависимости от геометрических параметров конструкции, материалов и тепловой нагрузки.

В работе [34] решается задача охлаждения лазерных линеек с применением CuW и Cu-алмазных сабмаунтов, в качестве термокомпенсаторов мощных лазерных линеек. В статье трёхмерно моделируются режимы работы лазерных линеек такой конструкции в импульсном и непрерывном режиме. Рассчитываются их тепловые поля. Исследуется тепловое сопротивление в каждом излучающем кластере линейки смонтированных на CuW и Cu-алмазный сабмаунт, в зависимости от положения кластера. Из полученных результатов работы следует, что при использовании термокомпенсаторов CuW можно ощутимо снизить термоупругие напряжения и снизить тепловое сопротивление лазерной линейки. Также в статье оценивается влияние скошенной передней грани теплоотводящего элемента на тепловое сопротивление лазерной линейки. Делается вывод о незначительном эффекте от применения скошенной грани.

Сегодня диодные матрицы излучают киловатты оптические мощности и от них приходится также отводить киловатты мощности тепловой нагрузки. В работе [35] рассчитана трехмерная модель конструкции матрицы,

состоящей из 25 линеек, имеющих двустороннее микроканальное жидкостное охлаждение. На основе расчетов моделирования экспериментально были получены образцы подобных матриц, спектрального диапазона 970нм, непрерывная мощность которых составила 2500 Вт. Результаты ресурсных испытаний показывают, что деградация мощности экспериментальных матриц была меньше, чем 5% после работы в течение 2700 часов.

Что касается самой технологии монтажа лазерного диода, стоит упомянуть флюсы. При монтаже лазерного диода снять окисную плёнку с поверхности припоя можно радиомонтажным флюсом, однако эта процедура может повлиять на ресурс лазера. А именно, она влияет на состояние зеркал и нужно учитывать воздействие испарений используемого флюса. Эти последствия могут проявиться не сразу, а уже в процессе работы лазера, через сотни часов безупречной работы. И могут приводить к катастрофической оптической деградации зеркал, как следствие к выходу из строя лазера. В статье [36], рассматривается воздействие некоторых флюсов, на время плавления и влияние остатков растворителя на КОД. Сканирующий электронный микроскоп показывает, что увеличение областей КОД, их размера и количества, зависит от увеличения времени плавления и зависит от типа используемого паяльного флюса. Авторами статьи разработана технология очистки, исследования методами ИК-спектроскопии, подтверждают, что зеркала практически не загрязняются флюсом после процесса очистки.

По нашему мнению следует уделить серьёзное внимание поиску аналогичных новых методов повышения качества интерфейса между лазерным чипом и теплоотводящим элементом для того чтобы приблизить экспериментальные результаты к расчётным, поскольку именно он является узким местом всей конструкции. При изготовлении экспериментальных образцов для данной работы, качеству интерфейса уделялось особое внимание. Благодаря этому стало возможным получение высоких параметров

по выходной мощности и к.п.д., а также получение ресурсного режима работы.

Мы разработали технологию монтажа лазерного кристалла без применения флюсов.

1.5 Современные мощные инжекционные лазеры

Для исследований предельных и ресурсных параметров диодов авторы некоторых публикаций используют значительное снижение температуры для испытуемых образов, в частности понижение температуры лазерного диода до -5˚С, которое требует применения вакуумных камер и испытаний в атмосфере осушенного азота [37]. Так, одним из мировых лидеров в разработке технологий изготовления и монтажа диодных лазеров является Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin, Germany. В 2009м году группой под руководством Г. Эрберта была показана возможность создания лабораторных образцов, работающих при -5˚С, в герметичной камере с осушенным азотом, излучающих 20 Вт непрерывной мощности в ресурсном режиме, при ширине полоскового контакта 96мкм. В статье показано, что для лазера на 980нм достигается максимальная плотность мощности излучения на выходном зеркале при КОД около 30 мВт/см^2 в непрерывном, и 38 МВт/см^2 в квазинепрерывном режиме работы. Пиковая мощность ограничивалась вследствие возникновения внутренних дефектов и дефектов на зеркалах. В механизмах деградации ясности, к сожалению получено не было, поскольку не было обнаружено корреляции между уровнем выходной мощности при деградации и механизмом деградации. Тем не менее, большой интерес представляет информация по объёмной деградации материала активной области, полученная методом катодолюминесцентных топограмм деградировавших образцов на длине волны излучения активного слоя.

В статье [38] приводятся выходные параметры мощных диодных лазеров ближнего ИК диапазона (790-980нм), фирмы nLight, с длиной резонатора 3,8мм и 5мм с шириной полоска 75, 95, 200 и 350мкм, с высоким

к.п.д. 62-65%. Максимальная ресурсная мощность оптического излучения МОЛД, излучающих на длине волны 970нм, при комнатной температуре, с длиной резонатора 5мм и шириной полоска 150мкм, в непрерывном режиме составила 18 Вт. Это одно из самых передовых достижений для МОЛД на данный момент, удельная плотность мощности составила 0.12 Вт/мкм. Примем это значение в качестве базового для сравнительной оценки полученных нами результатов.

1.6 Выводы

Обзор литературы показывает, что задача охлаждения мощных полупроводниковых лазерных структур, диодов, линеек и матриц на их основе является современной и востребованной. Для её решения широко используют трёхмерное моделирование тепловых потоков в лазерной структуре и теплоотводящих элементах. Актуален вопрос об использовании сабмаунтов с высокой теплопроводностью, в том числе желательно согласованных по к.т.р. с лазерным кристаллом.

Научное сообщество напряженно работает над получением предельных выходных параметров мощных полупроводниковых лазеров, обладающих при этом и ресурсом. Максимальное раскрытие потенциала каждого элемента теплоотводящей конструкции в совокупности с совершенствованием лазерных эпитаксиальных гетероструктур приведёт к значительному повышению основных выходных параметров лазерных диодов — ресурсной выходной мощности и яркости для качественного скачка - обеспечения возможности прямого использования их излучения при обработке материалов. Теоретические расчёты показывают, что потенциал многих типов ТОЭ не исчерпан. Данная диссертационная работа посвящена экспериментальному раскрытию возможностей различных конструкций ТОЭ в тандеме с сабмаунтом высокой теплопроводности. Литературный обзор определяет передовой мировой уровень МОЛД, в соответствии с параметрами образцов фирмы nLight: 18 Вт непрерывной мощности, длина резонатора 5мм, ширина полоска 150мкм, длина волны излучения 970нм.

Глава 2. Моделирование тепловых потоков в МОЛД

2.1 Постановка и задание параметров задачи

Для создания достоверной трёхмерной модели тепловых потоков в мощном одиночном лазере в данной работе использовался лицензионный пакет программного обеспечения шведской компании ComSol MultiPhysics Указанный пакет является весьма удобным инструментом для моделирования, существенно упрощающим построение трёхмерных моделей, с возможностью совмещать различные задачи в одной модели. ComSol MultiPhysics позволяет проводить вычисления численными методами математического анализа, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных и методе конечных элементов. Пакет имеет продвинутую графику, которая упрощает и повышает качество анализа полученных результатов.

2.1.1.Постановка задачи моделирования.

Поставлена задача получения трёхмерного распределения температуры в активной области лазерной гетероструктуры МОЛД при различных геометрических размерах (ширины полоскового контакта и длины резонатора). А также, при различной теплопроводности материала теплоотводящего элемента и сабмаунта (термокомпенсатора) в зависимости от изменения величины тепловой нагрузки (с учётом зависимости полного к.п.д. лазера от уровня накачки) для различных конструкций ТОЭ при различной геометрии сабмаунта. Целью моделирования было определение из полученных расчётных данных оптимальных научно-обоснованных, а также экономически обоснованных вариантов конструкций МОЛД, в том числе целесообразных конструкций ТОЭ без применения сабмаунтов и конструкций ТОЭ с использованием сабмаунтов для последующего внедрения на отечественном производстве с учётом имеющейся производственной базы и технологий.

2.1.2. Исходные данные физической задачи: дан МОЛД, работающий в непрерывном режиме при заданном уровне тепловой нагрузки (источники

постоянного тепла заданы), одна из граней ТОЭ является термостабилизированной.

Граничные условия: температура термостабилизируемой грани поддерживается при T=20˚C.

Постоянный источник тепла в модели – активная область МОЛД с полосковой геометрией.

За основу для вычислений по тепловой модели был выбран мощный одиночный лазерный диод на длине волны 970нм с шириной полоскового контакта 100 микрон, длина резонатора 4мм, смонтированный на медном теплоотводящем элементе типа С-маунт без применения сабмаунтов. Исключительно высокие излучательные параметры современных ЛД достигаются благодаря применению ассиметричных РО-ДГС гетероструктур с расширенным волноводом, позволяющих существенно снизить оптическую нагрузку на выходное зеркало.

Одним из основных параметров модели является тепловой нагрузка, которая представляет собой тепловую мощность отводимую от лазерного кристалла. Выделяемая постоянно тепловая мощность P_{therm} рассчитывается из к.п.д. (1), как доля от общей вкладываемой электрической мощности за вычетом излучаемой МОЛД оптической мощности.

$$P_{therm} =\cdot U\ (1-\ \eta_{total}) \qquad (1)$$

Формула 1. – Расчёт тепловой мощности.

P_{therm} – тепловая мощность,

I - ток накачки,

U – напряжение,

η_{total} – полный к.п.д.

Поскольку к.п.д. у различных МОЛД существенно разнятся, нагляднее в тепловой модели иллюстрировать зависимости распределения тепловых

полей от тепловой нагрузки на МОЛД. Данный подход позволяет унифицировать оценку для разных лазерных чипов с различным к.п.д.

2.1.3. Расчёт полного к.п.д. проводился по упрощенным формулам:

(2) $$n_d = n_i \times \left(1 + \frac{2\alpha_i \times L}{\ln(R_1 \times R_2)^{-1}}\right)^{-1} \times \left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \times \frac{1 - R_2}{1 - R_1}\right)^{-1}$$

(3) $$n_t = n_d \times \frac{(I - I_{th}) \times E_g}{I \times \left[U_{th} + R_s \times (I - I_{th})\right]}$$

Формулы 2,3 – Расчёт полного к.п.д.

n_t - полный К.П.Д.

n_d - внешняя дифференциальная квантовая эффективность

n_i - внутренний квантовый выход

α_i - внутренние потери

E_g - ширина запрещённой зоны (в вольтах)

L - длина резонатора

R_1, R_2 - коэффициент отражения зеркал 1,2

I_{th} - пороговый ток

U_{th} - пороговое напряжение

R_s - последовательное сопротивление

I- ток накачки

Таблица 1. Основные параметры диодов, обсчитываемых в модели:

Длина волны излучения,нм		808	970
Ширина запрещённой зоны, эВ	E_g	1,53	1,27
Длина резонатора, см	L	0,3	0,4
Внутренние потери, см-1	α_i	0,3	0,3
Внутренний квантовый выход, 1		0,95	0,95
Коэффициент отражения выходного зеркала, 1	R_1	0,05	0,05
Коэффициент отражения заднего зеркала, 1	R_2	0,95	0,95
Пороговый ток, А	I_{th}	0,7	0,6
Пороговое напряжение, В	U_{th}	1,5	1,2
Последовательное сопротивление, Ом	R_s	0,042	0,04

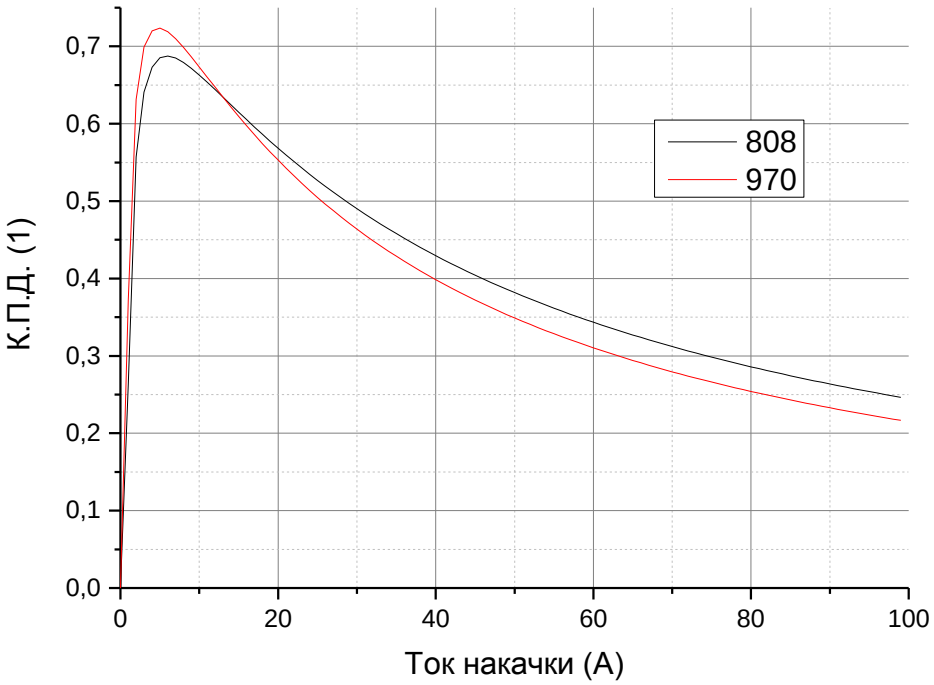


Рис.4 - Зависимость полного к.п.д. МОЛД от тока накачки для двух типов лазерных диодов излучающих на длине волны 808нм и 970нм.

Результаты расчета полного к.п.д. приведены на Рис. 4. Они показывают, что в диапазоне роста тока накачки до 10А существенно больший к.п.д. имеет лазерный диод генерирующий излучение с длиной волны 970нм. Пересечение двух кривых в зависимости к.п.д. начинается при токе 13А, далее лазер на 808нм имеет существенное преимущество, скорость снижения к.п.д. с ростом тока накачки примерно на 5% ниже, чем для лазера на 970нм.

Зная к.п.д., а следовательно и долю полной мощности преобразуемой в тепловую энергию, являющуюся источником тепла в нашей модели, мы можем приступить к моделированию зависимостей распределений тепла по объёму МОЛД от тепловой нагрузки.

2.1.4. Расчёт трёхмерной тепловой модели проводится численно в среде ComSol Multiphysics методом конечных элементов. Численно решается уравнение теплопроводности (4).

$$q = -\varkappa \, grad\,(T) \qquad (4)$$

Формула 4. Уравнение теплопроводности Фурье в дифференциальной форме.

q — вектор плотности теплового потока — количество энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, относительно нормали;

$\varkappa$ — коэффициент теплопроводности (удельная теплопроводность);

T — температура.

Минус в правой части уравнения показывает, что тепловой поток направлен противоположно вектору grad T (то есть в сторону убывания температуры). Это выражение известно как закон теплопроводности Фурье.

В программной среде моделирования, модель разбивается на тетраэдрические – лагранжевы элементы, они задают конечные производные

на границах и вторые производные в углах элемента. Пример построения сетки из таких элементов показан на Рис. 5.

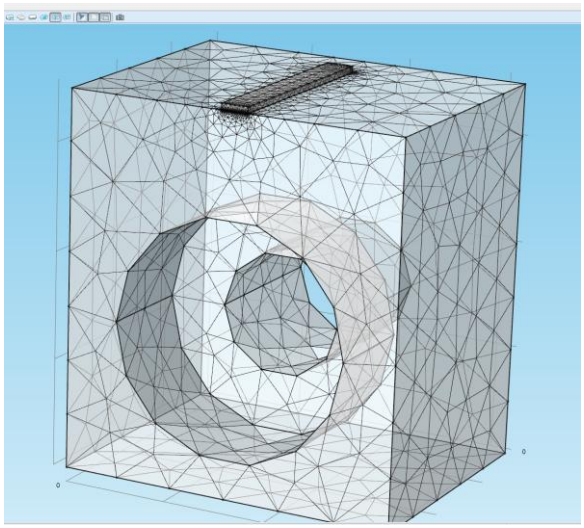


Рис. 5 - Тетраэдрическая сетка разбиения в модели МОЛД на теплоотводящем элементе типа C-маунт.

В модели будут рассчитаны случаи различной геометрии, как самого полоска активной области лазерного кристалла для различных размеров резонатора, так и случаи различной геометрии термокомпенсаторов на двух типах теплоотводящих элементов типа C-маунт и типа F-маунт.

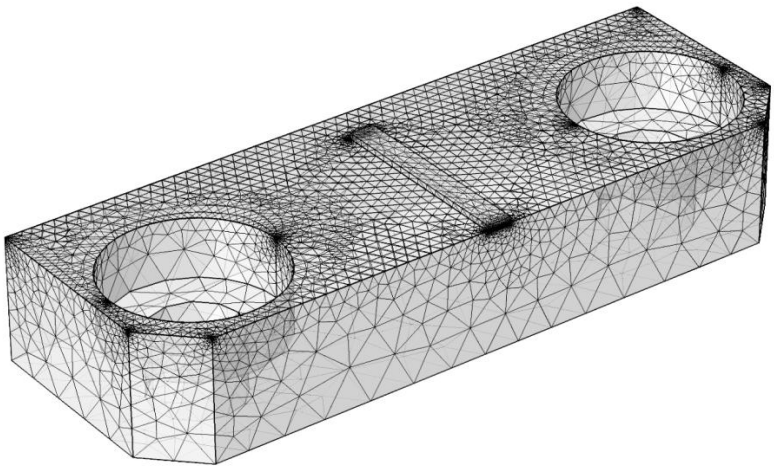


Рис.6 - Тетраэдрическая сетка разбиения модели в случае лазерного кристалла смонтированного на теплоотводящем элементе типа F-маунт.

Результаты вычислений по описанной выше модели показали, что ввиду сравнительно малой толщины припоя и небольших отличий основных тепловых параметров различных припоев (теплопроводности, теплоёмкости, плотности), без ущерба для точности вычислений в модель могут быть внесены упрощения. При рассмотрении распространения тепла в слоях припоя различного состава можно не учитывать конкретный состав припоя для применяемых в экспериментах различных типов твёрдых и мягких припоев посредством которых осуществляется монтаж лазерного кристалла на ТОЭ.

Из закона теплопроводности Фурье в интегральной форме (5) следует, что перепад температур на толщине припоя находится на уровне десятых долей градуса.

$$P = -\varkappa \frac{S\Delta T}{h} \qquad (5)$$

Формула 5 - Закон теплопроводности Фурье в интегральной форме, где:

P — полная мощность тепловых потерь,

S — площадь сечения параллелепипеда,

ΔT — перепад температур граней,

h — толщина слоя.

Для всех используемых типов мягких и твёрдых припоев теплопроводность находится в диапазоне 50 - 85 Вт/м•К. Для примера рассмотрим модельный случай индиевого припоя с достаточно высокой теплопроводностью для низкотемпературного припоя, которая составляет 81 Вт/м•К. Вычисления показывают, что при типичной толщине припоя в 3-5мкм и тепловой нагрузке в 10 Вт перепад температуры на толщине припоя незначителен, соответственно различиями в перепаде температур по толщине

припоя для различных типов припоя можно пренебречь. Таким образом тип припоя не играет существенной роли в рассматриваемой модели.

В то же время, в отличие от расчёта тепловой модели, тип припоя играет важнейшую роль при монтаже лазерного кристалла, поскольку кроме передачи теплового потока важная роль припоя – обеспечить достаточную пластичность для компенсации термоупругих напряжений, возникающих вследствие существенно различных к.т.р. материалов полупроводниковой гетероструктуры и теплоотводящего элемента (или сабмаунта).

Следующий этап программирования параметров модели – выбор и задание параметров материалов для всех элементов, входящих в конструкцию рассматриваемой модели.

С точки зрения общего подхода к механизмам распространения тепла в гибридных конструкциях МОЛД содержащих металлические, диэлектрические и полупроводниковые материалы, необходимо отметить, что при строгом рассмотрении задачи отвода тепла необходимо учитывать электронный и фононный механизмы теплопередачи. Для диэлектриков основной вклад даёт фононный механизм теплопередачи, для полупроводников фононный механизм также вносит существенный вклад, в то время как для металлического припоя и металлического ТОЭ основную роль играет электронный механизм теплопроводности. Особый интерес представляют механизмы теплопроводности в композитных материалах с высокой теплопровожностью, которые могут быть согласованы по к..т.р. с материалом гетероструктур, в частности такие, как медь-алмаз, компонентами которого являются зёрна металла и диэлектрика. Переходы от одного механизма теплопроводности к другому создают дополнительные сложности при анализе процесса передачи энергии от фононов к электронам и в обратном направлении на границах раздела металл-диэлектрик.

Очевидно, что многочисленные границы между зёрнами разнородных материалов затрудняют теплопередачу. Делаются попытки внести ясность в

затронутый вопрос, однако строгой общепризнанной модели до сих пор не существует [39],[40].

Материалы диэлектрики применяемые в качестве сабмаунтов, такие как BeO, AlN, уступают в теплопроводности меди приблизительно вдвое. Высокая теплопроводность металлов является следствием закона Видемана-Франца, связывающего тепло- и электропроводности.

$$æ = \sigma \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 T \quad (6)$$

Формула 6. Закон Видемана-Франца, где:

æ - теплопроводность,

k – постоянная Больцмана,

e – заряд электрона,

T– температура.

Для более эффективного охлаждения материала лазерной гетероструктуры, а также для снижения последовательного сопротивления конструкции МОЛД необходима высокая тепло и электропроводность применяемых материалов. По удачному совпадению тепло и электропроводности для металлов прямо пропорциональны.

Рассмотрим свойства набора материалов потенциально применимых в конструкциях МОЛД. Отметим, что в рассмотренной тепловой модели не рассматриваются термо-упругие напряжения связанные с различием к.т.р., однако с учётом дальнейшей практической реализации и внедрения разрабатываемых конструкций в производство целесообразно стремится подбирать материалы с к.т.р. близкими к к.т.р. полупроводника.

Таблица 2. Свойства материалов, используемых в конструкции МОЛД

Материалы	Температура плавления, ˚С	К.Т.Р., 10^{-6}˚$С^{-1}$	Теплопроводность при 200С, Вт/м•˚К
Полупроводники			
Кремний	1 412	3	96,6
Германий	936	6,2	478,8
Арсенид галлия	1 238	6,2	42
Металлы			
Алюминий	660	24,3	226
Медь	1 083	17,3	395
Молибден	2 630	5,4	160,44
Вольфрам	3 380	4,6	168
Никель	1 453	13,4	92,4
Диэлектрики			
Поликор	2 050	6,9	23,1
Окись бериллия	2 570	6,2	231
Сапфир	2 050	6,05–7,08	34,44
Ситалл СТ-36	1 200	5,7	3,36
Кварцевое стекло	1 500	0,51	1,176
Монокристаллический кварц	1 500	6,0–7,0	1,47
Алмаз (поли, монокристалл)	-	1	600-2500
Композит CuW	-	6,5	180
Композит Медь-Алмаз	-	1	400-1000

В качестве материала для базового ТОЭ множество преимуществ имеет медь. На практике желательно использовать бескислородную медь марки МОБ-1. Медь – сравнительно дешёвый материал, легко обрабатывается, однако при обработке она имеет недостатки – низкая твёрдость и высокая вязкость. Несмотря на это, наличие теплопроводности около 400 Вт/м•˚К, доступность и низкая цена этого цветного металла делают его основным конструкционным материалом для ТОЭ.

В тепловой модели для лазерного кристалла рассматривался материал гетероструктуры на основе арсенида галлия. Для материала сабмаунта была проведена целая серия последовательного моделирования для материалов с теплопроводностью от 100 до 2400 Вт/м•˚К, охватывающая весь диапазон теплопроводности применяемых современных сабмаунтов из диэлектриков, различных композитных материалов, керамики, а также алмазов включая поликристаллические и монокристаллические алмазы.

Задав все параметры модели можно перейти к следующей стадии работы – численному моделированию.

2.2 Результаты численного моделирования тепловой задачи.

Моделирование тепловых режимов работы МОЛД при использования ТОЭ конструкций типа С-маунт и F-маунт.

В результате вычислений в соответствии с описанной моделью, мы получаем массив данных, отображающий трёхмерную картину тепловых полей с определенным разрешением, содержащий координаты точек модели со значениями температуры в них. Из этих данных мы можем построить одномерные, двумерные и трёхмерные распределения температуры, изотермические поверхности и их сечения в интересующих нас плоскостях.

Как уже было отмечено, тепловые параметры рассчитывались в зависимости от тепловой нагрузки на лазерный диод.

Рассмотрим случай МОЛД с длиной резонатора 4мм и шириной излучающего полоска 100мкм. Последовательно будем моделировать

тепловые поля в нем, при монтаже на С-маунт и на F-маунт, после чего добавляем в модель МОЛД термокомпенсирующий сабмаунт с широким диапазоном значений теплопроводности.

2.2.1. Модель МОЛД, смонтированного на С-маунт.

Теплоотводящие элементы типы С-маунт и F – маунт было выбраны как модельные по 2-м основным причинам, во-первых – это стандартные, наиболее распространённые типы теплоотводящих элементов, во-вторых распространение тепловых потоков в них принципиально отличается вследствие разного расположения базовой термостабилизированной теплоотводящей поверхности относительно оси лазерного резонатора и соответственно плоскости p-n перехода.

На Рис. 7 показана тепловая картина для МОЛД смонтированного на С-маунт, непрерывная тепловая нагрузка 10 Вт. Полученные данные свидетельствуют о том, что самая нагруженная область – область выходного зеркала. В стационарном непрерывном режиме работы лазера эта область имеет температуру 35,3˚С при тепловой нагрузке 10 Вт. Как видно из рассчитанной модели, распределение температуры по длине полоскового контакта существенно неравномерно.

Отсюда можно сделать вывод о том, что такой существенно неравномерный нагрев активной области по длине резонатора влечет за собой снижение ресурса МОЛД в силу увеличения термоупругих напряжений в лазерном кристалле в направлении оси резонатора.

Кроме того, существенный перепад температур по длине резонатора может влиять практически на все основные параметры лазера вследствие сильной зависимости спектра усиления в активной области от температуры. Интегральный по длине резонатора спектр усиления за счёт этого эффекта может уширяться, приводя в частности к уширению спектров излучения и снижению дифференциальной эффективности. Поскольку перепад температур по длине резонатора увеличивается с ростом уровня накачки,

указанный механизм необходимо учитывать, в особенности при высоком уровне возбуждения для МОЛД с длинным резонатором.

Основной причиной неравномерности нагрева активной области по длине резонатора является особенность конструкции теплоотводящего элемента типа С-маунт.

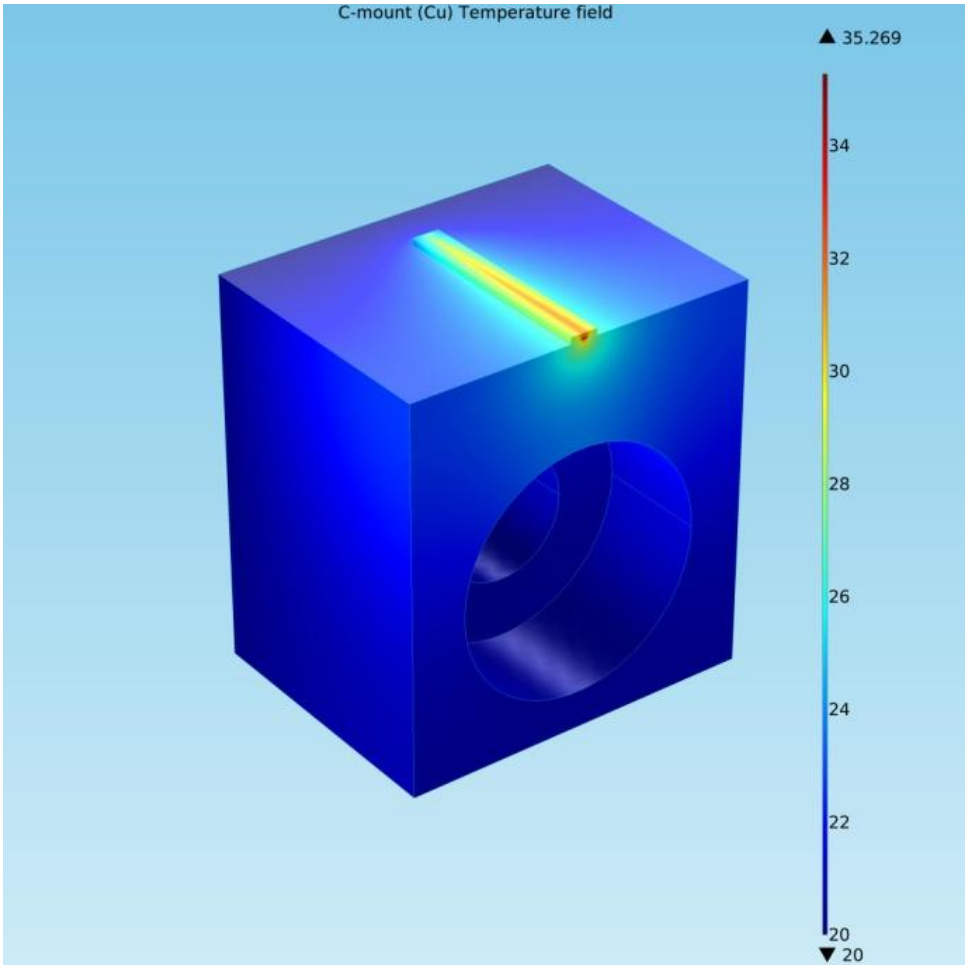


Рис.7 -. Температурное распределине в МОЛД, смонтированном на С-маунте, при тепловой нагруке 10Вт

Особенность, приводящая к неравномерному нагреву – ортогональность двух плоскостей: плоскости, содержащей источник тепла постоянной мощностью 10 Вт и плоскости контактирующей с радиатором, куда

производится непрерывный сброс тепла. Так как эта плоскость термостабилизирована при температуре 20˚С, поток тепла, в соответствии со вторым началом термодинамики, изгибается в сторону этой грани. Как видно на Рис. 8, где векторами указаны направления потоков тепла, сначала они направлены вниз, к массивной части медного ТОЭ, а затем к более холодной задней стенке. Стоит отметить еще один конструктивный недостаток С-маунта, с точки зрения равномерности охлаждения, это центральное отверстие крепления ТОЭ к радиатору. Потоку тепловой энергии приходится обходить крепёжное отверстие, преодолевая путь от передней, самой горячей грани С-маунта к задней охлаждаемой грани.

По этой причине изотермические поверхности на Рис.8 так сильно искривлены. Кривизна изотермических линий говорит о сильной неравномерности градиента температур в последовательных сечениях всей теплоотводящей конструкции по длине резонатора.

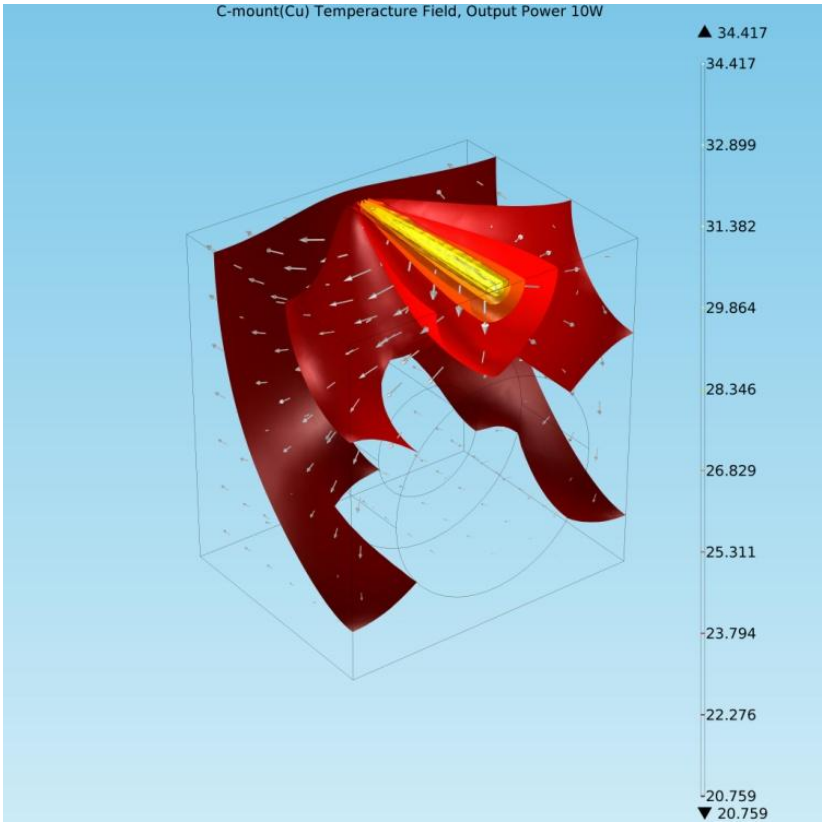


Рис.8 - Тепловые поля и изотермические поверхности в МОЛД, смонтированном на С-маунте, при тепловой нагрузке 10Вт

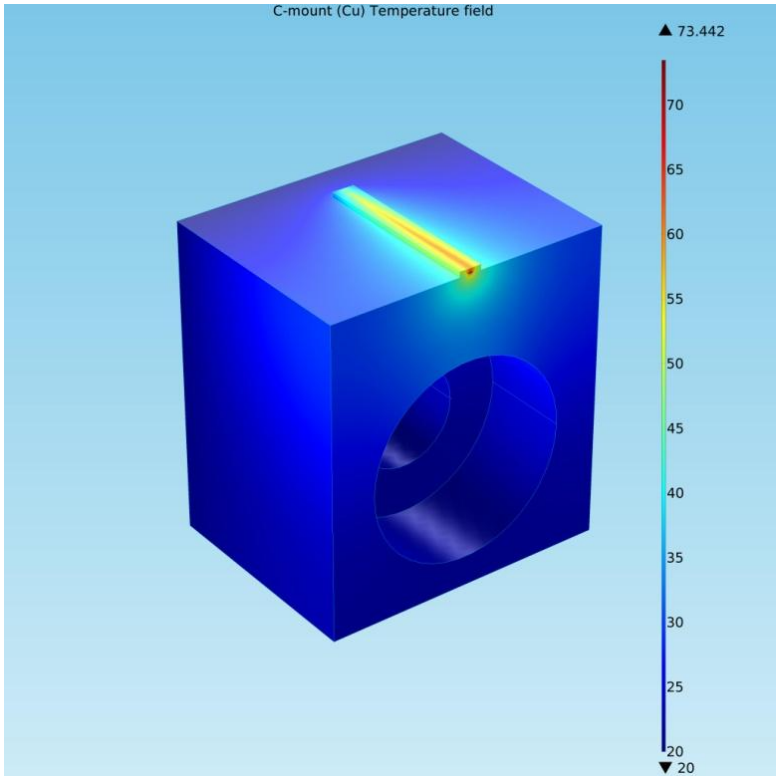


Рис. 9 - Температурное распределение в МОЛД, смонтированном на С-маунте, при тепловой нагрузке 35Вт

Результат моделирования для тепловой нагрузки 35 Вт дает картину распределения температуры по С-маунту, показанную на Рис. 9. Поскольку при различных уровнях тепловой нагрузки в 10 Вт и 35 Вт моделирование проводилось для случая постоянного источника тепла, т.е. стационарного случая, то ожидаемо общий характер распределения тепла по объему для обоих случаев практически идентичен.

В обоих случаях самое горячее место МОЛД – выходное зеркало, температура которого при тепловой нагрузке 35 Вт достигает 73,4˚С , а температура заднего зеркала находится в районе 40˚С. Такая высокая температура не приемлема для достижения высоких выходных параметров МОЛД, тем более для обеспечения его ресурсного режима работы в течение нескольких тысяч часов.

2.2.2. Модель МОЛД, смонтированного на теплоотводящий элемент типа F-маунт.

Как упоминалось ранее, в случае С-маунта термостабилизируемая плоскость и плоскость, содержащая источник тепла, взаимно ортогональны. Эта особенность затрудняет распространение потока тепла, делая его существенно неоднородным.

Результаты моделирования для МОЛД смонтированного на F-маунте показывают, что такой вариант конструкции в значительной степени лишён указанного недостатка. Конструкция F- маунта намного более удачная по сравнению с С-маунтом для задачи охлаждения МОЛД, так как позволяет теплу равномерным потоком следовать к базовой теплоотводящей поверхности. Очевидно, что снижение температуры активной области может быть достигнуто, если тепловой поток от источника тепла распространяется к теплоотводящей поверхности по пути минимальной длины. Такая конструкция теплоотводящего элемента с более однородным тепловым потоком, как видно на Рис. 10, позволяет снизить, по сравнению с С-маунтом, температуру выходного зеркала при тепловой нагрузке 10 Вт с 35,3˚С до 33,2˚С, выигрыш составляет 2,1˚С.

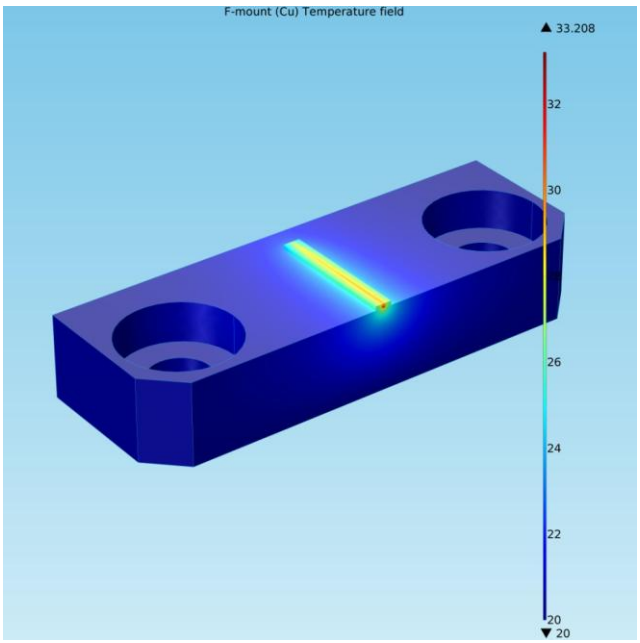


Рис. 10. Температурное распределение в МОЛД смонтированном на F-маунте, при тепловой нагрузке 10 Вт

Рис.11 показывает насколько изотермические поверхности в F-маунте, более плавные и менее искривлены, по сравнению с С-маунтом (Рис.8). Выходное зеркало при монтаже на F-маунт по-прежнему продолжает оставаться самой горячей областью МОЛД, существенно изменить характер распределения температур по длине резонатора при тепловой нагрузке 10 Вт монтаж на F-маунт обеспечить не может.

Причина заключается в том, что перепад температур по длине резонатора и температура выходного зеркала в большей степени определяются геометрией вывода излучения из лазерного кристалла при торцевом выводе излучения, т.к. выходное зеркало принципиально должно находиться на краю теплоотводящего элемента в частности вследствие небольшой глубины залегания p-n перехода от поверхности лазерного кристалла.

Сдвиг лазерного кристалла вглубь ТОЭ для снижения температуры выходного зеркала не приемлем, т.к. приведёт к т.н. «виньетированию» при выводе излучения из ЛД, а искажение диаграммы направленности в большинстве практических применений недопустимо.

Кроме того, неизбежное образование технологического «валика припоя» перед выходным зеркалом в указанном случае может привести к короткому замыканию и электрическому пробою на выходном зеркале резонатора.

Существуют конструкции ТОЭ со скошенной передней гранью, но ощутимый вклад они не дают. При этом возникают сложности в технологии изготовления таких ТОЭ, их металлизации, монтажа на них лазерных чипов и микрооптики, в частности FAC – цилиндрических линз для коллимации излучения по «быстрой» оси. Вследствие этого, такие конструкции в промышленных образцах до сих пор широко не используются.

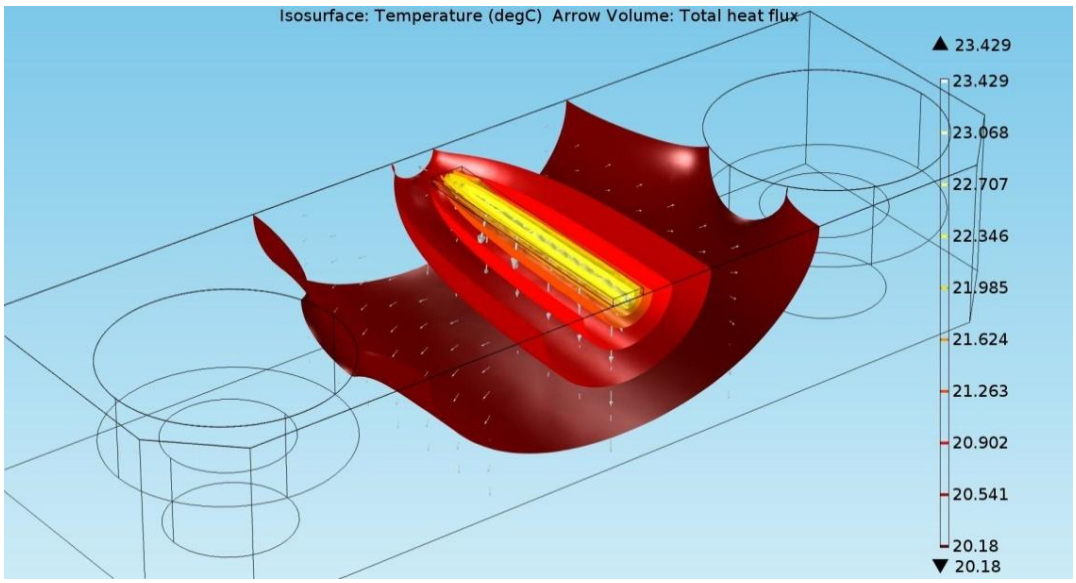


Рис.11 - Тепловые поля и изотермические поверхности в МОЛД, смонтированном на F-маунте, при тепловой нагрузке 10Вт

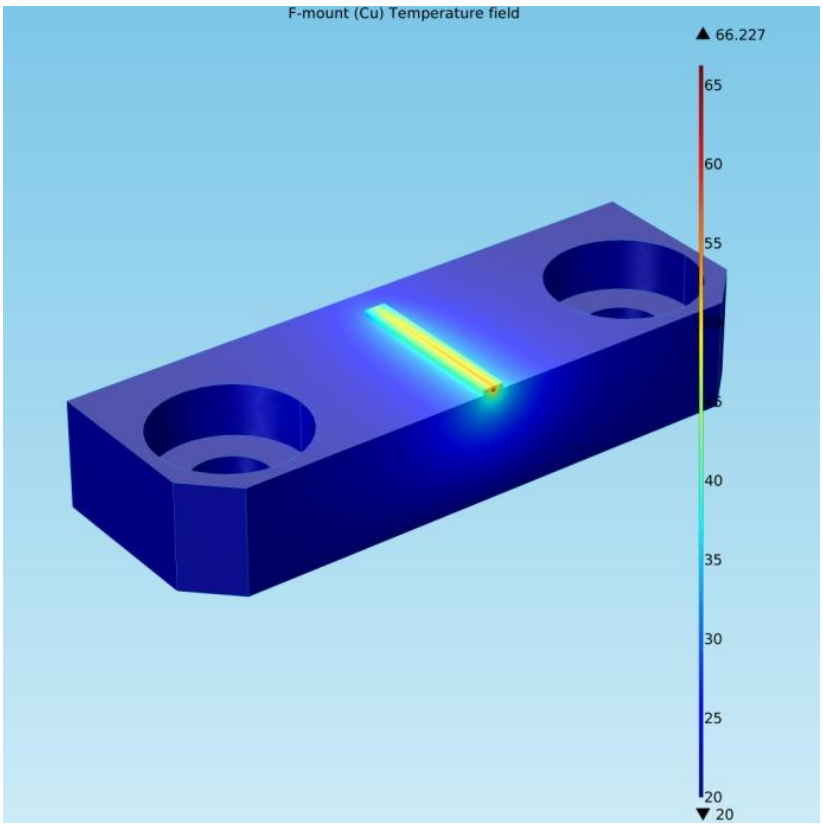


Рис. 12 - Температурное распределение в МОЛД, смонтированном на F-маунте, при тепловой нагрузке 35Вт.

Преимущества F- маунтов по - сравнению с С-маунтами в большей степени становятся очевидными при увеличении тепловой нагрузки.

Увеличив в модели МОЛД на F-маунте тепловую нагрузку до 35 Вт, получаем температуру выходного зеркала 66,2˚С, при этом расчёт для С-маунта даёт температуру выходного зеркала в 73 ˚С.

Интересно построить зависимость температур зеркал и температуры активной области МОЛД от тепловой нагрузки для С-маунта и F-маунта. Поскольку С-маунт имеет конструктивные недостатки, мешающие эффективному отводу тепла, целесообразно ограничиться для него предельной тепловой нагрузкой до 25 Вт.

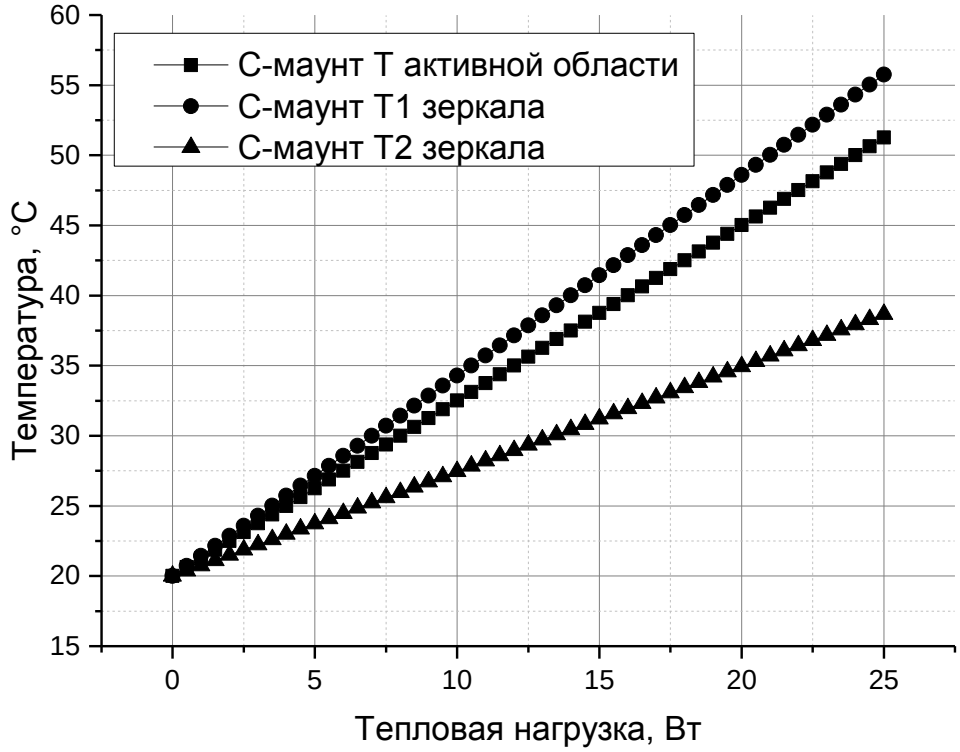


Рис. 13 - Зависимость температуры активной области, температур переднего выходного зеркала (Т1), заднего глухого зеркала (Т2) от тепловой нагрузки, для МОЛД, смонтированного на теплоотводящий элемент типа С-маунт.

Отложим на графике, приведённом на Рис. 13, зависимость средней по длине резонатора температуры активной области, а также температуры переднего выходного зеркала (Т1) и заднего глухого зеркала (Т2) от тепловой нагрузки. Приведенные результаты расчёта (наклон зависимостей) показывают насколько изменяется скорость роста температуры с увеличением тепловой нагрузки. Как уже отмечалось, приведённые расчётные значения этих трёх температур в значительной степени определяет выходные параметры и ресурс МОЛД. Попробуем на основе полученных результатов сформулировать основные эмпирические критерии для обеспечения ресурсного режима работы МОЛД.

Эмпирические критерии ресурсного режима работы МОЛД.

Для оценки результатов полученных с помощью расчётной модели прибегнем к поиску эмпирических критериев. Указанные критерии были выработаны при исследовании и сравнении полученных параметров на значительном количестве экспериментальных образцов МОЛД в ходе измерений ватт-амперных характеристик, их температурных зависимостей, а также ресурсных испытаний и измерений предельных параметров МОЛД до момента КОД зеркал или деградации по механизму электрического пробоя.

Анализ расчётных и экспериментальных результатов, выработка эмпирических критериев ресурсного режима.

Средняя температура активной области, а также перепад температуры активной области по длине резонатора МОЛД определяют уширение спектра излучения, смещение максимума спектра излучения в длинноволновую область, оказывают значительное влияние на к.п.д., выходную мощность и максимальную ресурсную мощность МОЛД.

На Рис. 14, 15 приведены экспериментальные кривые ВтАХ демонстрирующие снижение эффективности и КПД с ростом температуры для МОЛД на длине волны 970нм.

Анализ полученных результатов для МОЛД на длине волны генерации 970нм, позволяет сформулировать следующие эмпирические критерии

ресурсного режима работы, представленные в порядке относительной значимости и экспериментально подтверждённой достоверности.

Критерий 1. Для надёжной ресурсной работы МОЛД увеличение средней по длине резонатора температуры активной области не должно превышать 20 - 25˚С над базовой температурой теплоотводящей грани ТОЭ в 20˚С.

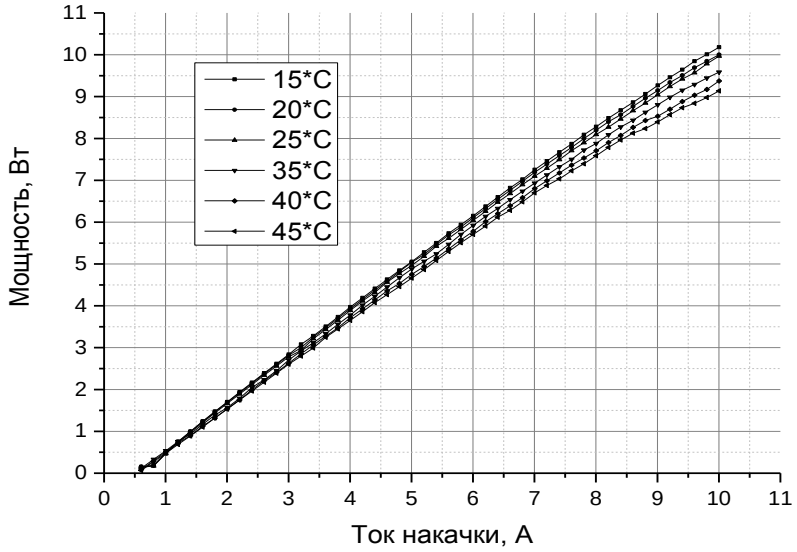


Рис. 14. Зависимости экспериментальных ВтАХ при увеличении температуры термостабилизированной грани ТОЭ в диапазоне 15-45 º С.

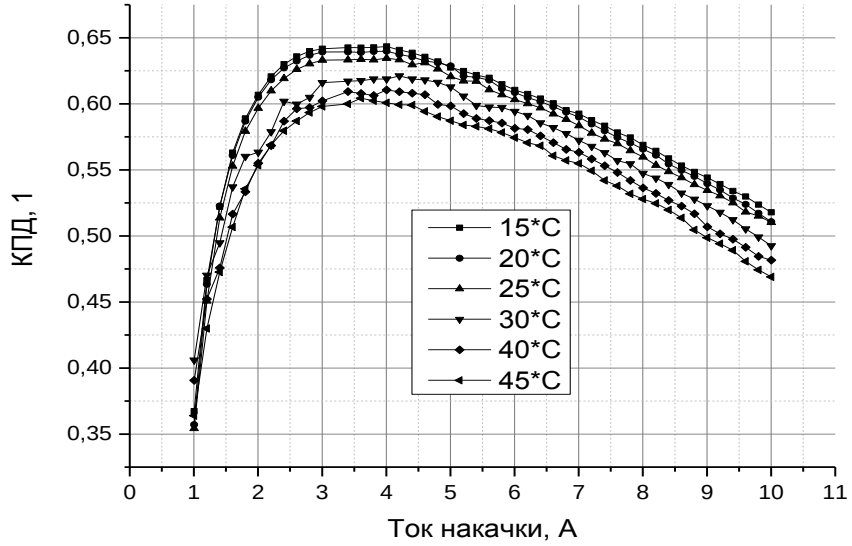


Рис.15 – Зависимость экспериментально измеренного полного КПД при увеличении температуры термостабилизированной грани ТОЭ.

Деградация МОЛД может происходить либо по механизму КОД, либо по механизму объёмной деградации материала гетероструктуры.

Температура выходного зеркала (T1) может служить индикатором, показывающим запас устойчивости МОЛД к деградации по механизму КОД. Проведённые нами исследования значительного числа деградировавших образцов МОЛД показывают, что одним из механизмов начала развития КОД является наблюдавшееся экспериментально размягчение и расплавление припоя в зоне под выходным зеркалом резонатора, в отдельных случаях перед началом КОД наблюдалось «закипание» припоя под выходным зеркалом и его «выплёскивание» в виде капель на зеркало резонатора. Для обеспечения ресурсной работы МОЛД определённой конструкции и предотвращения деградации МОЛД по причине КОД целесообразно моделировать и контролировать температуру выходного зеркала. Необходимо уточнить, что использованные нами современные чипы МОЛД имели высококачественные покрытия зеркал изготовленные с применением методов пассивации поверхности. Для таких МОЛД можно сформулировать следующий критерий.

Критерий 2. Ресурсную, непрерывную работу в течение нескольких тысяч часов и стабильность выходных параметров в режиме высокой мощности, возможно обеспечить при максимальном повышении температуры выходного зеркала на 40 ˚С относительно температуры базовой термостабилизированной грани в 20 ˚С.

При этом следует учитывать, что при наличии загрязнения или неоднородностей любого характера на выходном зеркале лазерного диода, а также в зоне теплового контакта лазерного чипа с теплоотводящим элементом под выходным зеркалом резонатора, указанные выше эмпирические критерии не актуальны. Наличие дефектов может приводить к снижению порога КОД в несколько раз. Вследствие этого, при отборе потенциально надёжных образцов для проведения тренировочных и

натурных ресурсных испытаний указанные выше МОЛД с дефектами необходимо отбраковать.

Как показывают экспериментальные данные, наличие пылинок, ступенек на сколотых зеркалах, следов загрязнений органическими соединениями и других типов дефектов на выходном зеркале в зоне выхода излучения, может приводить к КОД при сравнительно небольших уровнях выходной мощности, в несколько раз ниже номинальных значений в ресурсном режиме.

Температура глухого зеркала (T2) менее важна, чем рассмотренные выше параметры, в то же время величина перепада температур между выходным и глухим зеркалами определяет величину дополнительных термоупругих напряжений, возникающих при работе МОЛД. Этот механизм может оказывать влияние на развитие и подвижность встроенных в лазерный чип дефектов, ответственных за ресурс МОЛД, ускоряя деградацию, как по механизму КОД, так и по механизму объёмной деградации. Приводимая нами оценка допустимого перепада температур по длине резонатора является предварительной и довольно грубой, т.к. исследования по экспериментальному изучению и моделированию термоупругих напряжений пока находятся в начальной стадии, кроме того следует уточнить, что критерий касается МОЛД изготовленных нами на основе высококачественных чипов ЛД с высокой эффективностью и высоким полным к.п.д.

Критерий 3. Без использования термокомпенсаторов, допустимый перепад температур не должен превышать 3-4˚С/мм. К примеру, для 4мм резонатора полный перепад по длине кристалла не должен превышать 12 - 16˚С.

Следует ещё раз подчеркнуть, что необходимо принимать во внимание неизбежные отклонения параметров техпроцессов, вызванных окислением поверхностей или образованием пустот в слое припоя, которые могут приводить к возникновению дополнительных тепловых барьеров между

слоем припоя и чипом при монтаже МОЛД вследствие неконтролируемых отклонений даже при самом прецизионном проведение монтажа кристалла.

Наши результаты показывают, что в большинстве случаев значительные отклонения параметров выявляются на этапах предварительных измерений перед ресурсными испытаниями, одним из эффективных методов является кратковременная наработка в режиме 2-х кратного превышения номинальной ресурсной мощности, после чего потенциально ненадёжные образцы можно отбраковать.

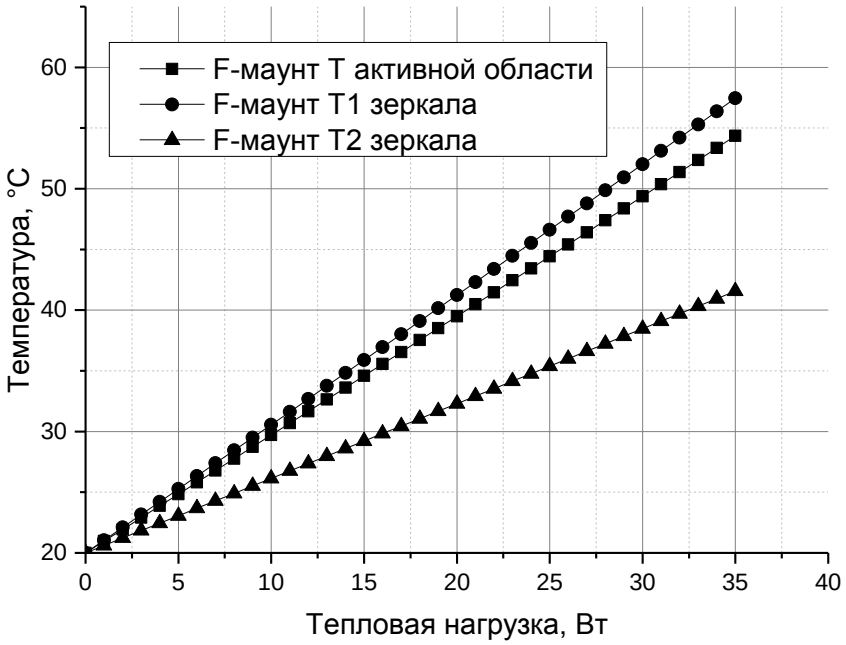


Рис. 16 - Зависимость температуры активной области, переднего выходного зеркала (Т1), заднего глухого зеркала (Т2) от тепловой нагрузки, для МОЛД, смонтированного на теплоотводящий элемент типа F-маунт.

Фактически, результаты моделирования в сочетании с результатами тренировочных и ресурсных испытаний позволили проанализировать величины трёх характерных температур МОЛД и сформулировать эмпирические критерии ресурсного режима работы.

Как видно из Рис. 16, рост рассчитанных трёх температур для F-маунта от нагрузки, тоже имеет линейный характер, как и следовало ожидать.

Скорость роста температуры с нагрузкой ниже, чем для С-маунта, что тоже ожидаемо. Проведем сравнительный анализ температур различных конструкций ТОЭ.

Для сравнения двух типов МОЛД, смонтированных на С-маунте и F-маунте, приведём таблицу трёх основных температур при разных тепловых нагрузках.

Таблица 3. Основные температуры МОЛД полученные моделированием.

Тип ТОЭ, тепловая нагрузка	Средняя температура активной области	Температура выходного зеркала	Перепад температур по длине резонатора
С-маунт, 10Вт	32,5˚С	35˚С	7,5˚С
С-маунт, 25Вт	52˚С	56˚С	17
F- маунт, 25Вт	45˚С	46˚С	11
F- маунт, 35Вт	55˚С	57,5˚С	17

Приведённые расчётные значения температур являются минимальными, это нижняя граница для реальных температур, т.е. эти цифры показывают предел охлаждающей способности ТОЭ. На практике значения этих температур могут быть существенно выше т.к. модель не учитывает дефекты сборки МОЛД. В модели все слои конструкции МОЛД принимаются как идеально однородные, а контакт между слоями из различных материалов тоже рассматривается как идеальный, без дефектов, пустот и пор.

Анализируем данные из таблицы 1. Анализ по критерию 1 (средняя температура активной области) С-маунт при 10 Вт тепловой нагрузки, что соответствует 10 Вт оптической мощности, при к.п.д. 50% - условия работы вполне приемлемые. Перегрев активной области над температурой термостабилизированной грани 20˚С - не более 13˚С. Максимум спектра смещается в длинноволновую область не более чем на 4нм. По первому критерию при таком режиме работы можно с запасом обеспечить ресурс, поскольку перегрев активной области менее 25˚С. Выходное зеркало уверенно функционирует при 35˚С – критерий 2 также выполняется с

запасом. Перепад температур на длине резонатора 4мм между зеркалами 7,5˚С – критерий 3 также удовлетворяется с запасом.

Рассмотрим возможность увеличения ресурсной мощности на С-маунте при 25 Вт тепловой нагрузки. По значениям температуры полученным из результатов моделирования видно, что режим работы при 25 Вт тепловой нагрузки, даже в теоретическом пределе выходит за рамки необходимых критериев. Температура активной области повышается более чем на 32˚С, и равна 52˚С, при предельно допустимой 45˚С. Главный критерий ресурсной работы не удовлетворён. Температура выходного зеркала с трудом выписывается в критерий 2, не доходя до 60˚С всего 4˚С. Критерий 3 – перепад температур под длине резонатора более 4мм/˚С. Невыполнение главного критерия свидетельствует о том, что обеспечить ресурсную работу лазера при такой тепловой нагрузке при монтаже на С-маунт невозможно, тем более если учесть поправки на практическую реализацию. Именно поэтому С-маунт обычно не используют в качестве ТОЭ для МОЛД мощностью более 10 Вт непрерывной мощности, что является косвенным подтверждением адекватности полученных нами результатов моделирования.

Теперь мы рассмотрим, как ведёт себя МОЛД, смонтированный на ТОЭ типа F-маунт.

Рассмотрим F-маунт при нагрузке 25 Вт. Напомним, что С-маунт, без сабмаунтов, никак не может обеспечить ресурсную работу при такой нагрузке, даже при идеальном исполнении монтажа лазерного кристалла. Итак, F-маунт при 25 Вт тепловой нагрузки, перегрев активной области 25˚С – верхний предел критерия 1. Температура выходного зеркала 46˚С, критерий 2 выполнен. Перепад температуры по длине резонатора 2,75˚С/мм, при предельном значении критерия 4˚С/мм – критерий 3 удовлетворён.

Напомним, что исходя из зависимости к.п.д. от уровня накачки, 25 Вт тепловой мощности соответствуют 20 Вт выходной оптической мощности, при рассчитанном к.п.д. лазера с длиной резонатора 4мм, примерно 0,45. Учитывая поправку на практическую реализацию, и то, что в модель даёт

верхний предел критерия 1, прогнозируемо МОЛД на ТОЭ типа F-маунт, может иметь ресурсный режим работы 15-17 Вт непрерывной выходной мощности излучения при использовании идентичных чипов МОЛД. Напрашивается экспериментальная проверка этого принципиального расчётного результата.

Рассмотрим МОЛД на F-маунте при тепловой нагрузке 35 Вт. Результаты расчётов показывают, что, казалось бы, небольшое изменение в конструкции, без изменения параметров материалов и размеров элементов конструкции, может дать существенный выигрыш в вопросе охлаждения активной области МОЛД. Заметим, что полученные результаты актуальны и для других типов электронных и оптоэлектронных приборов с высоким уровнем тепловыделения.

Введём и проанализируем для наглядности новый параметр – скорость роста температуры активной области в зависимости от тепловой нагрузки для двух типов ТОЭ. Этот параметр имеет размерность теплового сопротивления.

В отличие от теплового сопротивления, определяемого экспериментально по тепловому сдвигу максимума спектра излучения с ростом тепловой нагрузки, в нашем расчётном случае этот параметр позволяет определить скорости возрастания трёх наиболее важных для МОЛД температур в активной области – усреднённой по длине резонатора температуры, а также температуры выходного и глухого зеркал. Начальное условия 20˚С, поэтому для случая С-манто при 25 Вт тепловой нагрузки и средней температуре активной области 52˚С, этот параметр равен 1,28˚С/Вт. Для F-маунта этот параметр равен 1˚С/Вт, на 28% меньше чем для МОЛД на С-маунте.

Данные из таблицы 1, для случая F-маунта при тепловой нагрузке в 35 Вт, свидетельствуют о том что все три критерия не удовлетворяются. Случай практически полностью аналогичный МОЛД, смонтированному на С-маунт при тепловой нагрузке 25 Вт, поскольку расчётные температуры активной области и зеркал близки. А тепловая нагрузка вместе с тем на С-маунте и F-маунте отличается на целых 10 Вт, т.е. увеличена на 40%. Повышение

эффективности охлаждения на F- маунте может быть достигнуто только лишь изменениями в конструкции ТОЭ МОЛД.

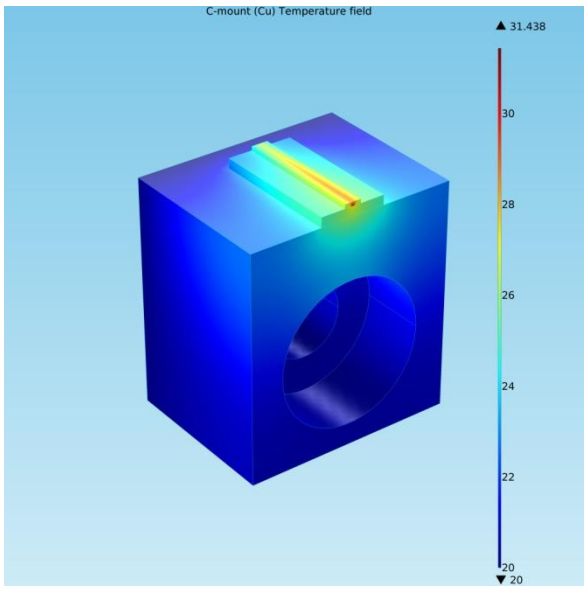
2.3. Результаты расчетов при использовании сабмаунтов

2.3.1. Моделирование МОЛД с ТОЭ включающим сабмаунты с высокой теплопроводностью при монтаже на базовые ТОЭ типа С-маунт и F-маунт.

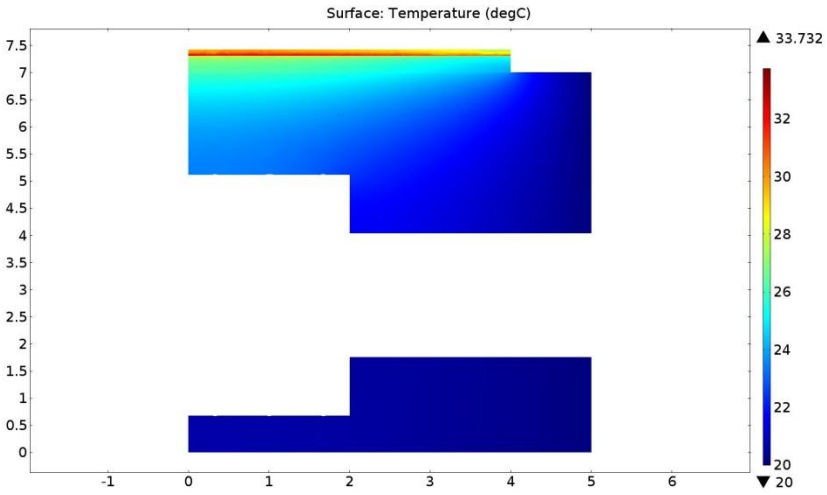
Данная часть работы посвящена моделированию тепловых полей в МОЛД, смонтированных на ТОЭ двух типов с использованием сабмаунтов различной теплопроводности от 100 до 2400 Вт/м•˚К. Диапазон рассмотренных при моделировании значений теплопроводности соответствует различным материалам сабмаунтов, от керамических типа BeO и AlN и металлических композитов CuW и CuMo, до композитных материалов на основе алмаза и синтетических поли и монокристаллических алмазов.

В расчёте использованы геометрические размеры применявшихся нами С-маунтов, 6,4x5x5мм в расчетах толщина материал С-маунта – медь с теплопроводностью 400 Вт/м•К

В постановке задачи существенно ничего не меняется, лишь добавляется новый конструктивный элемент – сабмаунт. Это немного усложняет вычисления для ЭВМ, поскольку добавляется новый элемент, шаг сетки разбиения в котором должен быть достаточно мелким, чтобы получить достоверные данные. Различные материалы сабмаунта моделируются заданием различных теплопроводностей. Рассмотрим, как и ранее, случай МОЛД с длиной резонатора лазера 4мм и шириной излучающего полоска 100мкм на длине волны 970нм.



а)



б)

Рис. 17. Температурное распределение в МОЛД, смонтированном на С-маунте+Сабмаунт (1200) (а), при тепловой нагрузке 10Вт. Внизу (б) сечение по плоскости, перпендикулярной p-n переходу, вдоль длины полоска.

На Рис. 17 показано распределение тепла в МОЛД смонтированном на С-маунте, с использованием сабмаунта с теплопроводностью 1200 Вт/м•˚К (теплопроводность высококачественного синтетического, поликристаллического plasma-CVD алмаза) с геометрическими размерами 4x2x0,3мм, тепловая нагрузка 10 Вт. Выходное зеркало, в стационарном режиме работы лазера будет иметь температуру 31,4˚С при тепловой нагрузке 10 Вт. Полосок активной области, в данной модели, прогрет более

однородно, по - сравнению со случаем без использования сабмаунта. Более равномерным нагревом активной области, по сравнению с МОЛД на С-маунте, обеспечивается больший ресурс МОЛД в силу снижения термоупругих напряжений по длине резонатора.

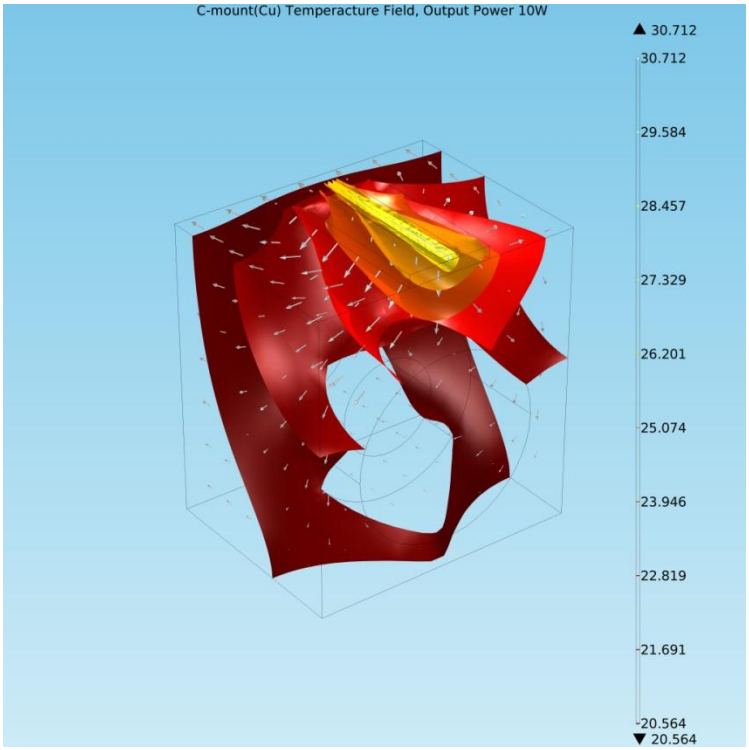


Рис. 18 - Тепловые поля и изотермические поверхности в МОЛД, смонтированном на С-маунте+Сабмаунт (1200), при тепловой нагрузке 10Вт.

Неравномерность нагрева снижена введением сабмаунта, при этом изотермические поверхности стали менее искривлёнными, хотя и остаются весьма изогнутыми, особенно если рассмотреть тепловую модель конструкцию при большем увеличении.

Как видно на Рис.18, изотермы под лазерным чипом, смонтированным на сабмаунте (1200), имеют менее крутой изгиб, по сравнению с изотермами на МОЛД смонтированном без сабмаунта, непосредственно на медь, что является свидетельством большей однородности отводимого теплового потока.

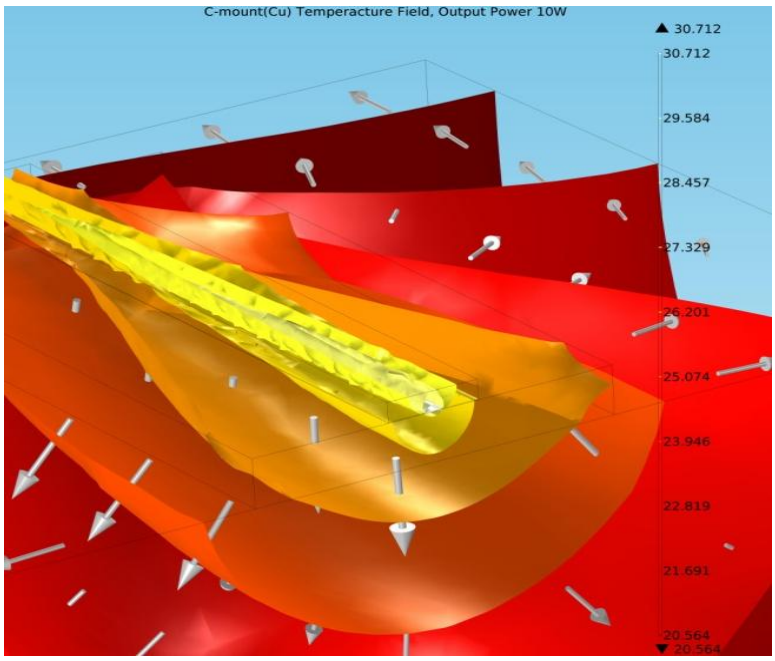
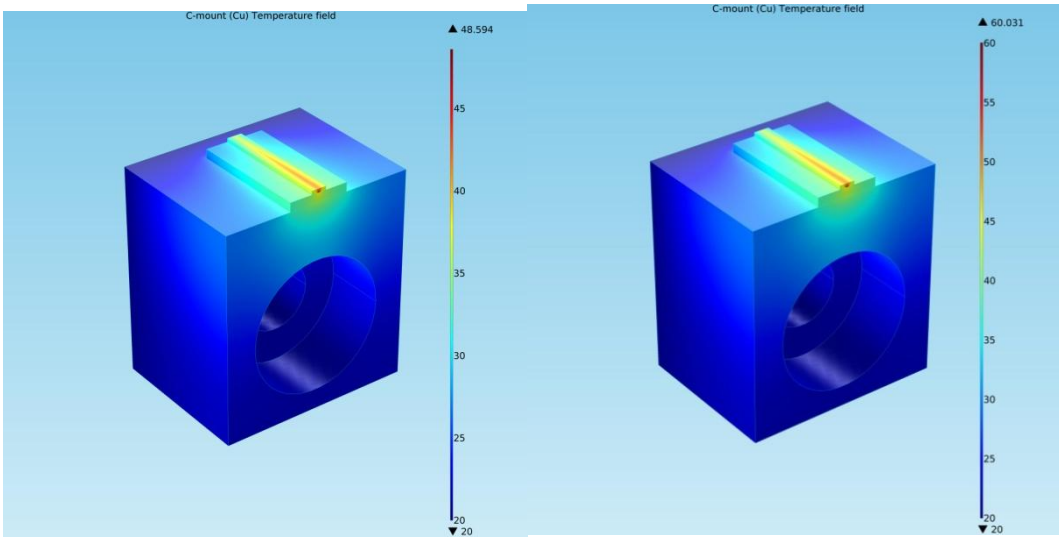


Рис. 19 - Тепловые поля и изотермические поверхности в МОЛД, смонтированном на С-маунте+Сабмаунт (1200), при тепловой нагрузке 10Вт (увеличенное изображение со стороны выходного зеркала диода).

Все основные температуры: зеркал и средняя температура активной области снижены. Снижение температур незначительно, но учтём, что тепловая нагрузка 10 Вт. Эффект применения сабмаунта проявляется намного ярче при более высоких тепловых нагрузках.



а) б)

Рис. 20 - Результат моделирования для МОЛД смонтированных на С-маунт+сабмаунт (1200), для тепловой нагрузки (а) 25 Вт, (б) 35 Вт.

На Рис. 20 а) и б) представлены результаты для более высоких уровней тепловой нагрузки. Результаты моделирования показывают, что случай нагрузки в 35 Вт для С-маунта, даже с сабмаунтом (1200) запредельный для ресурсного режима работы, однако для случая с тепловой нагрузкой 25 Вт – конструкция и параметры МОЛД на С-маунте с сабмаунтом принципиально способны удовлетворить критериям ресурсного режима работы.

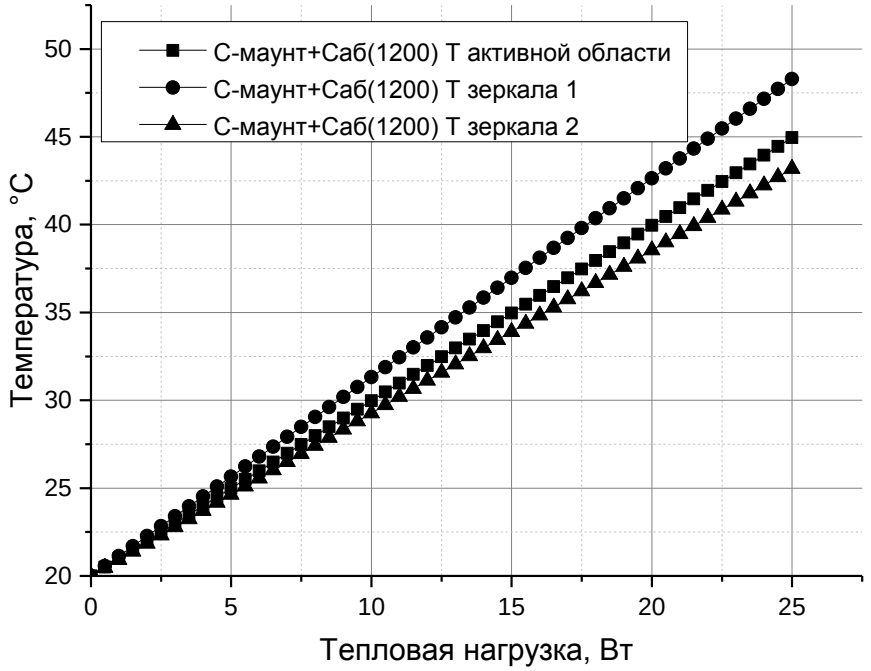


Рис. 21 - Зависимости температуры активной области, переднего выходного зеркала (Т1), заднего глухого зеркала (Т2) от тепловой нагрузки для МОЛД, смонтированного на теплоотводящий элемент типа С-маунт с использованием сабмаунта (1200)- с теплопроводностью 1200 Вт/м К.

Построим графики для сравнения основных температур для МОЛД на С-маунте с использованием сабмаунта имеющего теплопроводность 1200 Вт/м•˚К (Рис.21). Наблюдается не только снижение температуры, при использовании сабмаунта, но также графики имеют более близкие углы наклона, зависимости расположены более кучно, т.е. все три основные

температуры сближаются. Разница также в том, что при использовании сабмаунта с высокой теплопроводностью, температура активной области тяготеет к температуре заднего зеркала, а не к температуре переднего зеркала, как в случае без использования сабмаунта. При такой кучности зависимостей температур от тепловой нагрузки, обеспеченных сабмаунтом с высокой теплопроводностью, значительно сокращается перепад температур по длине резонатора.

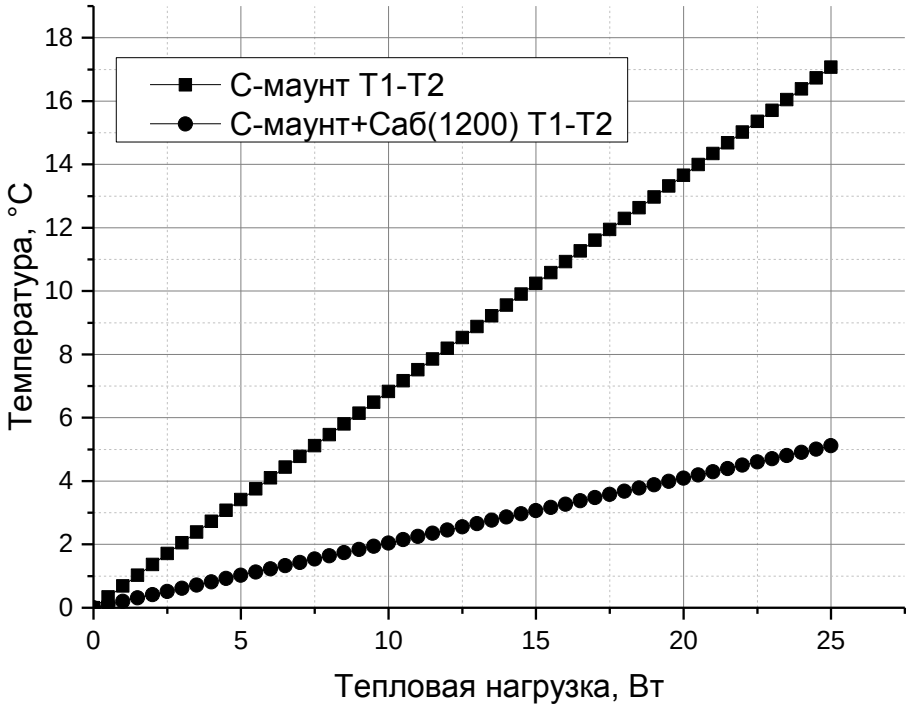
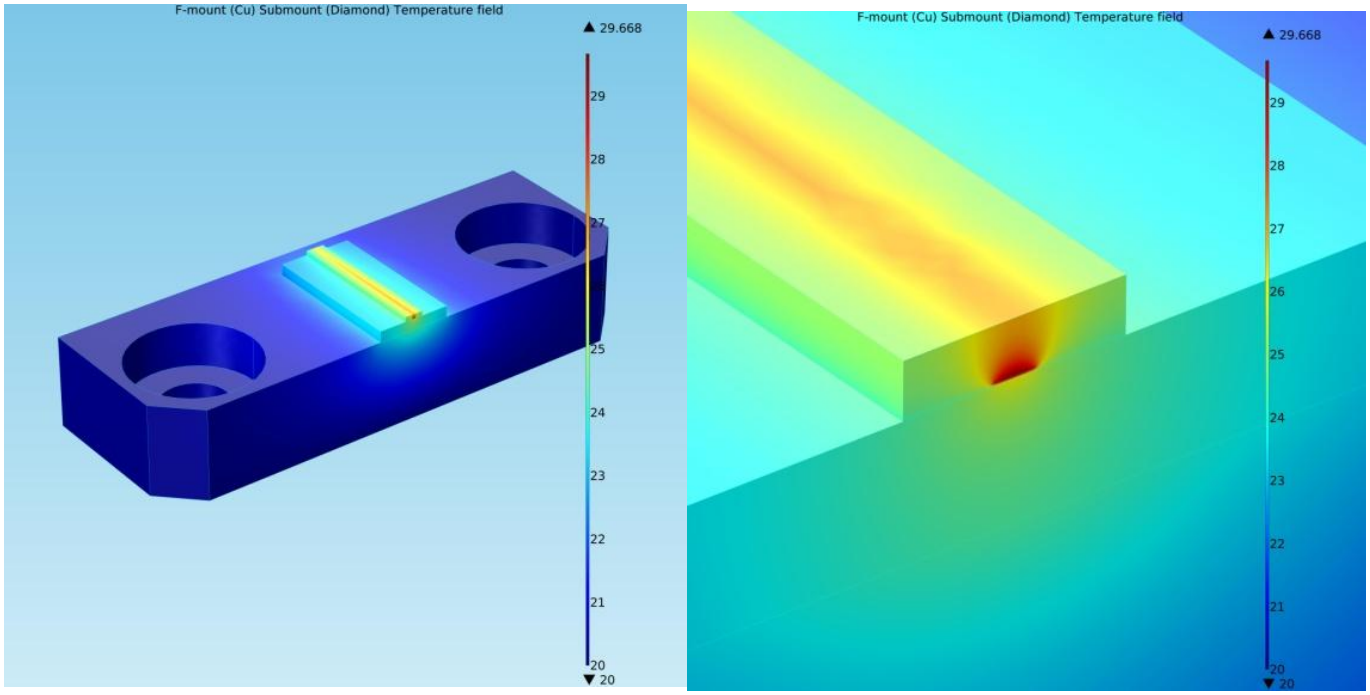


Рис. 22 - Зависимость перепада температур по длине резонатора, между передним – выходным (Т1) и задним – глухим (Т2) зеркалами, от тепловой нагрузки для двух случаев МОЛД, смонтированных на С-маунт, без и с использованием сабмаунта с теплопроводностью 1200 Вт/м•˚К.

Рассмотрим два графика перепада температур по длине полоска, от тепловой нагрузки. Для МОЛД, смонтированного на медный теплоотвод, наклон графика – скорость роста перепада температур между зеркалами с увеличением тепловой нагрузки составляет 0,68˚С/Вт, а при использовании сабмаунта снижается до 0,2˚С/Вт, т.е. уменьшается в 3,5 раза.

Перейдём к рассмотрению случая модели МОЛД на основе F-маунта, затем сравним его с С-маунтом. В модели с использованием сабмаунта, F-маунт ещё в более полной мере имеет возможность реализовать свои преимущества. Все три основных компонента конструкции: тепловыделяющий полосок, сабмаунт и F-маунт лежат в параллельных плоскостях, нет помех в виде отверстий, они находятся на периферии базового ТОЭ.

Геометрия F-маунта соответствует стандартной конструкции, толщина составляет 2.5мм, длина и ширина 14 х 5мм, материал F-маунта – медь с теплопроводностью 400 Вт/м•˚К.



а) б)

Рис. 23 - Общий вид (а) и (б) вид выходного зеркала. Температурное распределение в МОЛД, смонтированном на F-маунте, при тепловой нагрузке 10 Вт

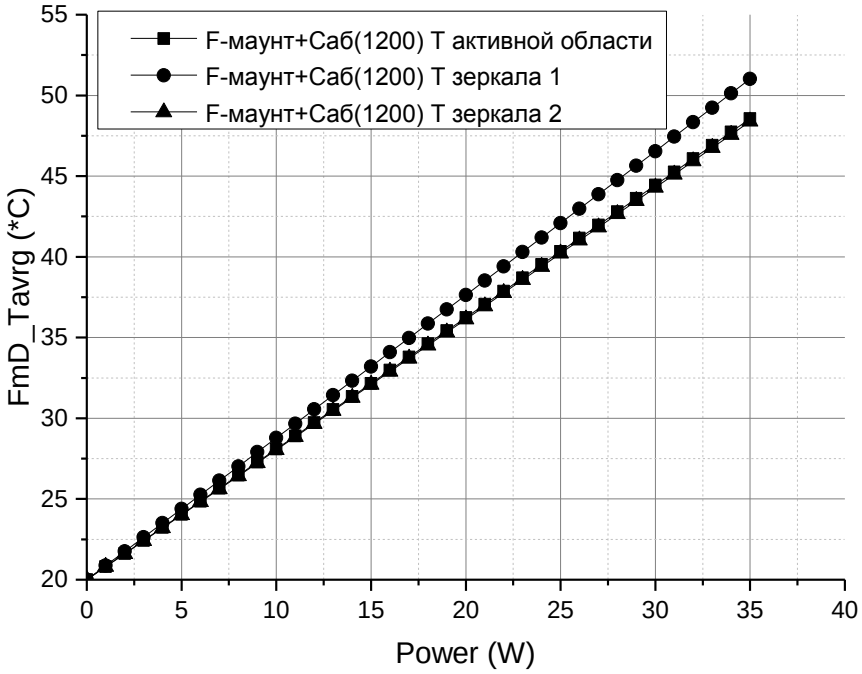


Рис. 24 - Зависимость температуры активной области, переднего выходного зеркала (T1), заднего глухого зеркала (T2) от тепловой нагрузки для МОЛД, смонтированного на теплоотводящий элемент типа F-маунт с использованием Сабмаунта (1200) - с теплопроводностью 1200 Вт/м К.

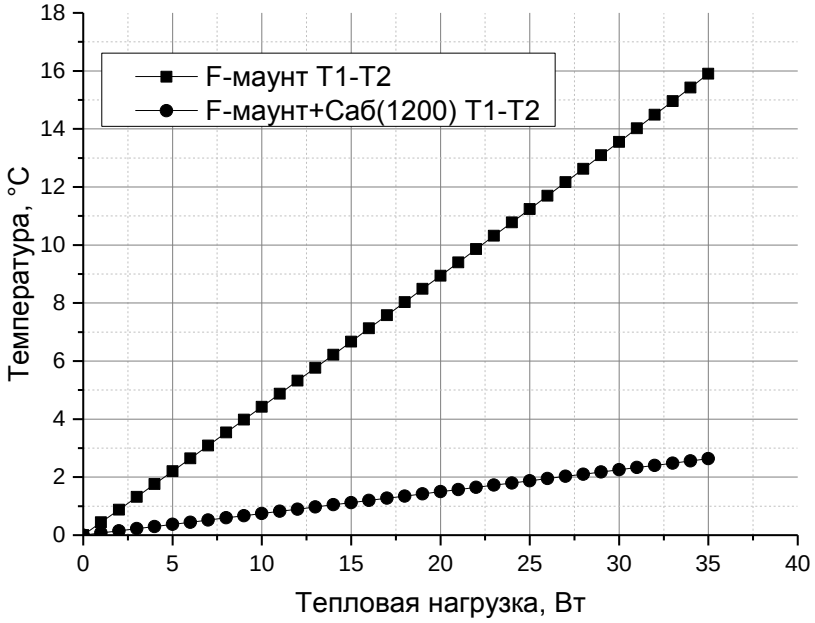


Рис. 25 - Зависимость от тепловой нагрузки перепада температур выходного зеркала (T1) и глухого зеркала (T2) для МОЛД смонтированного на F-маунте без использования сабмаунта и с использованием сабмаунта имеющего теплопроводность 1200 Вт/м К.

Основные температуры для МОЛД смонтированного на F-маунте с использованием самбмаунта имеющего тепловодность 1200 Вт/м•˚К, ожидаемо даёт снижения уровня наклона графика в зависимости от тепловой нагрузки. В данном случае температура активной области ещё больше тяготеет к температуре заднего зеркала, практически сливаясь в одну линию, ещё более сокращается перепад температур по длине резонатора, он составляет не более 3˚С при 35 Вт тепловой нагрузки.

Скорость роста перепада температур по длине полоска, от тепловой нагрузки для МОЛД, смонтированного на F-маунте с использование сабмаунта может быть снижена до 0,09˚С/Вт!

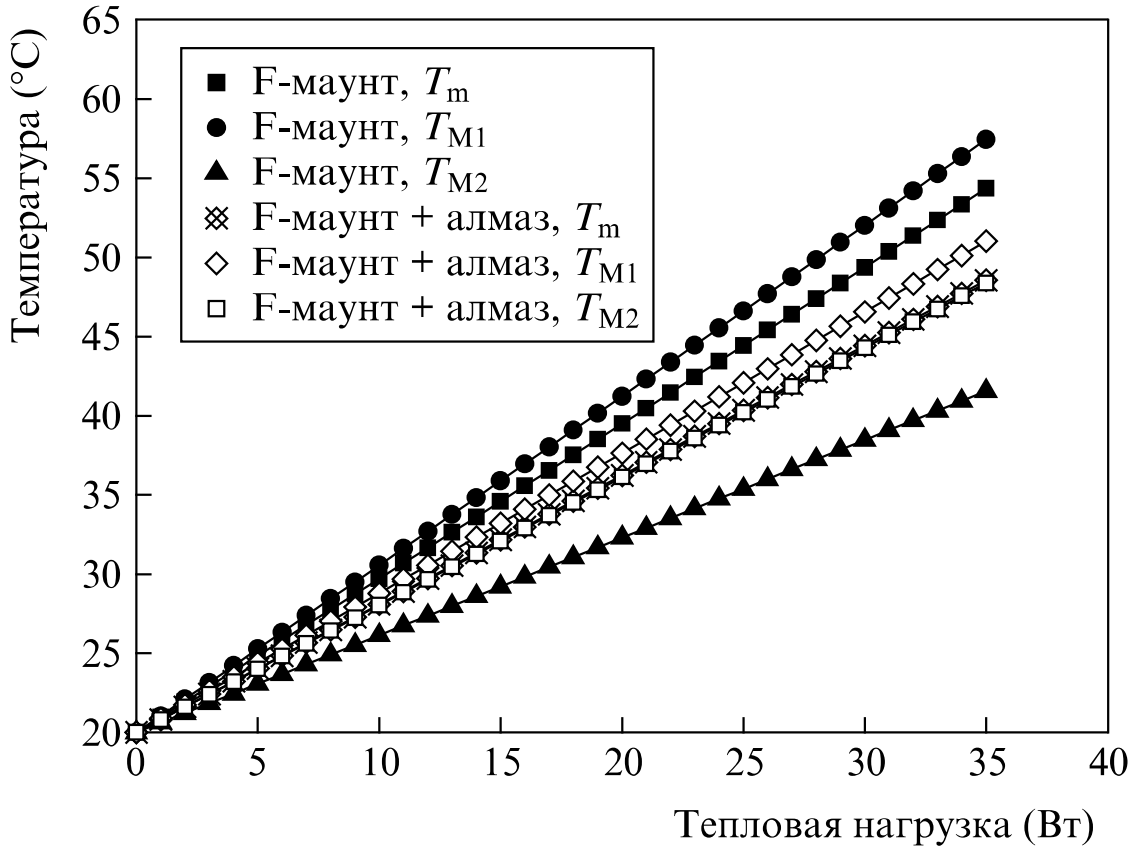


Рис. 26 - Расчетные зависимости температуры от тепловой нагрузки при монтаже кристаллов ЛД на F-маунт (Tm – средняя температура активной области по длине кристалла, TM1 и TM2 – температуры активной области на переднем выходном и заднем глухом зеркалах соответственно).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что F-маунт наиболее подходящий тип базового теплоотводящего элемента, особенно для использования сабмаунтов с высокой теплопроводностью. Поэтому остановимся на F-маунте подробнее.

На Рис. 26 приведены расчёты температур на выходном переднем зеркале, глухом заднем зеркале и средней температуры активного слоя по длине кристалла для базового теплоотводящего типа F - маунт в зависимости от тепловой нагрузки без сабмаунта и с сабмаунтом с теплопроводностью 1200 Вт/м•К. Размеры сабмаунта соответствуют использованным в эксперименте толщина 0.3мм, ширина 2мм, длина 4.2мм.

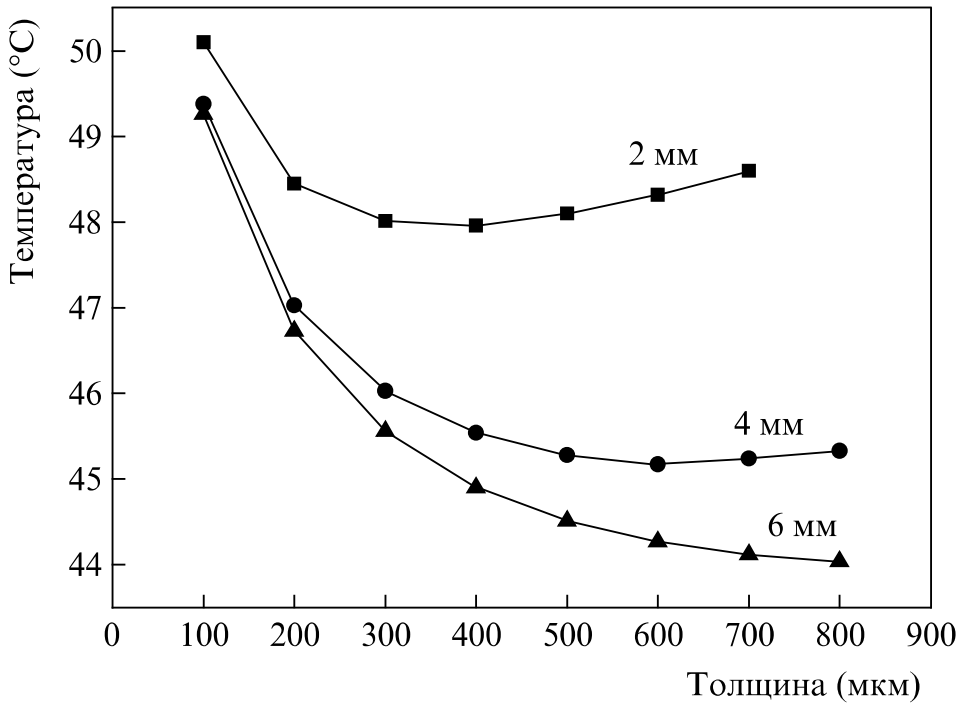


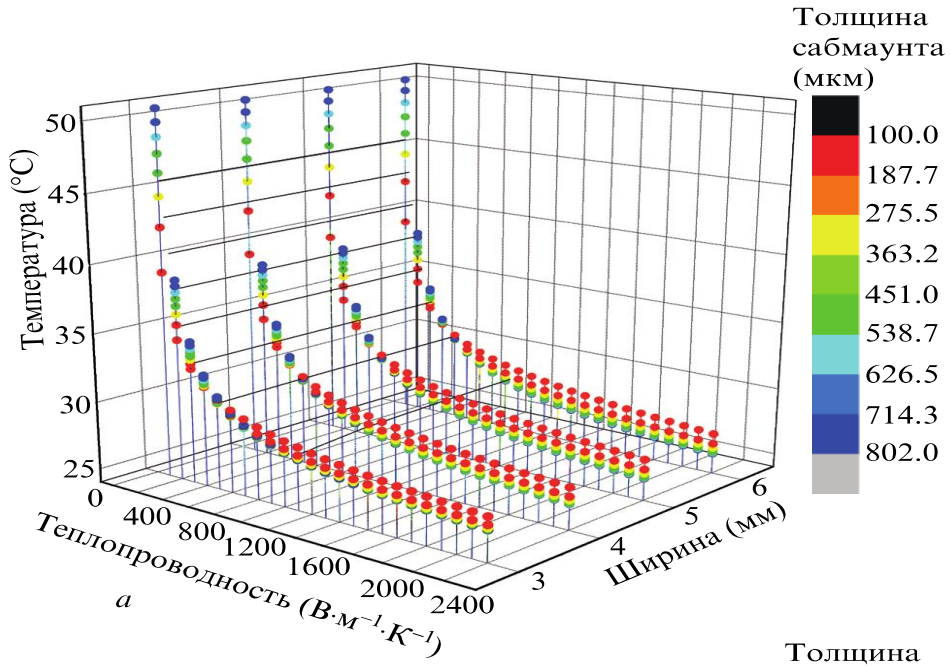
Рис. 27. Зависимости средней температуры активной области от толщины алмазного сабмаунта шириной 2, 4 и 6мм. Моделирование выполнено при тепловой нагрузке 35 Вт и теплопроводности сабмаунта 1200 Вт/мК.

При тепловой нагрузке 35 Вт, перепад температуры активной области по длине резонатора в отсутствие сабмаунта составляет 16.5 ºС и около 2.5 ºС при монтаже с использованием сабмаунта, средняя температура активной области без сабмаунта и с сабмаунтом соответственно 54 ºС и 48 ºС,

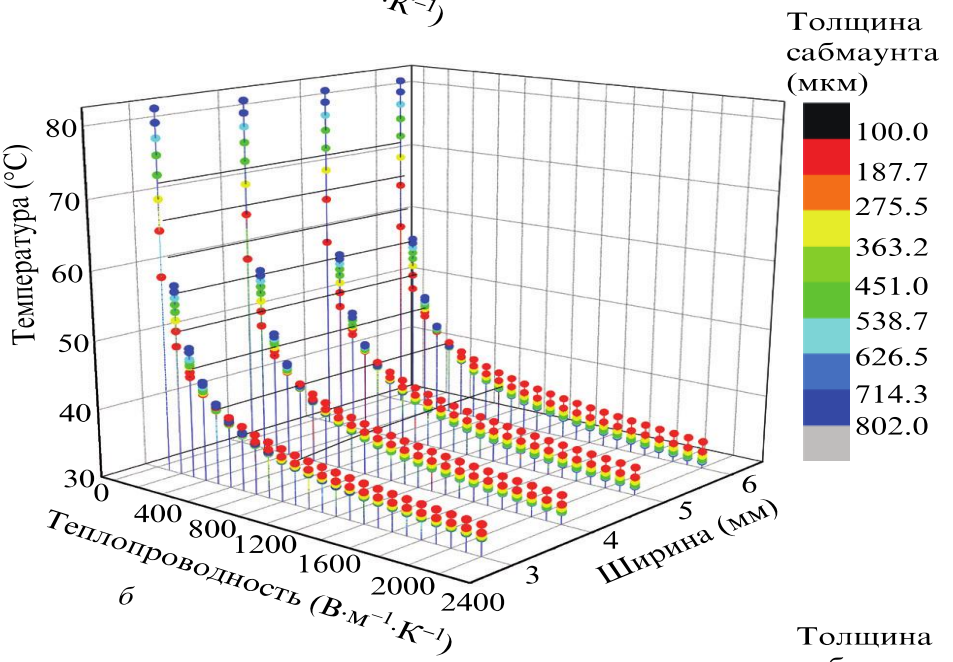
средняя температура ближе к температуре переднего зеркала при монтаже без сабмаунта, и ближе к температуре заднего зеркала при монтаже на сабмаунт. Как видно на примере использованного в эксперименте далеко не оптимального по параметрам сабмаунта, если его теплопроводность достаточно велика, то эффект отрицательной тепловой линзы компенсирует дополнительное тепловое сопротивление вносимое толщиной сабмаунта и его применение позволяет не только уменьшить абсолютное значение температуры активной области, но значительно снизить перепад температур по длине кристалла, что должно положительно повлиять на уровень выходной мощности, ширину спектра излучения, надёжность и срок службы мощных лазеров.

2.4. Оптимум параметров сабмаунта

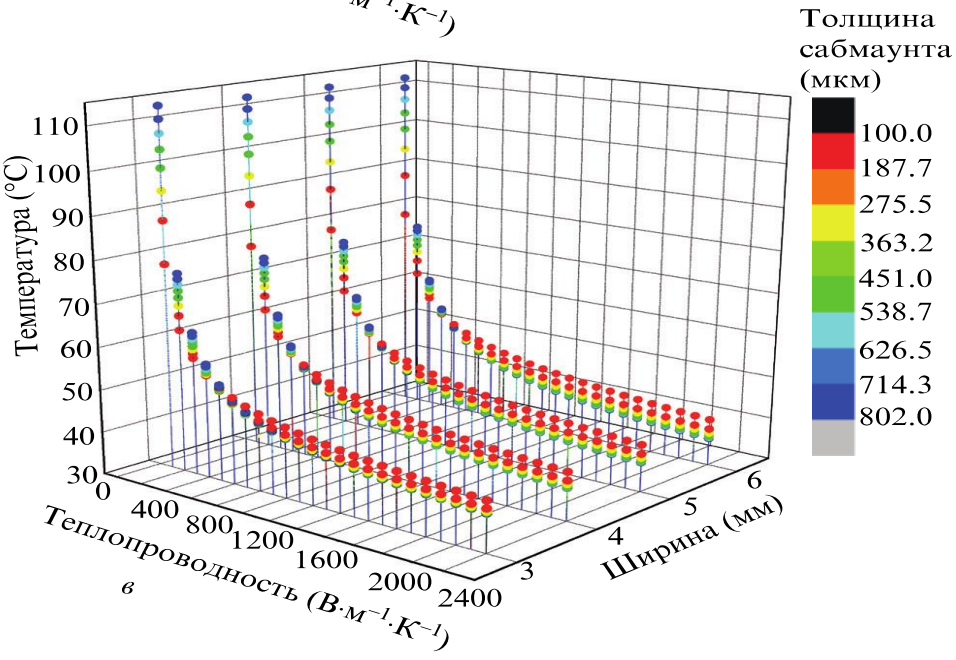
На Рис. 27 показаны результаты расчётов, выполненных с целью оптимизации параметров сабмаунта. Кривые, рассчитанные при тепловой нагрузке 35 Вт для сабмаунтов шириной 2 и 4мм имеют минимум 400мкм и 600мкм соответственно. Наличие минимумов в зависимости температуры активной области от толщины сабмаунтов обусловлено эффектом растекания тепла по ширине сабмаунта. При ширине сабмаунта 6мм, в исследованном диапазоне толщин, минимум температуры активной области должен находиться при толщинах более 800мкм. Очевидно, что применение алмазов с толщиной более 1мм и шириной более 4мм значительно снижает температуру активного слоя, но к сожалению такое увеличение толщины алмаза сопряжено с технологическими проблемами выращивания толстых пластин и повышением стоимости таких сабмаунтов. Кроме того, увеличение размеров сабмаунта влечёт за собой необходимость оптимизации базовых теплоотводящих элементов.


Толщина сабмаунта (мкм)
100.0
187.7
275.5
363.2
451.0
538.7
626.5
714.3
802.0
Температура (°C)
50
45
40
35
30
25
0
400
800
1200
1600
2000
2400
Теплопроводность (Вт·м⁻¹·К⁻¹)
3
4
5
6
Ширина (мм)

а


Толщина сабмаунта (мкм)
100.0
187.7
275.5
363.2
451.0
538.7
626.5
714.3
802.0
Температура (°C)
80
70
60
50
40
30
0
400
800
1200
1600
2000
2400
Теплопроводность (Вт·м⁻¹·К⁻¹)
3
4
5
6
Ширина (мм)

б


Толщина сабмаунта (мкм)
100.0
187.7
275.5
363.2
451.0
538.7
626.5
714.3
802.0
Температура (°C)
110
100
90
80
70
60
50
40
30
0
400
800
1200
1600
2000
2400
Теплопроводность (Вт·м⁻¹·К⁻¹)
3
4
5
6
Ширина (мм)

в

Рис. 28. Средняя температура активного слоя лазерного диода при тепловой нагрузке 10 (а), 20 (б) и 30 Вт (в) в зависимости от толщины, ширины и теплопроводности сабмаунта, смонтированного на базовый теплоотводящий элемент типа F-маунт. Толщина сабмаунта показана на шкале справа.

Проведём более масштабный расчёт, для анализа всего диапазона параметров доступных материалов сабмаунтов, перекрывающего параметры широко используемых термокомпенсаторов на основе AlN, BeO, SiC и композитов CuW, CuMo, а также поликристаллических и монокристаллических синтетических алмазов с высокой теплопроводностью. Вариация ширины сабмаунта составляла 3 – 6мм, толщины – от 0.1 до 0.8мм и теплопроводности – от 100 до 2400 Вт/м•К. Указанные диапазоны вариации параметров соответствуют интересным с технологической и практической точек зрения материалам, используемым для сабмаунтов, – от композитов с теплопроводностью 150–250 Вт/м•К, до высококачественных монокристаллов алмаза с теплопроводностью до 2400 Вт/м•К.

Результаты моделирования приведены в виде трёхмерных графиков с четвёртым параметром, два измерения отвечают за среднюю температуру активной области и величину теплопроводности сабмаунта, другие два параметра - ширина сабмаунта (дискретизация имеет значения 3, 4, 5, 6мм), и толщина сабмаунта - представлена цветовой шкалой –от 100мкм до 800мкм.

Сравнение результатов на Рис. 28 а, б, в позволяет сделать следующие выводы.

1. Максимальная температура может изменяться в широких пределах, она возрастает от 50 °С при тепловой нагрузке 10 Вт до 113 °С при тепловой нагрузке 30 Вт (толщина и ширина сабмаунта 0.1 и 3мм) и теплопроводности 100 Вт/м•К.

2. В диапазоне теплопроводности сабмаунтов 100 – 400 Вт/м•К, как и следовало ожидать, наблюдается наиболее сильная зависимость

температуры активного слоя от толщины сабмаунта. При небольшой теплопроводности сабмаунта 100 Вт/м•К и его небольшой толщине 0.1мм, для тепловой нагрузки 30 Вт температура возрастает от 76 до 113 °С.

3. По мере увеличения теплопроводности сабмаунта его толщина оказывает менее заметное влияние на температуру активного слоя. При увеличении теплопроводности и переходе ее через точку 400 Вт/м•К, соответствующую теплопроводности базового F-маунта из меди, наблюдаются близкие по величине значения температуры для разных толщин сабмаунта. Причем точка, в которой результаты сравниваются, соответствует немногим большей чем у меди теплопроводности, что очевидно связано с дополнительным увеличением теплового сопротивления всей конструкции из-за увеличения суммарной толщины теплоотводящих элементов. Эта точка также становится точкой перегиба, в которой увеличение толщины сабмаунта приводит теперь не к росту, а к уменьшению температуры – точка начала реализации эффекта отрицательной тепловой линзы, эффект которой проявляется за счёт растекания тепла по большему объёму сабмаунта с более высокой теплопроводностью.

4. Увеличение толщины сабмаунта при более высокой, чем у базового F-маунта, теплопроводности, как и следовало ожидать, снижает температуру активного слоя. Этот эффект проявляется сильнее с увеличением теплопроводности и ширины сабмаунтов. В частности, при тепловой нагрузке 30 Вт и теплопроводности 1600 Вт/м•К различие температур активного слоя в диапазоне толщин 0.1–0.8мм возрастает от 3°С при ширине 3мм до 6°С при ширине 6мм.

5. Для меньших тепловых нагрузок девиация указанных зависимостей существенно уменьшается, в частности при нагрузке 10 Вт и теплопроводности 1600 Вт/м•К соответствующие изменения температуры составляют 1.5 – 3 °С.

Достаточно интересными являются зависимости температуры активного слоя от теплопроводности сабмаунта. Полученные результаты показывают,

что с практической точки зрения при теплопроводности более 1600 Вт/м•К температура снижается несущественно, поэтому повышать теплопроводность нецелесообразно. Этот результат важен для современной технологии выращивания синтетических алмазов, т. к. уровень теплопроводности в 1200 Вт/м•К является пограничным для поликристаллического и монокристаллического синтетических алмазных материалов. Сложность и соответственно стоимость выращивания монокристаллов алмаза в настоящее время намного выше, чем для поликристаллов, поэтому сейчас поликристаллические пластины, в частности выращенные методом plasma-CVD, имеют существенно бóльшие размеры и значительно меньшую стоимость.

В этом же отношении интересны зависимости температуры активного слоя от толщины и ширины сабмаунтов. Геометрические размеры сабмаунта должны обеспечивать прежде всего достаточно эффективное охлаждение лазерного кристалла, но в то же время они должны минимизироваться для снижения стоимости сабмаунта, что особенно актуально для дорогостоящего алмазного материала.

В целом результаты, представленные на Рис.28, содержат достаточно материала для оптимизации как термокомпенсаторов с более низкой, чем у меди, теплопроводностью, так и сабмаунтов с высокой теплопроводностью. Эти результаты могут быть использованы для повышения эффективности отвода тепла не только от мощных лазерных диодов, но и от других типов высокоэнергетичных электронных и оптоэлектронных компонентов с высокой локализацией тепловыделения, т.е. они имеют достаточно обширную область применения и важное методическое значение.

Таким образом, на примере МОЛД с шириной полоскового контакта 100мкм получены трехмерные графики зависимости температуры активного слоя от основных параметров сабмаунта – ширины, толщины и теплопроводности – при тепловых нагрузках, соответствующих выходной мощности 10, 15 и 20 Вт с учетом достижения максимального полного к.п.д.,

типа базового медного теплоотводящего элемента и граничных условий. Полученные результаты позволяют определить оптимальные с точки зрения эффективного отвода тепла и стоимости параметры практически всех типов используемых и разрабатываемых сабмаунтов в зависимости от выходной мощности лазера и тепловой нагрузки. На основе полученных модельных данных можно для каждого типа базового теплоотводящего элемента определить предельные значения ресурсной выходной мощности при использовании термокомпенсаторов с меньшей, чем у меди, теплопроводностью, а также оптимизировать конструкции мощных диодных лазеров для перехода к ресурсным уровням выходной мощности 10 – 20 Вт при использовании сабмаунтов различной геометрии с высокой теплопроводностью на основе синтетических алмазов.

Таблица 4. Основные температуры МОЛД, в зависимости от конструкции и тепловой нагрузки.

Тип ТОЭ или ТОЭ+сабмаунт теплопроводностью 1200Вт/м•К Тепловая нагрузка	Средняя температура активной области	Температура выходного зеркала	Перепад температур по длине резонатора
C-маунт, 10Вт	32,5˚C	35˚C	7˚C
C-маунт+1200, 10Вт	30˚C	32˚C	2˚C
C- маунт, 25Вт	52˚C	56˚C	17˚C
C- маунт+1200, 25Вт	45˚C	48˚C	5˚C
F- маунт, 25Вт	45˚C	46˚C	11˚C
F- маунт+1200, 25Вт	40˚C	42˚C	2˚C
F- маунт, 35Вт	55˚C	57,5˚C	17˚C
F- маунт+1200, 35Вт	47˚C	51˚C	3˚C

Рассмотрим итоговую Таблицу 4, поведения основных температур модели МОЛД для различных типов конструкций, в том числе с использованием

сабмаунта 1200Вт/м•К. А также, сведём в таблицу данные о скорости роста основных температур от тепловой нагрузки.

Используя полученные расчётные данные, а также исходные данные по геометрическим параметрам чипов МОЛД и их полному к.п.д., на основе выработанных эмпирических критериев можно определять диапазоны ресурсной и предельной мощности различных МОЛД в зависимости от типа притменяемых базовых теплоотводящих элементов и сабмаунтов.

Таблица 5. Скорости роста температуры основных областей МОЛД, в зависимости от конструкции.

Тип ТОЭ или ТОЭ+сабмаунт теплопроводностью 1200Вт/м•К	Скорость роста, ˚С/Вт		
	средней температура активной области	температуры выходного зеркала	перепада температур по длине резонатора
С- маунт	1,28	1,52	0,68
С- маунт+1200	1	1,12	0,2
F- маунт	1	1,07	0,49
F- маунт+1200	0,77	0,88	0,08

2.5. Выводы

По результатам итоговых таблиц можно сделать следующие выводы:

1. С-маунта в качестве ТОЭ подходит для непрерывных, ресурсных мощностей излучения до 10 Вт включительно.

2. Свыше 10 Вт необходимо применять F-маунт.

3. Температурные режимы С-маунта при тепловой нагрузке в 25 Вт, соответствуют тем же температурным режимам лазерного кристалла при монтаже на F-маунте при тепловой нагрузке 35 Вт. То есть увеличение тепловой нагрузки почти около 30% может быть достигнуто лишь за счёт

перехода от С-маунта к F-маунту. Существенное снижение перепада температуры по длине резонатора также достигается более удачной конструкцией F-маунта.

4. Скорость роста температуры от тепловой нагрузки имеет линейный характер, наклон этой зависимости в значительной степени определяется типом ТОЭ и конструкцией МОЛД. Для МОЛД смонтированных с применением ТОЭ имеющих характер распространения теплового потока близкий к одномерному и планарному, может быть реализовано существенное улучшение теплового режима, в частности при переходе от С-маунта к F-маунту. В зависимости от тепловой нагрузки, скорость роста средней температуры активной области может быть снижена на 30%., скорость роста температуры выходного зеркала может быть снижена на 50%, перепад температур по длине резонатора уменьшен на 40 %.

5. Использование сабмаунтов с высокой теплопроводностью на Бахе алмазов и алмазных композитов позволяет сделать следующий шаг в улучшении теплоотводящих свойств конструкции МОЛД, не менее существенный, чем переход от С-маунта к F-маунту. Например для сабмаунта с теплопроводностью 1200 Вт/м•К принципиально возможно получить ресурсный режим работы для МОЛД на базе С-маунта при тепловой нагрузке в 25 Вт, а для F-маунта при нагрузке 35 Вт.

6. Существенное улучшение теплового режима при использовании сабмаунтов с высокой теплопроводностью проявляется в снижении средней температуры по длине резонатора МОЛД, а также в снижении перепада температуры по длине резонатора, например для F-маунта при тепловой нагрузке 35 Вт и теплопроводности сабмаунта 1200 Вт/м•К, перепад меняется с 17˚С до 3˚С, более чем в 5 раз.

Глава 3. Экспериментальные исследования

Полученные, в ходе проведённого моделировании расчёты показывают теоретический предел теплоотводящей способности различных конструкций. В этой главе будут описаны разработанные в нашей лаборатории технологии, позволяющие на практике приблизиться к теоретическому пределу теплоотводящей способности теплоотводов и сабмаунтов.



Рис.29 - Выходное зеркало экспериментального образца мощного лазерного диода, смонтированного на алмазный сабмаунт (верхняя горизонтальная линия границы), на теплоотводе типа С-маунт (нижняя горизонтальная линия границы).

Основной упор в технологии монтажа делается на максимальное снижение неоднородности в контактных слоях всех элементов конструкции, между кристаллом и сабмаунтом, сабмаунтом и ТОЭ Рис.29. Поэтому изначально необходимо предельно точно соблюсти планарность и плоскостность всех поверхностей элемента на этапе их изготовления. Основное требование к интерфейсу между, лазерным кристаллом или сабмаунтом, и теплоотводящим элементом заключается в обеспечении высокой теплопередачи, а она в свою очередь может быть получена при высоком качестве обработки поверхности т. е. заданных плоскостности, шероховатости и ко-планарности всех элементов теплоотводящей конструкции.

3.1. Создание экспериментальных образцов

3.1.1. Теплоотводящий элемент.

Базовым элементом конструкции является ТОЭ, он самый габаритный элемент, конструкции, однако, требования к его обработке отнюдь не снижены: неплоскостность противолежащих рабочей и базовой граней около 1мкм, шероховатость около 0,1мкм, по всей площади верхней грани ~ 25мм^{2,} Такие высокие параметры обработки диктуют требования к материалу, при том, что материал должен обладать высокой теплопроводностью и электропроводностью.

В качестве материала для теплоотводящих элементов часто используется медь. Выбор меди обусловлен следующими соображениями:

- достаточно доступный и дешёвый материал;

- легко обрабатывается;

- имеет самую высокую теплопроводность среди конструкционных металлов;

- материал достаточно экологичен;

Требования, которые сложно удовлетворить для меди:

- отсутствие нарушений структуры материала при обработке;

- отсутствие внедрённых частиц абразива и др. материалов;

- высокий класс обработки (параметр шероховатости на уровне около 0.1 микрона);

- возможность получения высокого качества отмывки поверхности перед нанесением металлизации;

–высокая плотность и структурная однородность слоёв металлизации на поверхности теплоотводящего элемента;

–стойкость к окислению.

Вместе с тем, обработка цветных металлов, в частности меди, имеющей невысокую твёрдость, представляет непростую задачу при соблюдении тех требований, которые предъявляются к теплоотводящим элементам для мощных лазерных диодов.

Обычные технологии полировки для меди в нашем случае неприменимы вследствие того, что медь имеет невысокую твёрдость, поэтому частицы абразива внедряются в поверхность меди и приводят к существенному снижению теплопроводности поверхностного слоя. Это же является причиной снижения адгезии к таким переходным слоям наносимых на них слоёв металлизации и припоев, необходимых для монтажа лазерных кристаллов.

Наиболее подходящей для финишной обработки является технология алмазного точения, поскольку она не нарушает и не загрязняет поверхность меди, позволяя в принципе получить т. н. ювенильную поверхность с шероховатостью на уровне менее 50нм обладающую высокой стойкостью к окислению.



Рис.30 - Внешний вид профилометра ZYGO 6000, использованного для определения шероховатости поверхности теплоотводящих элементов.

На Рис.30 показан внешний вид профилометра ZYGO 6000, использованного для определения шероховатости поверхности теплоотводящих элементов.

На Рис.31 показаны результаты сканирования рабочей поверхности теплоотводящего элемента после финишной обработки на профилометре ZYGO 6000. Измеренная шероховатость поверхности составила менее 50нм на базе в 600 микрон.

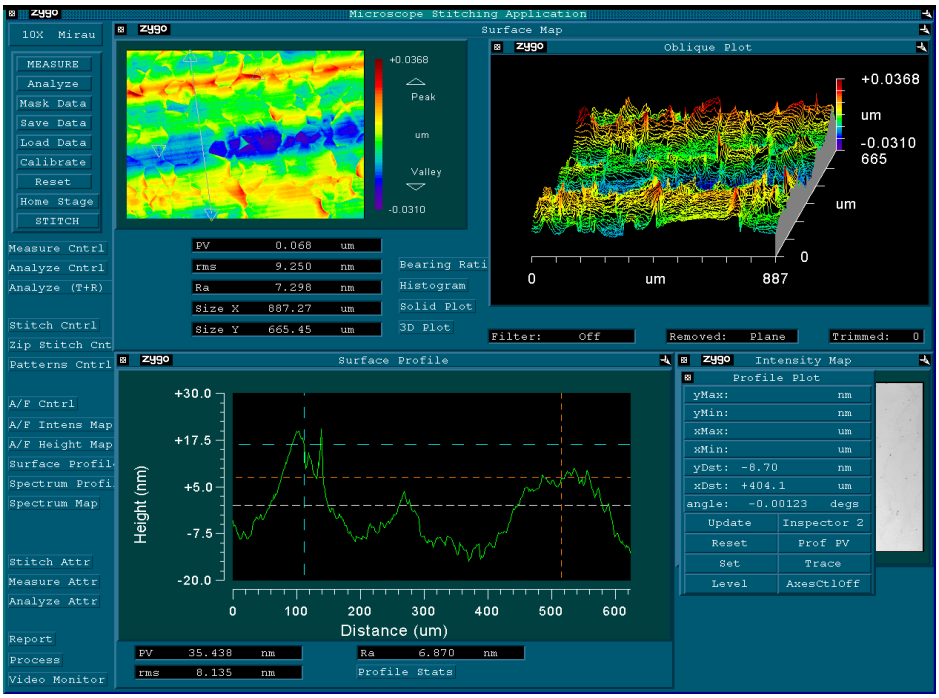


Рис.31.- Результаты сканирования рабочей поверхности теплоотводящего элемента после финишной обработки на профилометре ZYGO 6000. Шероховатость поверхности менее 50нм на базе в 600 микрон.

Достижением разработанной технологии финишной обработки можно считать воспроизводимое получение шероховатости рабочей поверхности в пределах 50нм (по максимальному размаху пиков от холмов и впадин на всей площади теплоотводящего элемента предназначенной для монтажа лазерного кристалла). Как показали эксперименты по монтажу и результаты измерения выходных параметров, это крайне важно для проведения последующих операций – отмывки, металлизации методом нанесения вакуумных покрытий, нанесения припоя, сборки лазерного чипа, поскольку шероховатость

поверхности в значительной степени определяет эффективность теплопередачи от активной области к объёмному материалу теплоотводящего элемента.

Контроль качества рабочего ребра проводился на микроскопе, контролировалось отсутствие заусенцев, выбоин, каверн и пустот в зоне рабочего ребра.

Серии экспериментов по монтажу лазерных кристаллов на теплоотводящих элементах с различным уровнем шероховатости показали, что минимально допустимым уровнем шероховатости поверхности является величина 100нм.

3.1.2. Сабмаунты (термокомпенсаторы)

Термокомпенсаторы изготавливаются из диэлектриков (BeO, AlN, SiC), либо из порошков металлов (медь-молибден, медь-вольфрам). Их теплопроводность составляет около 50 % от теплопроводности меди. Наиболее продвинутые термокомпенсаторы изготавливаются японской фирмой Sumitomo Electric из композита медь–алмаз и имеют по паспорту теплопроводность на уровне меди, по некоторым сведениям до 1000 Вт/м•К, однако купить такие элементы нам не удалось, не удалось также получить достоверные подтверждения таких параметров, кроме того, стоимость таких термокомпенсаторов с металлизацией намного превышает стоимость самого лазерного кристалла, а сведения по параметрам МОЛД собранных с их использованием, прежде всего по сроку службы, также недостаточно достоверны.

Существенным недостатком термокомпенсаторов является недостаточно высокая технологичность с точки зрения прецизионной обработки для получения поверхности низкой шероховатостью, высоким качеством выходного ребра, а также с точки зрения их металлизации для пропускания больших токов накачки (10 А и более), особенно для диэлектрических материалов.

3.1.3. Лазерный кристалл (чип).

Наилучшие результаты по увеличению выходной мощности, как на одиночных чипах лазерных диодов, так и на лазерных диодных линейках были получены за счет увеличения длины резонатора лазерного кристалла с 1-1.5мм до 3 - 4мм. Это стало возможным при использовании лазерных гетероструктур со сверхшироким волноводом, в которых внутренние потери снижены с 0.5 см $^{-1}$ до 0. 2 см $^{-1}$ [41].

Лазерные диоды, изготовленные из таких гетероструктрур, кроме более низких внутренних потерь, имеют другие важные преимущества - снижение тепловой нагрузки пропорционально увеличению площади активной среды, уменьшение лучевой нагрузки на зеркалах и снижение расходимости излучения в плоскости перпендикулярной p-n переходу. Снижение расходимости с 40 – 50 градусов до 20 – 25 градусов позволяет более эффективно фокусировать излучение, а снижение удельной тепловой нагрузки при условии равномерного отвода тепла от чипа делает принципиально возможным повышение выходной мощности в ресурсном режиме.

3.1.4. Сборка лазерных диодов

Лазерный кристалл (чип одиночного лазера или лазерной линейки) изначально напряжен из-за различия к.т.р. материалов гетероструктуры и как результат технологических операций травления мезаструктур, нанесения контактов, утонения гетероструктуры, скалывания зеркал и боковых граней чипов, нанесения защитно-просветляющих и отражающих покрытий на зеркала лазерного кристалла.

Для решения проблемы термоупругих напряжений используются 2 основных подхода. Применяется очень пластичный припой (например на основе индия), либо используется промежуточный термокомпенсирующий элемента, к.т.р. которого близок к к.т.р. лазерного кристалла

При сборке чипов на индии повторяемость результатов в нашей лаборатории достигнута не была, максимальная мощность составила 6.3 Вт, лазер работал не более 1 часа. Причиной деградации была ползучесть припоя, в результате чего максимальная ресурсная мощность не превышала 4 Вт [42].

Сборка проводилась в условиях чистого помещения класса 10000, установка пайки лазерных кристаллов Fineplacer Lambda A6 фирмы Finetech (Германия) размещена под ламинарным шкафом фирмы Stangl (Германия), обеспечивающим класс чистоты воздуха 100.

Для приварки верхних электродов используется установка ультразвуковой сварки марки HB12 немецкой фирмы TPT, размещенная под ламинарным шкафом класса 100.

Кардинальное повышение параметров МОЛД было получено при переходе на менее ползучий по сравнению с индием припой ПОС61. Удалось повысить надёжность МОЛД и повысить выходную мощность в ресурсном удалось в 2.5 раза, до 10 Вт.

Выходная мощность (ВтАХ) измерялась 10 раз до 10 Вт без признаков насыщения мощности и признаков повреждения кристалла. Контроль зеркал проводился на оптическом микроскопе и сканирующем электронном микроскопе (Рис.32), изображения обрабатывались и изучались на предмет наличия дефектов сборки и возникновения дефектов во время эксплуатации МОЛД, в том числе для определения появления КОД на зеркалах диода.

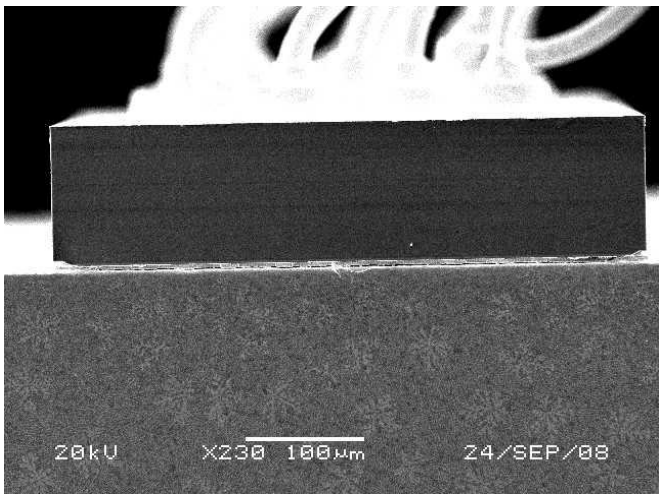


Рис.32 -Микрофотография на СЭМ собранного ЛД на длине волны 808нм. Вид со стороны выходного зеркала.

3.1.5. Выходные характеристики лазерных диодов.

Для определения устойчивости найденного оптимума диаграммы процесса монтажа лазерного кристалла (степени отклонения выходных параметров лазеров от оптимальных при вариации основных параметров техпроцесса сборки вблизи оптимума) были изучены параметры лазеров, собранных при 10 % вариации максимума температуры и 50 % вариации времени сборки.

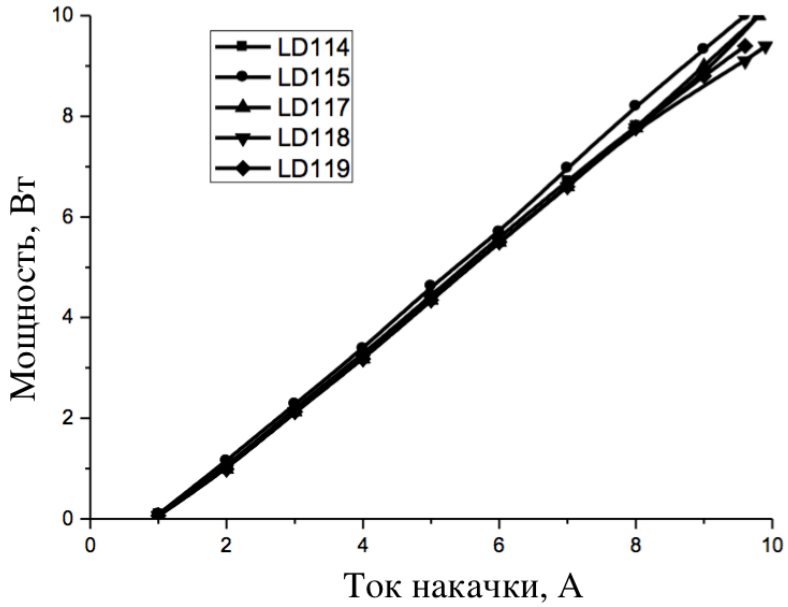


Рис. 33. -ВтАХ серии из 5 лазерных диодов собранных в фиксированном режиме.

Установлено, что вблизи оптимума разработанный процесс сборки достаточно устойчив, разброс выходной мощности при токе 8 А составил от 7 Вт до 8.3 Вт. Разброс значений пороговых токов был незначительным, разброс наклона ВтАХ составил от 1.03 до 1.22 Вт/А.

Варьирование режимов позволило определить оптимальные параметры диаграммы процесса. ВтАХ и ВАХ образцов, собранных в фиксированном режиме близком к оптимуму, до мощности 6 Вт воспроизводятся с точностью близкой к точности измерений, при выходной мощности около-10 Вт разброс выходной мощности составляет около 10 % (1 Вт) вероятно из-за наличия неоднородностей теплового контакта кристалла и теплоотводящего элемента. ВтАХ лазеров, собранных в фиксированном режиме показаны на Рис.33.

Ресурсные испытания проводились на ресурсных стендах фирмы IPG-GROUP. Номиналы токов и количество позиций: на стенде LDT-6 до 6А, 36 штук и на LDT-10 до 10А, 18 штук. Стенды позволяли в режиме реального времени получать данные о выходной мощности лазерных диодов и фиксировать их в памяти ПК. Температура термостабилизации плиты радиатора стенда при ресурсных испытаниях для всех образцов составляла 30 ºС.

3.1.6. Выводы.

1.Разработан новый метод монтажа кристаллов мощных одиночных лазерных диодов без применения термокомпенсаторов. В качестве теплоотводящих элементов использованы С-маунты, изготовленные из меди.

2. Получена высокая повторяемость параметров на 1- м измерении после сборки

(выходная мощность 10 Вт на токе 10 А) и достаточно высокий выход годных (50 % на длине волны 808нм и 100 % на длине волны 980нм.) после тренировочных испытаний в течение 200 часов на мощности 6 Вт.

3. После испытаний в течение 100 часов на мощности 8.5 Вт выходная мощность и электрические параметры не изменились, повреждения зеркал резонаторов не зафиксировано.

3.2. **Исследование образцов в импульсно-периодическом режиме**

Мощные лазерные диоды (ЛД) имеют ряд важных применений при работе в импульсном режиме, в частности в навигации для решения задач дальнометрии, локации. Кроме того, такие режимы работы ЛД востребованы в медицине и в технологиях микро-обработки материалов.

Исследования были посвящены изучению наиболее важных для практических применений параметров мощных ЛД в импульсном режиме работы, а именно:

- выходной мощности;
- спектрального состава излучения;
- зависимости выходной мощности от частоты следования импульсов;
- надёжности конструкции.

Широкое использование МОЛД в импульсном режиме работы зачастую ограничено отсутствием надёжных сведений о допустимых режимах работы, их выходных параметрах в этих режимах и отсутствием на рынке надёжных, компактных и бюджетных драйверов на диапазон токов накачки до 100 - 500 А. В таких драйверах необходимо применять быстродействующие переключатели, работающие на токах до 0,5 кА, причём проблемой является согласование выхода драйвера с нагрузкой - лазерным диодом. Лазерный диод представляет собой: во-первых низкоомную нагрузку (типичное значение последовательного сопротивления однополоскового лазерного кристалла с шириной полоскового контакта 100 - 200 микрон и длиной резонатора 3 - 4мм составляет около 40 -50 мОм), во - вторых эта нагрузка нелинейная и имеет сложную зависимость комплексного импеданса от уровня накачки.

3.2.1. Экспериментальная установка измерения параметров в импульсно-периодическом режиме

Для проведения экспериментов по исследованию импульсно-периодического режима, были созданы экспериментальные образцы кристаллов лазерных диодов, излучающие на длине волны 808нм, с длиной резонатора 3мм и 4мм.

В экспериментах использовался драйвер Р1000/1/100, разработанный и изготовленный фирмой «Эльфолюм» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).

На базе указанного драйвера был разработан и собран измерительный стенд для изучения предельных параметров мощных лазерных диодов в импульсном режиме работы. Основным элементом измерительного стенда является импульсный источник питания. Он выполнен на основе двух блоков формирователя импульсов с панелью для размещения лазерного диода, соединенного кабелем с адаптером напряжения питания. В качестве задающего генератора был использован Г5-48.

Главные проблемы, которые возникли при разработке стенда - это адекватное измерение импульсного тока и калибровка измерений абсолютной импульсной мощности.

Измеритель импульсного тока питания ЛД был изготовлен самостоятельно, он представляет собой пояс Роговского, выполненный в виде замкнутого соленоида с равномерной обмоткой. Принцип его работы основан на регистрации магнитного поля, создаваемого измеряемым током. Для уменьшения емкостной связи с внешними цепями и компенсации наводок от внешних источников переменных магнитных полей по оси соленоида проложен провод в виде обратного витка. Параметры пояса Роговского и интегрирующей цепочки подобраны таким образом, чтобы он работал в режиме трансформатора тока. Погрешность измерителя тока составляет около 10%.

В качестве измерителя мощности излучения лазерного диода в импульсном режиме был использован фотоэлемент измерительный типа

ФЭК-29 КПУ. Для получения более точных значений выходной мощности ФЭК-29 КПУ калибровался по мощности с помощью аналогичного прибора, калиброванного в метрологической лаборатории, кроме того для контроля измерений абсолютной мощности и повышения их достоверности был также использован калиброванный и сертифицированный калориметрический датчик с помощью которого измерялась средняя мощность излучения ЛД. Для калибровки были также использованы контрольные точки Ватт - Амперной характеристики (ВтАХ) в области линейности ВтАХ в непрерывном режиме, до тока накачки 15 А.

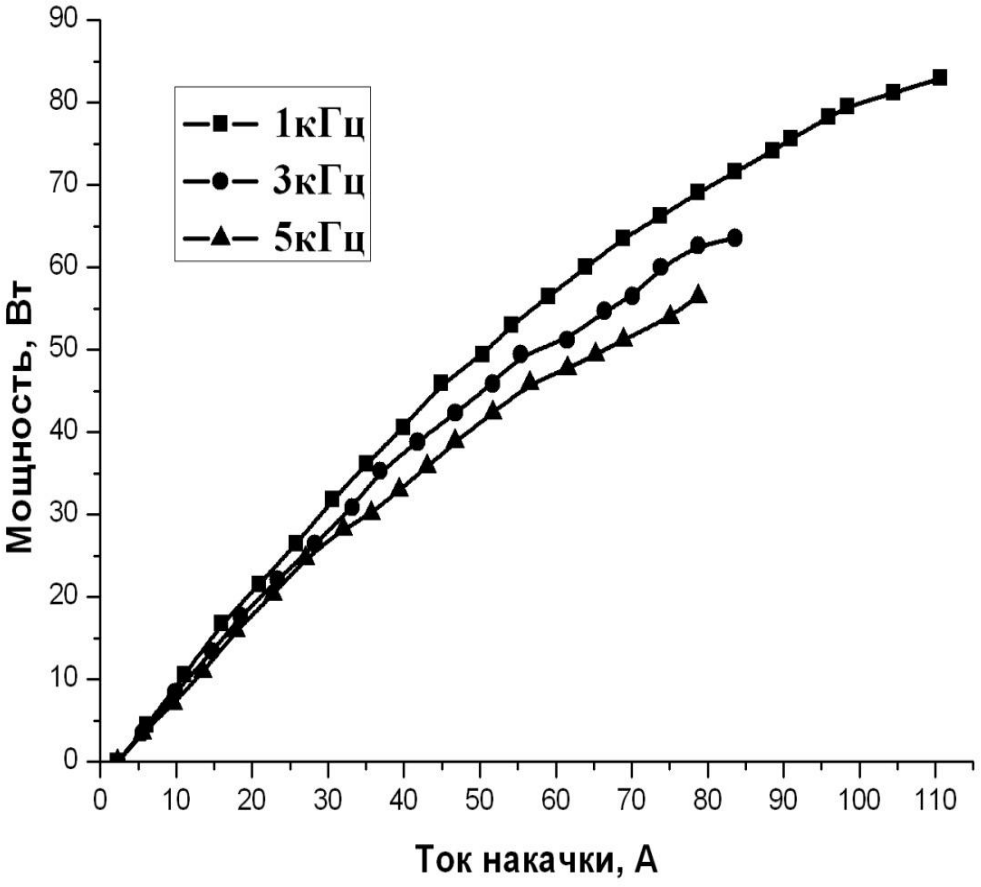


Рис.34 Ватт - амперные характеристики лазерного диода.
Длительность импульса 100 нс. Частота повторения 1, 3, 5 кГц.

3.2.2. ВтАХ МОЛД в импульсно-периодическом режиме

В импульсно-периодическом режиме исследовался мощный лазерный диод, смонтированный на ТОЭ типа С-маунт без использования сабмаунта.

ВтАХ в импульсном режиме, при частоте следования импульсов 1, 3, 5 кГц показаны на Рис.34. Как видно из графиков, выходная мощность на начальном этапе (контрольная точка 10,1 А / 10 Вт) хорошо согласуется с импульсными измерениями. Отличие в крутизне ВтАХ в импульсном и непрерывном режимах на начальном линейном участке ВтАХ составило около 0,14 Вт/А, поэтому в импульсном режиме в контрольной точке при накачке в 10,1 А мощность была больше на 1,25 Вт и составила 11,25 Вт при частоте следования импульсов 1 кГц.

Как видно из графиков, область токов накачки, в которой наблюдается линейность ВтАХ с увеличением частоты следования импульсов уменьшается с 35 А при частоте 1 кГц до 25 А при частоте 5 кГц. Наблюдается существенное отклонение ВтАХ от линейной, т.е. снижение дифференциальной квантовой эффективности как при увеличении тока накачки, так и при увеличении частоты следования импульсов. При частотах ниже 100 Гц, ВтАХ существенно не изменялась, что свидетельствует о незначительном увеличении среднего нагрева активной среды в данном диапазоне частот. При частоте 1 кГц наблюдалось заметное снижение эффективности при токе накачки более 35 А. При токе накачки 65 А выходная мощность падает приблизительно на 20 % при увеличении частоты следования от 1 кГц до 5 кГц. Заметим, что в нашем конструктивном варианте С-маунт с чипом ЛД крепится непосредственно на корпусе драйвера накачки, теплоотводящий элемент драйвера имеет небольшие размеры, принудительное охлаждение лазерного кристалла отсутствует, поэтому было сделано предположение о том, что наблюдаемое снижение эффективности ЛД при увеличении частоты следования импульсов обусловлено увеличением средней температуры активной области лазерного

кристалла. Это предположение подтвердилось при измерении температуры С- маунта с помощью микро-термодатчика.

3.2.3. Спектры МОЛД в импульсно-периодическом режиме

Для выяснения причин насыщения ВтАХ, а также для получения данных о спектральных характеристиках, важных для практических применений ЛД в импульсном режиме, были исследованы спектральные параметры в различных режимах накачки.

Для измерения спектральных зависимостей излучения лазерного диода использован волоконный спектрометр типа «AvaSpec – 102», разработанный фирмой «Avantes».

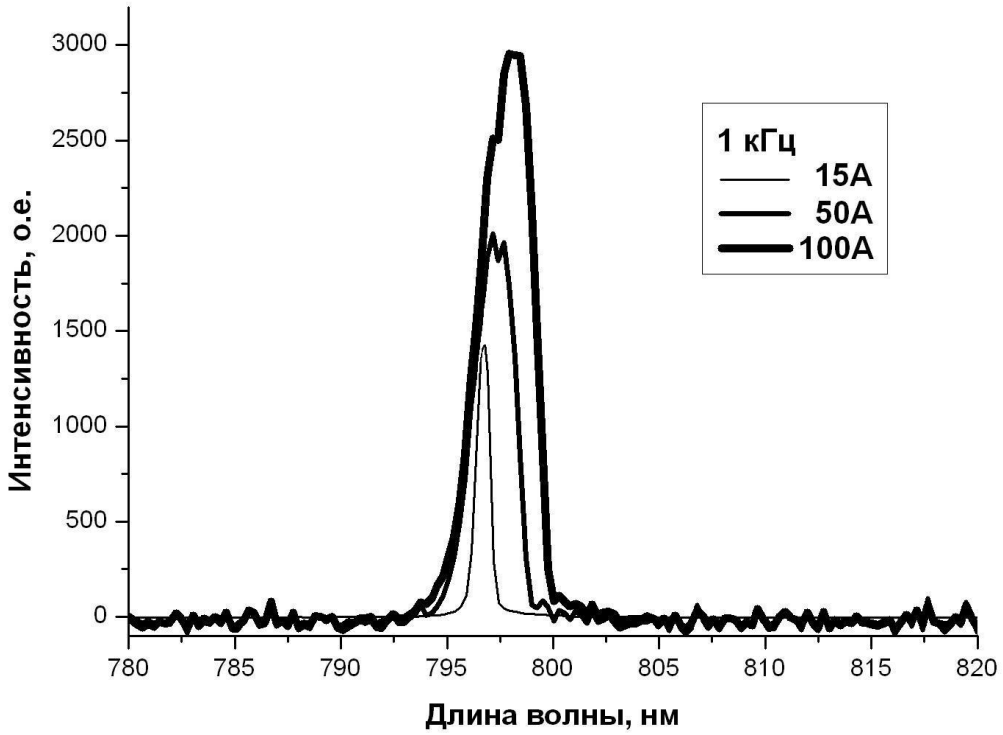


Рис.35 -Спектральные характеристики лазерного диода.
Длительность импульса 100 нс, частота повторения 1 кГц.

На Рис.35 показаны спектры излучения при токах накачки от 10 до 100 А при частоте повторения 1 кГц. Как видно, при увеличении тока накачки, максимум огибающей спектра сдвигается в длинноволновую область приблизительно на 2нм, а ширина спектра на половине высоты

увеличивается от 0.6нм до 3нм, т.е. на величину около 2.4нм. За время импульса, вследствие динамического нагрева активной среды, максимум огибающей смещается в длинноволновую область. При этом на немного более значительную величину увеличивается полуширина огибающей спектра. Такое поведение ширины спектра соответствует картине обычно наблюдаемой в лазерах с широким полосковым контактом, спектр излучения которых определяется не только уширением контура усиления, но также пространственной неоднородностью генерации по ширине полоскового контакта и эффектами, связанными с пространственным перераспределением поля в поперечном направлении при высоком уровне накачки.

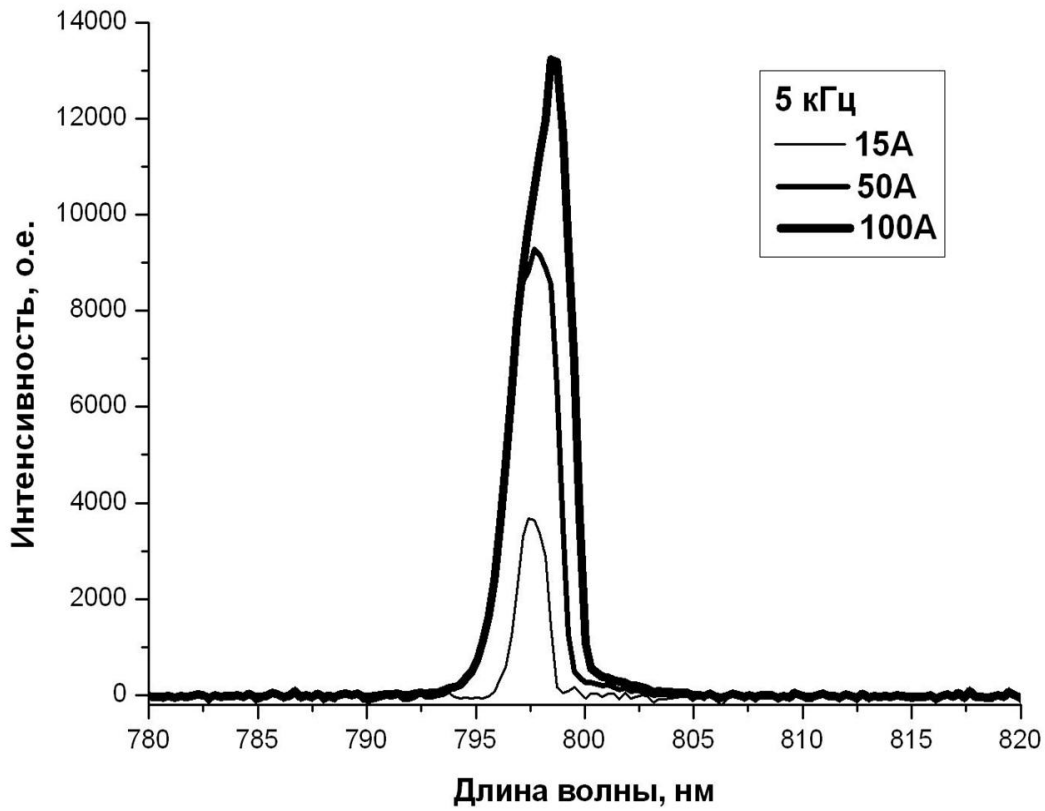


Рис.36 Спектральные характеристики лазерного диода.
Частота следования импульсов 5 кГц.

Динамический спектральный сдвиг максимума и увеличение ширины спектра около 2 – 2.5нм за время импульса 100 нс при увеличении тока накачки в диапазоне 10 - 100 А в соответствии с температурной зависимостью ширины запрещенной зоны активной области 0.25 – 0.3нм/градус позволяют оценить величину динамического перегрева активной области за время импульса. Оценка даёт значение не более 8 -10 градусов.

На Рис.36 приведены спектральные параметры на частоте 5 кГц. По сравнению с кривыми на Рис.35, к динамическому нагреву активной области за время импульса добавляется существенный дополнительный средний нагрев теплоотводящего элемента и лазерного кристалла вследствие недостаточной эффективности отвода тепла пассивным теплоотводящим элементом в нынешней конструкции лазерной головки драйвера. Этот эффект проявляется в том, что даже при небольшом уровне накачки максимум огибающей спектра при 5 кГц по – сравнению с 1 кГц заметно смещается в длинноволновую область и уширяется, при частоте 1 кГц полуширина спектра равна 0.6нм, а при частоте 5 кГц она увеличивается вдвое и составляет около 1.2нм. При этом максимум спектра также сдвигается на величину около 1.2нм.

Предполагается, что введение в конструкцию драйвера ЛД принудительного охлаждения - термостабилизации (например при помощи термоэлектрического элемента на основе эффекта Пельтье - ТЭМО) и системы сброса тепла от ТЭМО позволит компенсировать средний нагрев теплоотводящего элемента кристалла ЛД и стабилизировать выходную мощности при увеличении частоты следования импульсов. В то же время, эта мера не позволит решить проблему динамического нагрева кристалла за время импульса вследствие короткой длительности импульса и большой инерционности системы охлаждения кристалла. В то же время мы рассчитываем повысить достигнутые параметры путём повышении

эффективности согласования чипа МОЛД с драйвером питания за счёт снижения паразитной ёмкости и индуктивности путём гибридной интеграции чипа с выходными элементами драйвера.

3.2.4. Расчёт к.п.д. при импульсно-периодическом режиме

Для понимания причин замедления роста выходной мощности в условиях экстремальной накачки было проведено численное моделирование полного к.п.д. мощного ЛД до токов накачки более 300 А.

Расчёт полного к.п.д. проводился по упрощенным формулам, аналогично вычислялся к.п.д. для МОЛД с длиной резонатора 4мм в начале работы, но в данном случае сравниваются лазерные чипы с длиной резонатора 3мм и 4мм, излучающие на длине волны 808нм.

(7) $$n_d = n_i \times \left(1 + \frac{2\alpha_i \times L}{\ln(R_1 \times R_2)^{-1}}\right)^{-1} \times \left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \times \frac{1-R_2}{1-R_1}\right)^{-1}$$

(8) $$n_t = n_d \times \frac{(I - I_{th}) \times E_g}{I \times \left[U_{th} + R_s \times (I - I_{th})\right]}$$

Согласно результатам моделирования, скорость нарастания к.п.д. для чипа с длиной резонатора 4мм на начальном участке меньше, чем для чипа с L=3мм. Кроме того, пороговый ток ЛД с более длинным резонатором выше. Максимальный к.п.д для резонатора с L = 4мм по сравнению с к.п.д. ЛД с L = 3мм меньше примерно на 2.5 % и достигается при более высоком токе накачки. Однако, при токе накачки около 15 А, они сравниваются и при более высоких уровнях возбуждения к.п.д. ЛД с L= 4мм превосходит к.п.д. ЛД с L=3мм.

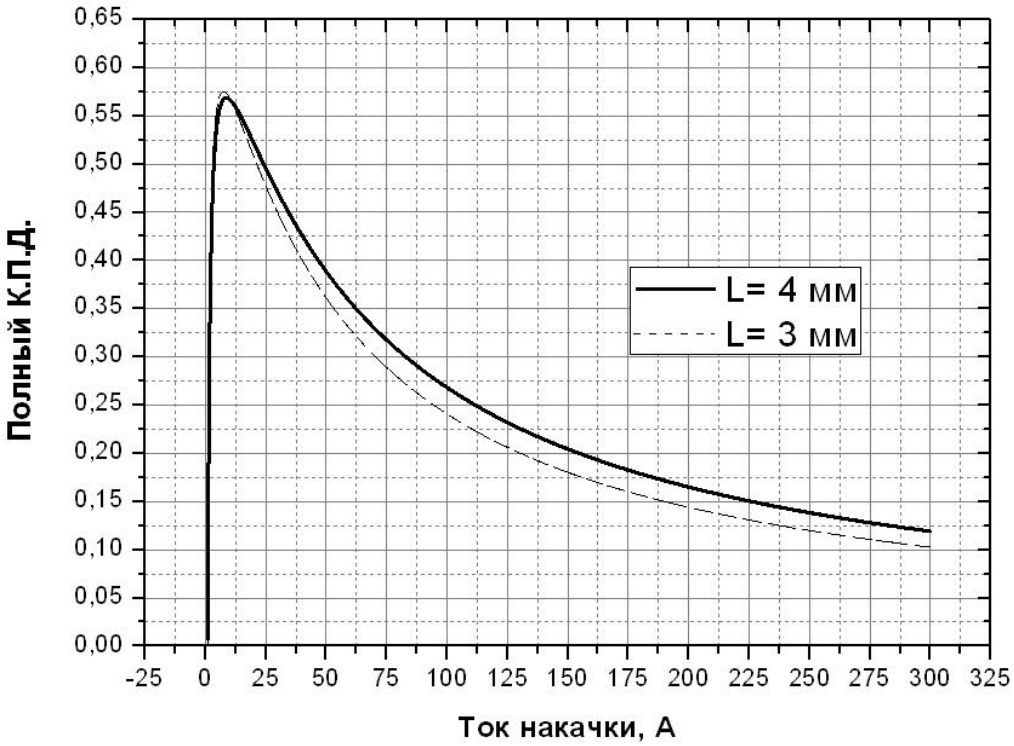


Рис.37 - Расчетный полный к.п.д. мощного лазерного диода при длине резонатора 3мм и 4мм.

На Рис.37 приведены результаты моделирования полного к.п.д. от порога генерации до токов накачки 300 А. При токе накачки около 100 А к.п.д. ЛД с L=4мм превосходит к.п.д. ЛД с L=3мм примерно на 2.5. %. причём, как видно, разница возрастает с током накачки до тока 100 А и далее изменяется незначительно.

Результаты экспериментальных измерений спектральных сдвигов максимума огибающей спектра при высоком уровне накачки в импульсном режиме принципиально согласуются с расчётными данными, приведенными на Рис.37. То есть резкое увеличение температуры активной зоны наблюдается в диапазоне резкого падения полного к.п.д. (ток накачки более 50 А). Оценки динамического перегрева активной области и данные спектральных измерений при токах накачки до 150 А дают величину более 35°С. В то же время, наблюдаемые сдвиги максимума спектров и

увеличение их полуширины по абсолютной величине оказались несколько меньше ожидавшихся при анализе полученных ВтАХ. Возможной причиной является то, что при расчёте использовалось приближение, в котором последовательное сопротивление считалось константой, измеренной в непрерывном режиме при токе накачки 15 А, (достоверно экспериментально измерить эту величину в импульсном режиме нам не удалось), в то время как последовательное сопротивление продолжает снижаться с ростом накачки, поэтому полученные результаты при высоком уровне возбуждения близки к нижнему пределу полного к.п.д.

Приходится констатировать, что все механизмы насыщения выходной мощности в предельных импульсных режимах накачки достоверно установить пока не удалось и эта тема представляет собой предмет дальнейших исследований. Возможно, дополнительные причины насыщения мощности обусловлены не только особенностями протекания тока в лазерной гетероструктуре при высоком уровне инжекции.

Свою лепту могут вносить особенности конструкции активного элемента, определяемые пост-ростовой технологией его изготовления. В частности важную роль в предельных режимах генерации могут играть эффекты возбуждения замкнутых мод резонатора и возрастания токовых утечек вследствие снижения эффективности диэлектрической изоляции и увеличения растекания тока под полосковым контактом. Важными проблемами, препятствующими получению точных и достоверных данных по предельным параметрам в импульсном режиме при экстремально высоких токах накачки являются технические аспекты согласования комплексного импеданса ЛД с выходным трактом драйвера, а также проблема калибровки абсолютных значений тока накачки и выходной мощности.

Для снижения влияния среднего нагрева кристалла активного элемента на ВтАХ, максимальная выходная мощность регистрировалась при частоте следования импульсов 100 Гц. (Рис.38).

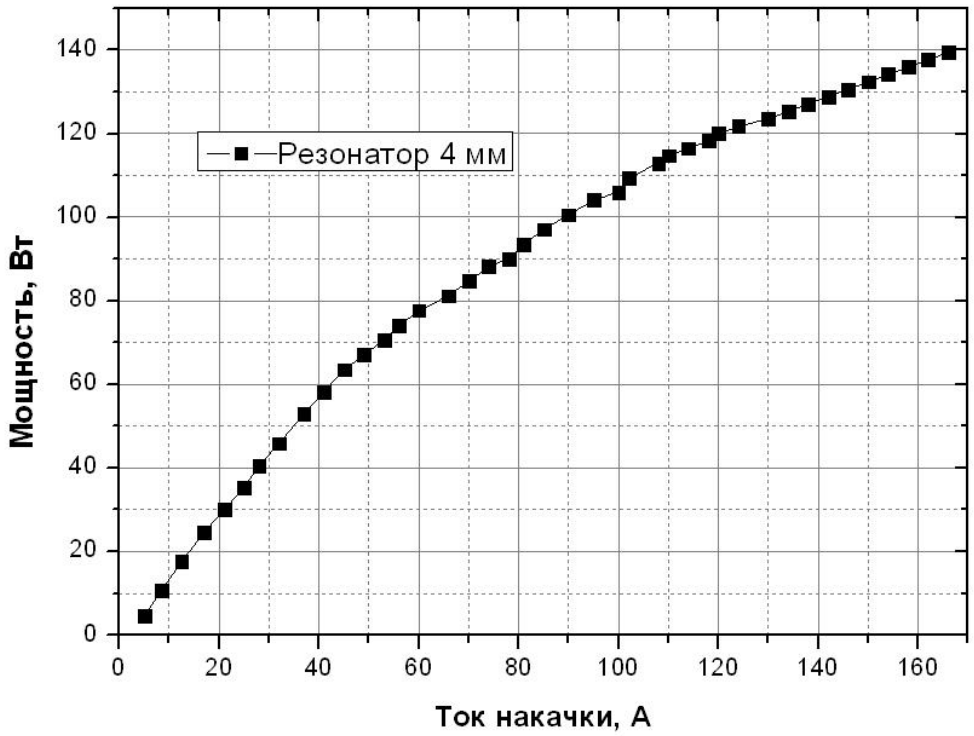


Рис.38а

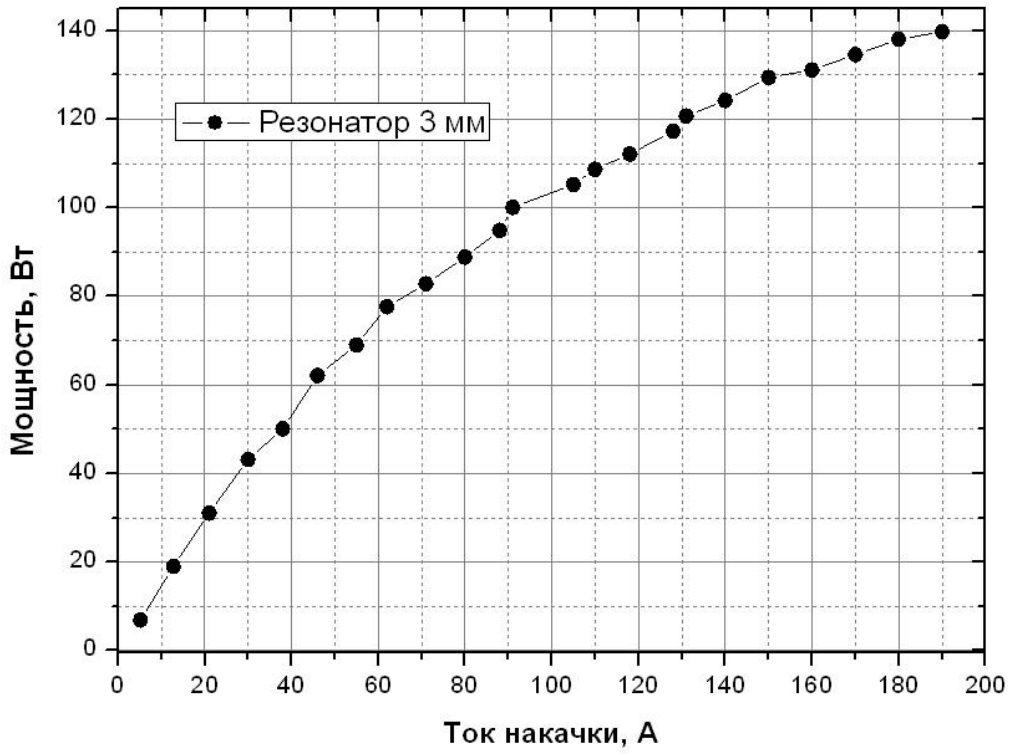


Рис.38б

Рис. 38 Предельная импульсная мощность для ЛД с длиной резонатора 4мм (а) и 3мм (б).

Предельная мощность ЛД с длиной резонатора 3мм и 4мм составила немногим более 140 Вт, для 4мм ЛД она достигнута при токе 163 А, а для 3мм ЛД при токе 190 А, что принципиально соответствует расчётам к.п.д. на Рис. 37. Заметим, что полного насыщения выходной мощности на участке 120-140 А и в момент достижения мощности 140 Вт не наблюдалось. При мощности от 140 до 150 Вт была зафиксирована необратимая деградация ЛД, вероятно всего связанная с уширением импульса накачки вследствие параметров драйвера и его согласования с нагрузкой. В пользу такой версии насыщения мощности свидетельствует то, что анализ показал на нескольких исследованных ЛД, после измерений сохранились диодные вольт-амперные характеристики, внешне чипы не имели повреждений, выходные зеркала не были повреждены. Причину деградации параметров этих ЛД установить не удалось. ВтАХ на Рис.38 можно условно разделить на 3 участка с характерными значениями крутизны:

- диапазон токов от порога генерации до тока 50 А, крутизна 1.34 Вт/А;
- диапазон от 50 А до 120 А, крутизна около 1 Вт/А;
- диапазон от 120 А до 170 А – крутизна 0.45 Вт/А.

В соответствии с расчётным графиком к.п.д., приведенным на Рис.37, на первом участке, при токах от порога до 50 А полный к.п.д. проходит максимум в 53 % и составляет не менее 42 % т.е. остаётся высоким, на втором участке, при токе 50 – 120 А он падает с 42 % до 25 % и на участке 120 -170 А к.п.д падает с 25 % до 22 %. что составляет менее половины полного к.п.д. в максимуме (53 %).

Характер поведения ВтАХ в условиях экстремальной накачки в принципе соответствует характеру модельной зависимости полного к.п.д. Это позволяет предположить, что вероятно основной причиной ограничения мощности в импульсном режиме генерации, также как и в непрерывном режиме генерации являются тепловые проблемы.

Зависимости максимума спектра от тока накачки показана на Рис.39 Максимум огибающей спектра при увеличении тока накачки движется в

длинноволновую сторону согласно зависимости E_g (T), а полуширина спектра насыщается на уровне около 3нм.

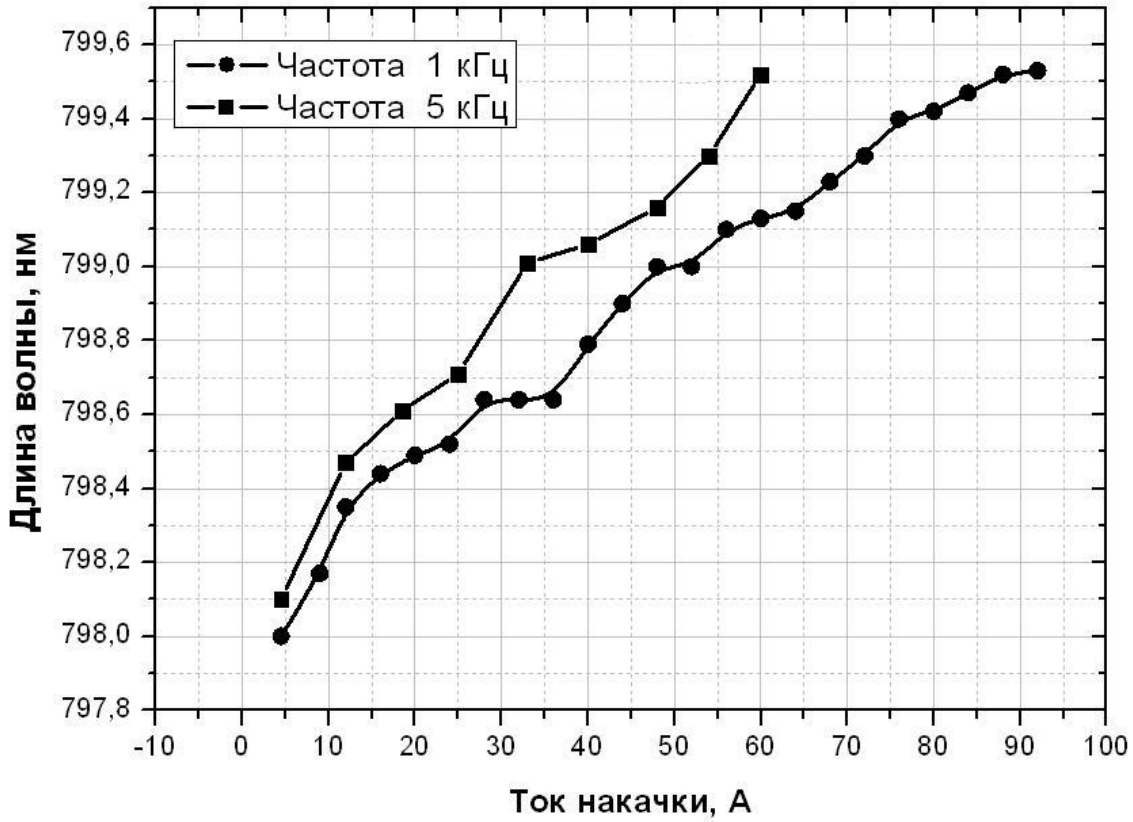


Рис. 39. Зависимость максимума огибающей спектра излучения от тока накачки.

В импульсном режиме, при частоте повторения импульсов 100 Гц, длина волны составила около 798нм при токе 10 А, в то время как в непрерывном режиме при том же токе накачки она была равна 805нм, т.е. нагрев активной области в непрерывном режиме составляет около 25 градусов относительно «холодной» активной среды.

3.2.5. Выводы

Сравнение ВтАХ и спектров излучения ЛД на 800-808нм в непрерывном режиме и в импульсном режиме позволяют сделать следующие выводы.

В импульсном режиме, при частоте следования импульсов 100 Гц ВтАХ ЛД на 800нм с длиной резонатора 3мм и 4мм были близки к линейным до мощности 50 - 60 Вт при токе накачки 45-60 А. Т.е., при обеспечении

высокого качества оптических покрытий зеркал резонатора, выходная мощность около 60 Вт от ЛД с шириной полоскового контакта 130 микрон для данного типа гетероструктур – это значения близкие к пределу мощности для непрерывного режима, к которому можно приблизиться, если удастся найти новые высокоэффективные методы охлаждения активного слоя. Предельная мощность в импульсном режиме составила около 140 Вт при длительности импульса около 100 нс и токе 166 А для 4мм ЛД и токе 190 А для 3мм ЛД, что качественно соответствует расчётным значениям к.п.д.. Зависимости выходной мощности лазеров от частоты следования импульсов, а также спектральные параметры свидетельствуют о том, что основной механизм насыщения мощности при высоком уровне импульсной накачки имеет тепловой характер.

3.3 Экспериментальные образцы с plasma-CVD алмазами

Наиболее привлекательным параметром алмаза является его рекордная среди всех известных материалов теплопроводность – 2000–2400 Вт/м•К при комнатной температуре, причём алмаз, как теплопроводящий материал имеет принципиальные и существенные резервы, поскольку в очищенном от изотопов алмазе (в природных кристаллах содержится 1,1% изотопа 13С) теплопроводность может достигать 3300 Вт/м•К. Напомним, что используемая в настоящее время в качестве теплоотводящих элементов медь имеет теплопроводность около 400 Вт/м•К.

Трёхмерное моделирование, описанное в главе 2, позволило определить целесообразные геометрические размеры 4x3x0,3мм для алмазных сабмаунтов при теплопроводности 1000 – 1200 Вт/м·К. В данной главе будут описаны экспериментальные исследования образцов, смонтированных на алмазный сабмаунт с теплопроводностью 600 – 800 Вт/м·К.

3.3.1. Сабмаунты из plasma-CVD алмазов

Для использования алмазов в качестве теплоотводящих элементов для монтажа мощных лазерных кристаллов потребовалось решить ряд серьёзных проблем, в том числе: выращивание пластин толщиной более 300мкм; их резка, шлифовка и полировка с необходимыми параметрами (эти проблемы решались совместно с ИОФРАН); нанесение адгезионных слоёв и слоёв припоя для двусторонней металлизации (ФИАН); монтаж алмаза на базовый теплоотводящий элемент и монтаж лазерного кристалла на алмаз (здесь и далее ФИАН); разводка нижнего (плюсового) электрода вследствие того, что алмаз является диэлектриком; согласование коэффициентов теплового расширения (КТР) (при 300 К КТР алмаза равен 10^{-6} $К^{-1}$, меди – 16,7 10^{-6} $К^{-1}$, а полупроводниковых гетероструктур - около 6 10^{-6} $К^{-1}$), Плёнки алмаза были синтезированы сравнительно экономичным методом осаждения из газовой фазы в СВЧ плазме на подложках кремния, предварительно засеянных ультрадисперсным алмазом в ультразвуке. При получении алмазных пластин для инжекционных лазеров осуществлялось осаждение алмазных пленок из газовой фазы в СВЧ плазме на кремниевые подложки, отделение алмазных пластин от кремниевых подложек химическим травлением в кислоте, лазерная резка алмазных пластин на сабмаунты и полировка последних. Процесс осуществлялся путём разложения углеводородной смеси метана с водородом и последующего осаждения алмаза на нагретую подложку. Используемые в эксперименте образцы plasma-CVD алмазов были выращены в ИОФРАН.

Следующий этап – металлизация инертного и особо прочного материала искусственного алмаза.

Чипы МОЛД на длину волны 808нм имели длину резонатора 3мм и ширину полоскового контакта 130мкм, размер алмазных элементов составлял 2х4х0,3мм. Ориентировочно измеренная нами теплопроводность составила около 600 -800 Вт/м•К.

3.3.2. Исследование параметров МОЛД, смонтированных на алмазный сабмаунт.

Параметры экспериментальных образцов были проанализированы. Ватт-амперные характеристики для непрерывного МОЛД, смонтированного непосредственно на медном С-маунте (МОЛД) и также на С-маунте, но с использованием алмазного элемента (МОЛД+сабмаунт800), для МОЛД на 808нм, с длиной резонатора 3мм, представлены на Рис. 40.

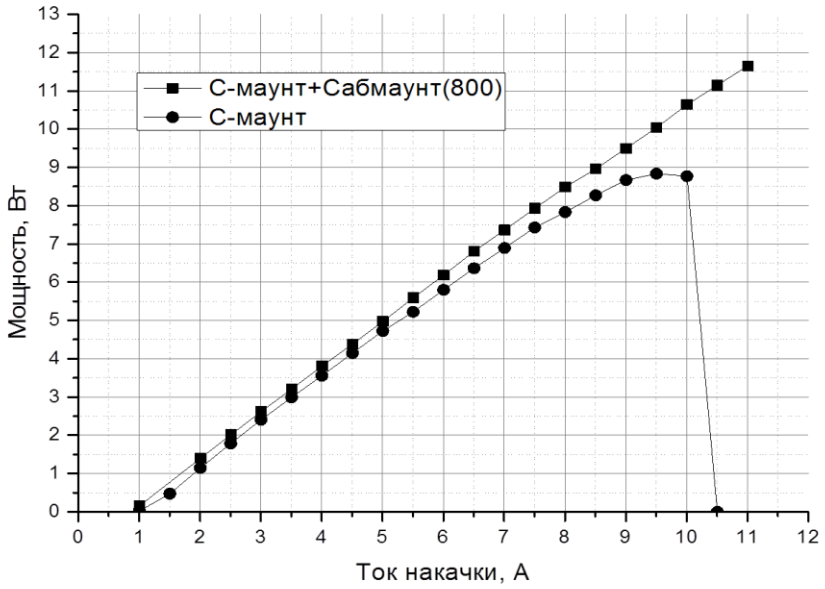


Рис.40 - ВтАХ МОЛД (808нм) на С-маунте без использования алмазного сабмаунта теплопроводностью 600-800 Вт/м·К, и с использованием алмазного сабмаунта.

Из проведенного моделирования использования сабмаунтов с теплопроводностью выше чем у меди следовало, что выигрыш должен быть невелик, при использовании сабмаунта с теплопроводностью 600-800 Вт/м·К. Задача монтажа такой «многоэтажной» конструкции с использованием сабмаунта, весьма сложна и неточности при её техническом исполнении могут ухудшить теплоотводящие свойства.

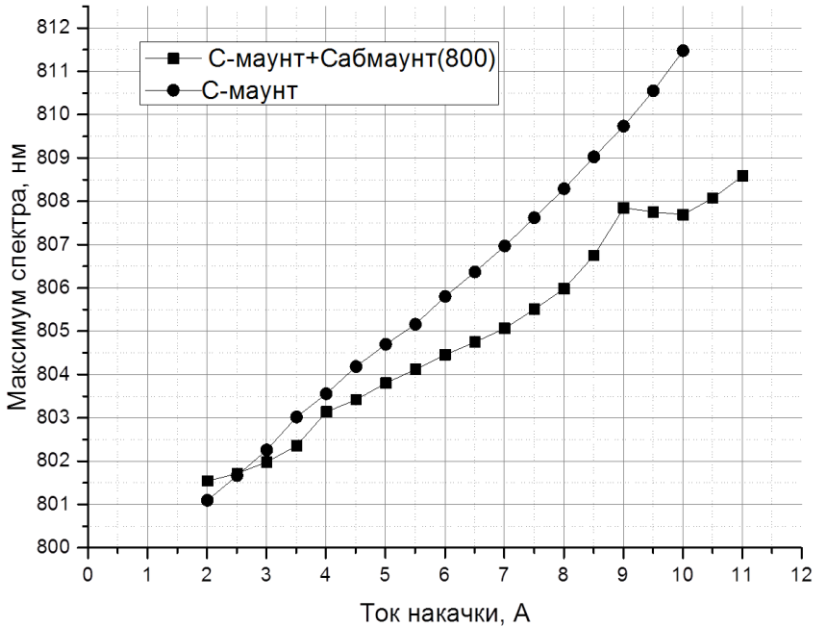


Рис.41 -Максимумы огибающих спектра для МОЛД (808нм), смонтированного на С-маунт и на С-маунт с сабмаунтом теплопроводностью 600-800 Вт/м·К.

На Рис.41 приведены зависимости максимумов огибающих спектров для указанных выше МОЛД и МОЛД+сабмаунт 600-800 от тока накачки. Видно, что при токе 8 А максимум спектра МОЛД+сабмаунт сдвинут относительно максимума спектра ЛДМ почти на 2нм в коротковолновую сторону, а при токе накачки 10А уже почти на 4нм, это свидетельствует о более эффективном отводе тепла от кристалла через алмазный элемент, поскольку он осуществляет эффект «отрицательной тепловой линзы», тепло от лазерного полоскового контакта шириной 130мкм более эффективно, чем на медном теплоотводе, «растекается» по всей ширине (2мм) алмазного элемента.

Как показывает наша статистика ресурсных испытаний, типичная ресурсная мощность МОЛД составляет 8 Вт, а МОЛД+сабмаунт600-800, по данным предварительных испытаний, устойчиво работал в течение суток на мощности 12 Вт.

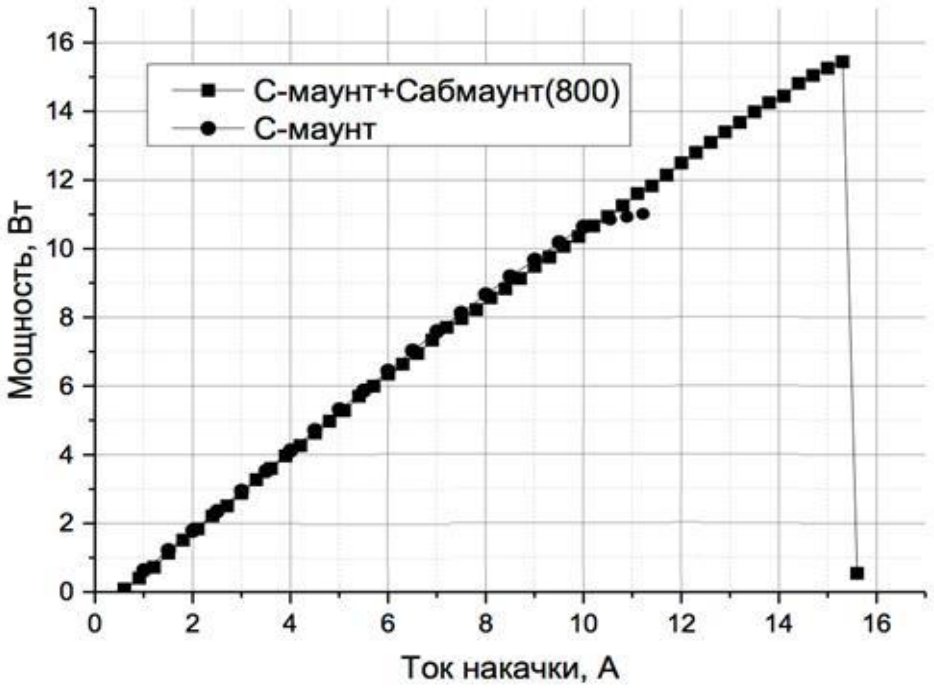


Рис. 42 -ВтАХ МОЛД (970нм) на С-маунте без использования алмазного сабмаунта теплопроводностью 800 Вт/м·К, и с использованием алмазного сабмаунта.

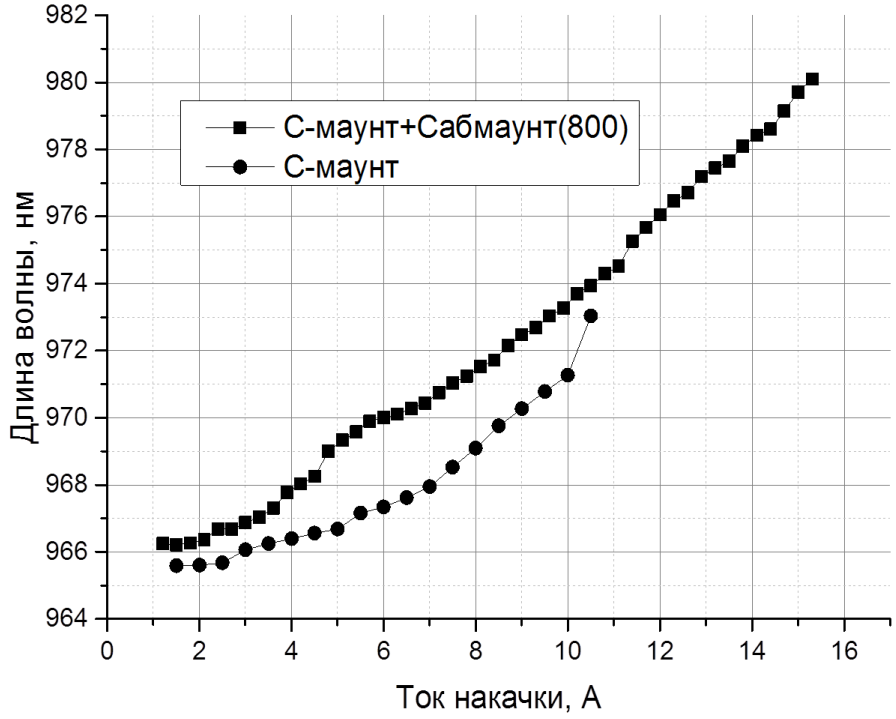


Рис. 43- Максиму огибающей спектра для МОЛД (970нм), смонтированного на С-маунт и на С-маунт с сабмаунтом с теплопроводностью 800 Вт/м·К.

Как показано на Рис.42 для лазерного чипа, излучающего на длине волны 970нм, с длиной резонатора 4мм, смонтированного на С-маунт с использованием сабмаунта, с теплопроводностью вдвое больше чем у меди, ВтАХ достигла 15,5 Вт, в то время как без сабмаунта она доходила лишь до 11 Вт

Максимумы спектра, Рис. 43 проявляют интересный эффект, видимо связанный с шестикратным различием в к.т.р. у алмаза и полупроводникового кристалла. При использовании алмазного сабмаунта, максимум спектра изначально, без достаточной тепловой нагрузки был смещён в длинноволновую область. Если учесть, что длина резонатора у данного лазерного кристалла была 4мм, по-видимому, термоупругие напряжения существенно повлияли на спектр усиления. Версия о том, что диод был смонтирован некачественно, и якобы наблюдается простой перегрев активной области диода, вследствие чего максимум спектра имеет существенный сдвиг – несостоятельна, так как мощность, выросшая почти на 50% опровергает ухудшение теплового режима. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

3.3.3. Выводы

В ходе исследований удалось принципиально показать что потенциал алмазных сабмаунтов может быть экспериментально реализован. Данные получены на примере сабмаунтов с теплопроводностью 600-800 Вт/м·К. Для этого понадобилось разработать технологию металлизации искусственного plasma-CVD алмаза и технологию монтажа многослойной конструкции. Результатом стали полученные лабораторные образцы двух видов, смонтированные на С-маунт. Экспериментально удалось продлить ВтАХ в ресурсном режиме, для МОЛД на 808нм и длиной резонатора 3мм, с 7-8 Вт до 12 Вт. А для МОЛД на 970нм и длиной резонатора 4мм, предельную мощность получилось поднять с 11 Вт до 15,5 Вт.

3.4 Предельные выходные параметры

Измерения предельной мощности МОЛД позволяют оценить предел их возможностей и определить их слабые места в конструкции. Такие измерения дают возможность выявить какие механизмы деградации себя быстрее проявят: КОД, внутренние дефекты или ошибки при монтаже. Несколько десятков диодов двух типов были подвергнуты экстремальным режимам работы, вплоть до выхода их из строя.

3.4.1. **Предельные выходные параметры МОЛД на 808нм**

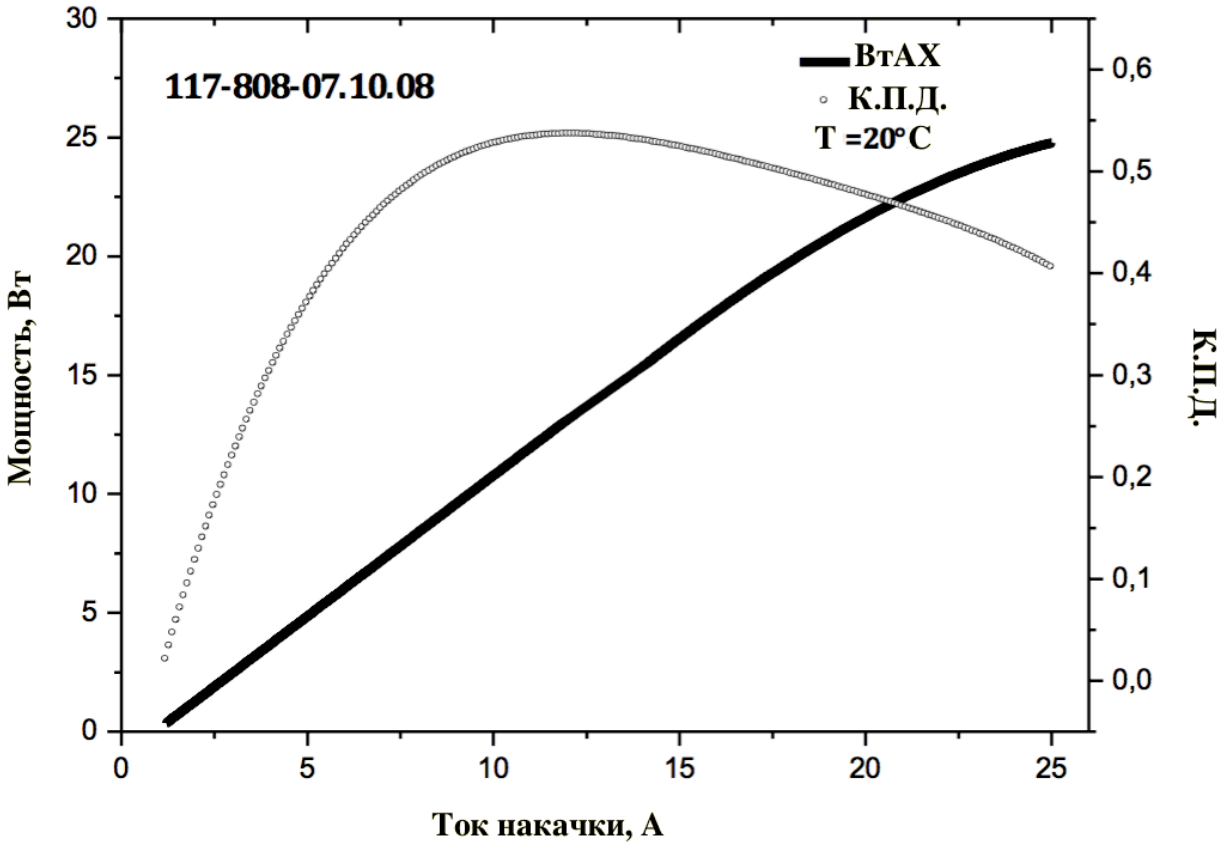


Рис.44 - ВтАХ и полный К.П.Д в предельном режиме.

Непрерывный режим, температура теплоотводящего элемента 20°C.

Собранные на С-маунт образцы МОЛД, с длиной резонатора 3мм, излучающие на длине волны 808нм, были подвергнуты предельным испытаниям. ВтАХ и к.п.д. такого образца приведены на Рис.44.

Для измерения мощности более 10 Вт и предельной мощности использована интегрирующая сфера, калиброванная до максимальной мощности 120 Вт., паспортный диапазон линейности измерительной схемы

10 – 120 Вт. Диапазон линейности измерений был нами проверен при измерении выходной мощности непрерывной лазерной линейки на мощности от 10 до 60 Вт. Калибровка интегрирующей сферы была дополнительно проверена на выходной мощности 10 Вт (верхнем пределе измерителя мощности Laser Mate фирмы Coherent и нижнем пределе диапазона линейности интегрирующей сферы). Калибровка этих приборов на мощности 10 Вт совпала в пределах 2 %. Максимальный полный К.П.Д лазера равен 53 % при токе накачки 13.3 А и мощности 14.5 Вт.. При температуре теплоотводящего элемента 20°С получена выходная мощность до 25 Вт, причем ВтАХ имела многократную повторяемость. Заметное отклонение ВтАХ от линейности наблюдалось на мощности более 12 Вт, что как видно соответствует значениям выходной мощности вблизи максимума К.П.Д.. Ширина полоскового контакта лазерного чипа составила 130мкм, поэтому полная предельная повторяемая выходная мощность 25 Вт и предельная мощность полученная с одного микрона активной среды около 0.2 Вт, что соответствует лучшим мировым достижениям для ЛД на длине волны 808нм.

3.4.2. **Предельные выходные параметры МОЛД на 970нм.**

Эксперимент, расчёт полного к.п.д. и определение критерия ресурсного режима

Рассмотрим экспериментальные результаты исследований выходных параметров на примере МОЛД на 970нм с шириной полоскового контакта 100 микрон и длиной резонатора 4мм, смонтированного в нашей лаборатории на стандартном теплоотводящем элементе типа С-маунт. В соответствии с ВтАХ и экспериментальной зависимостью полного к.п.д. в нестационарном непрерывном режиме Рис.45, выходная мощность 20 Вт достигается при токе накачки 23 А, соответствующее значение полного к.п.д. равно 46 %. Более реалистичная оценка полного к.п.д. при мощности 20 Вт была

получена при изучении температурных зависимостей полного к.п.д. в стационарном непрерывном режиме и их сравнении с расчётными значениями до тока накачки 20 А. При токе 20 А расчёт даёт значение 41 %, а коррекция на основе аппроксимации экспериментальных данных 35- 38 % для тока накачки 23 А, в соответствии с этим уровнем был выбран диапазон тепловых нагрузок при моделировании теплового режима на выходной мощности 20 Вт.

При достигнутом при монтаже на медные С-маунты уровне ресурсной выходной мощности 10 Вт, полном к.п.д. 50 %, ширине полоскового контакта 100 микрон и длине резонатора 4мм плотность теплового потока составляет 2.5. кВт /см^2. Увеличение выходной мощности до 20 Вт, согласно приведённым оценкам, влечёт за собой необходимость отвода непрерывных тепловых потоков плотностью 7.5 - 10 кВт/см ^{2}.

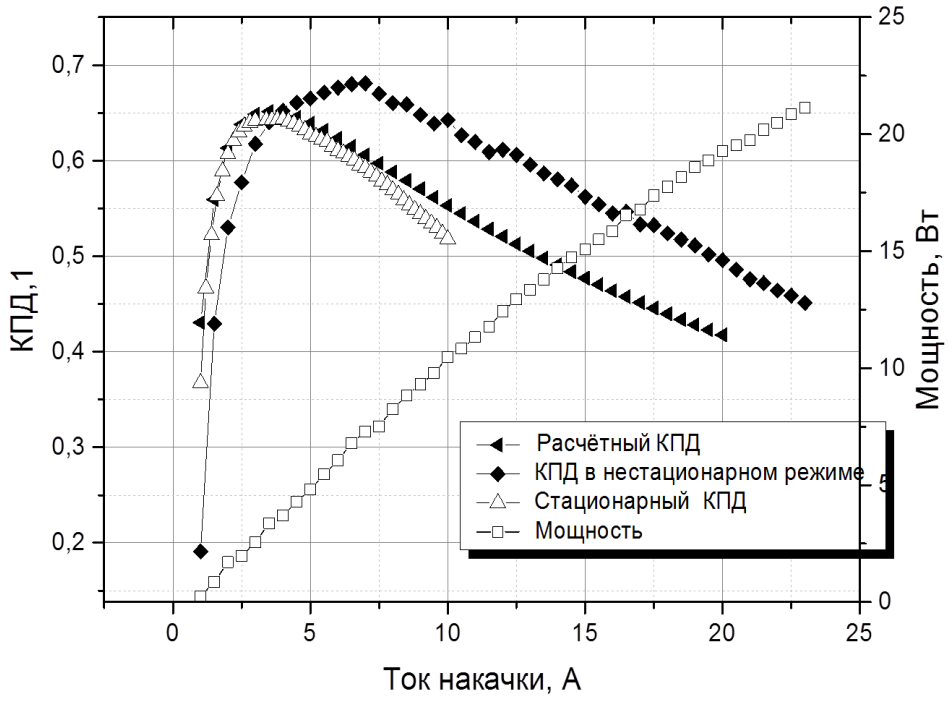


Рис.45 – ВтАХ и КПД: расчётный, в нестационарном режиме измерения и в стационарном, МОЛД излучающий на длине волны 970нм, смонтированный на С-маунте.

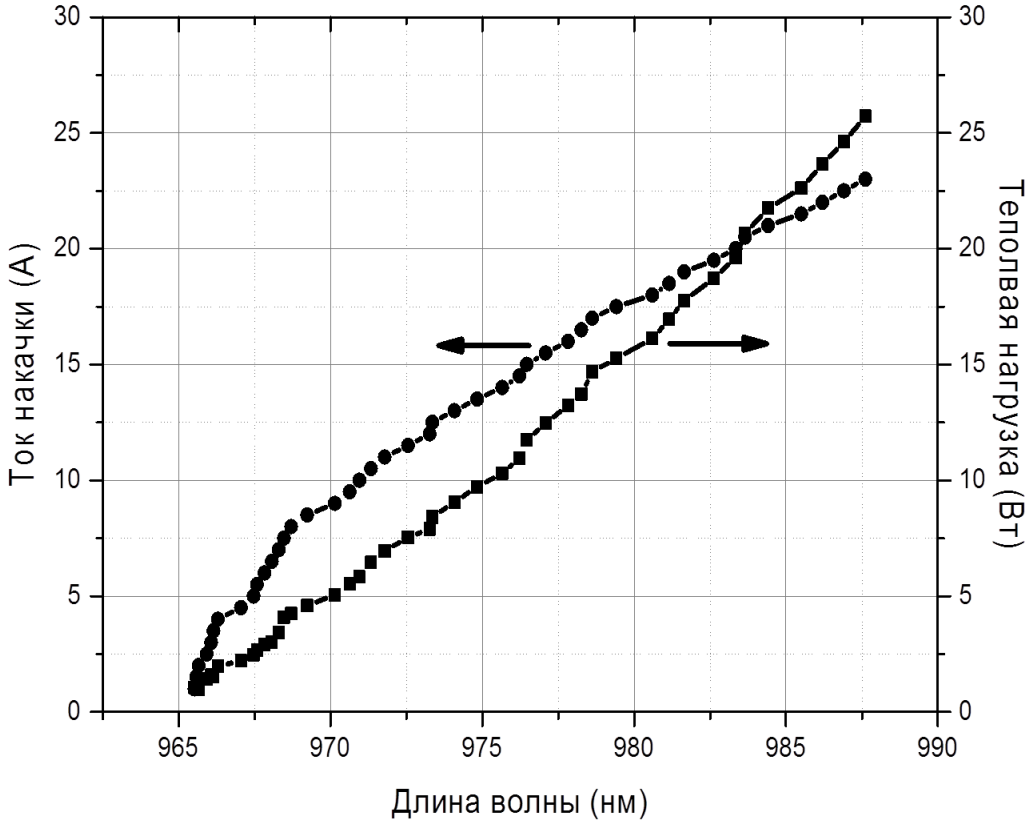


Рис.46 Изменение длины волны в максимуме огибающей спектра от тока накачки и тепловой нагрузки.

На Рис. 46 показана зависимость длины волны излучения в максимуме огибающей спектра от тока накачки и от тепловой нагрузки, определённой из экспериментальной базы данных по току накачки I_{pump} и напряжению U.

Зависимость длины волны в максимуме от тока накачки сверхлинейная в соответствии с квадратичной зависимостью джоулевых потерь от тока накачки ($I^2 \cdot R$), а зависимость длины волны от тепловой нагрузки от тока накачки, как и предполагалось, близка к линейной с тенденцией к небольшой сублинейности. Это небольшое отклонение от линейности частично связано с точностью определения максимума огибающей, которая падает при высоком уровне накачки из-за существенного уширения спектра и появления нескольких (2 -3 х) небольших пичков на максимуме огибающей вследствие некоторой нестационарности теплового режима в процессе измерений. Таким образом, при увеличении тока накачки от 0.5 до 23 А, спектральный сдвиг максимума огибающей в длинноволновую сторону составляет 25нм, оценка

перегрева активной области при токе 23 А даёт 83ºС, абсолютное значение температуры активной области при этом 103 ºС.

Важно отметить, что режим 10 Вт по данным испытаний является ресурсным для более чем 90% исследованных образцов, в режиме 11 Вт таких образцов менее 50 %, таким образом, из данных можно получить эмпирический критерий для получения долговременного непрерывного ресурсного режима при температуре базового теплоотводящего элемента 20ºС – перегрев активной области не должен превышать 20-25ºС.

3.4.3. Выводы

Для двух типов кристаллов, смонтированных на С-маунт, используя целый спектр различных технологий, от обработки ТОЭ до монтажа лазерного кристалла, удалось получить следующие предельные параметры. Для МОЛД на длину волны 808нм, резонатор 3мм, 25 Вт непрерывной мощности, и для МОЛД на длину волны 970нм, резонатор 4мм, 21Вт непрерывной мощности.

3.5. Исследование теплового сопротивления

Использование параметра «тепловое сопротивление» является общепринятым для оценки тепловых характеристик электронных приборов, этот термин по аналогии с электронными приборами и с соответствующей поправкой в определении, широко используется также для анализа тепловых параметров мощных лазерных диодов.

По определению для лазерного диода тепловое сопротивление R_{therm} вычисляется как:

$$R_{therm} = \Delta T / \Delta P_{therm} \qquad (9)$$

Формула 9 – Тепловое сопротивление,

где ΔT - приращение температуры, $P_{therm} = I \cdot U - P_{opt}$, тепловая часть от полной вложенной электрической мощности $P = I \cdot U$, за вычетом P_{opt} - оптической мощности. I - ток, U – напряжение.

Лазер преобразует вложенную энергию P пропорционально полному к.п.д. η_{tot} в когерентное оптическое излучение $P_{opt} = P \cdot \eta_{tot}$, т.е. тепловая нагрузка равна $P_{therm} = P \cdot (1 - \eta_{tot})$. В частности такое определение в явном виде использовано в работе [29].

Для определения температуры активного слоя в лазерной гетероструктуре используются спектральные измерения и известная для данного состава и толщины активного слоя зависимость длины волны излучения от температуры. Для лазерных диодов в спектральном диапазоне 970-980нм $\Delta\lambda / \Delta T = 0.3 - 0.33$нм/К, при расчёте мы использовали минимальное значение 0.3нм/К.

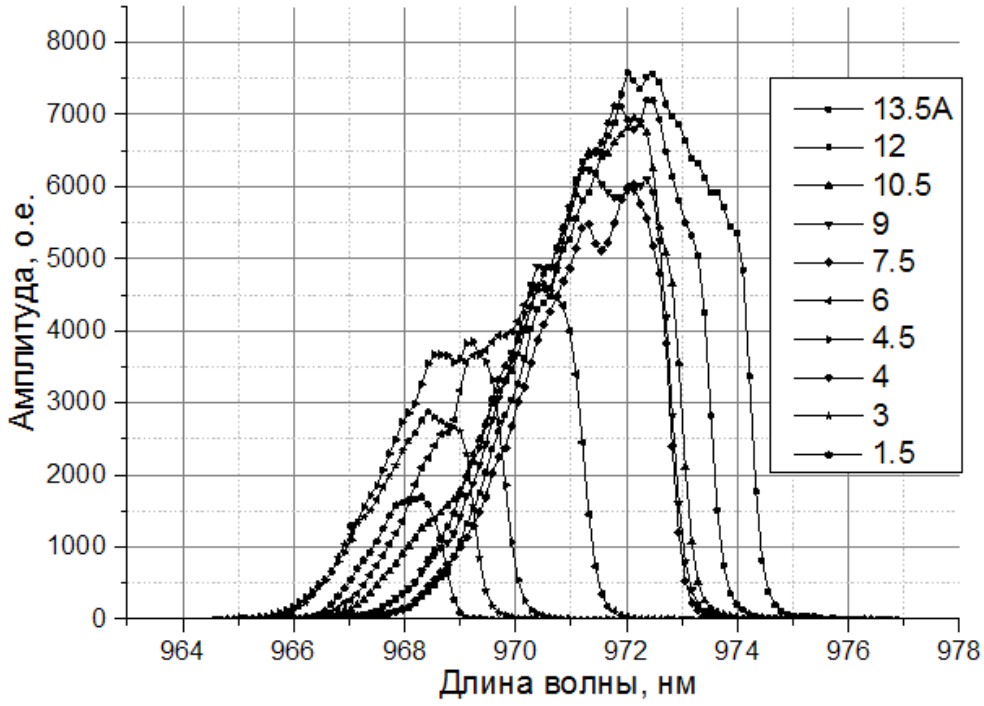


Рис.47 - Смещение спектра лазерного диода, при увеличения тока накачки.

Очевидно, что появление особенностей в спектрах излучения представленных на Рис.47 в виде локальных максимумов, а также существенное уширение спектральной огибающей осложняют задачу определения положения максимума и соответственно вычисление теплового сопротивления. Более того, если вычислять тепловое сопротивление на каждом шаге, то в определённых интервалах тока накачки мы наблюдали

такие изменения амплитуды в локальных максимумах на огибающей, когда преобладающим становился коротковолновой максимум.

Если в данном случае «доверить» обработку спектра стандартной компьютерной программе, то это приведёт к парадоксальным результатам, включая получение отрицательных значений теплового сопротивления на отдельных интервалах тока накачки. Мы полагаем, что при значительном уширении огибающей спектра и появлении указанных особенностей более адекватным является следующая методика. Стандартным программным методом определяется ширина спектра на половине высоты и за положение максимума принимается середина полученного отрезка на шкале длин волн.

Длина волны в максимуме огибающей, полученная при использовании такого подхода показана на Рис.48.

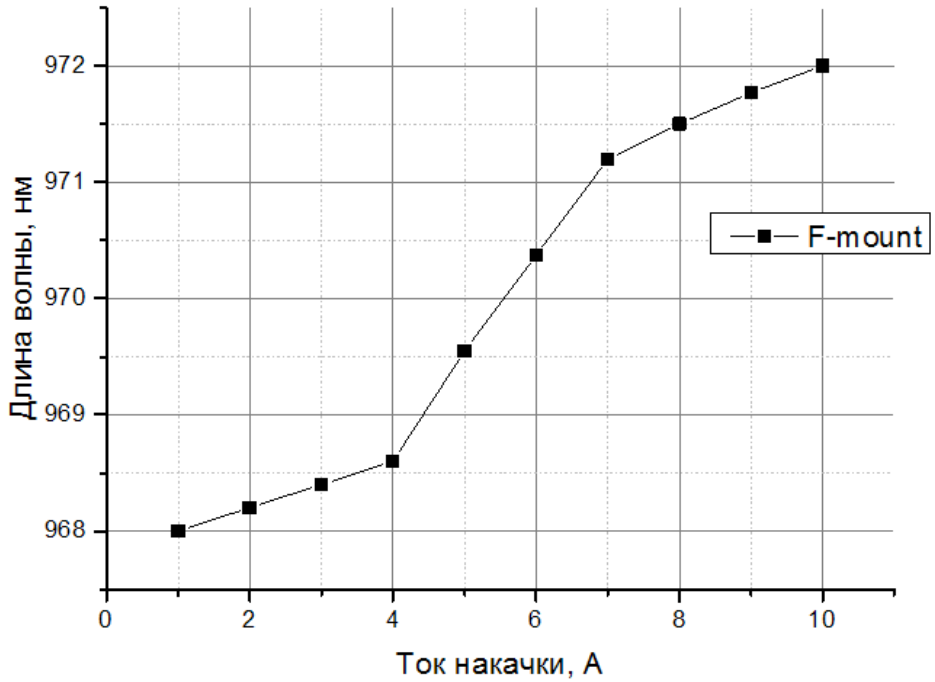


Рис. 48 - Зависимость длины волны излучения лазерного диода в максимуме огибающей спектра от тока накачки.

Характерной особенностью приведённой зависимости является возможность её достаточно точной аппроксимации тремя линейными участками с разным наклоном на интервалах тока накачки 1- 4 А, 4-7 А и 7-10 А.

3.5.1. Результаты измерений теплового сопротивления, сравнение с опубликованными данными

Полученные значения теплового сопротивления при различных токах накачки приведены на Рис. 49 . Для правильной интерпретации требуются некоторые пояснения. При определении теплового сопротивления в каждой точке по току накачки величины ΔT и ΔP_{therm} вычислялись как разности между их значениями в указанной точке и значением в начальной точке при токе накачки 1 А.

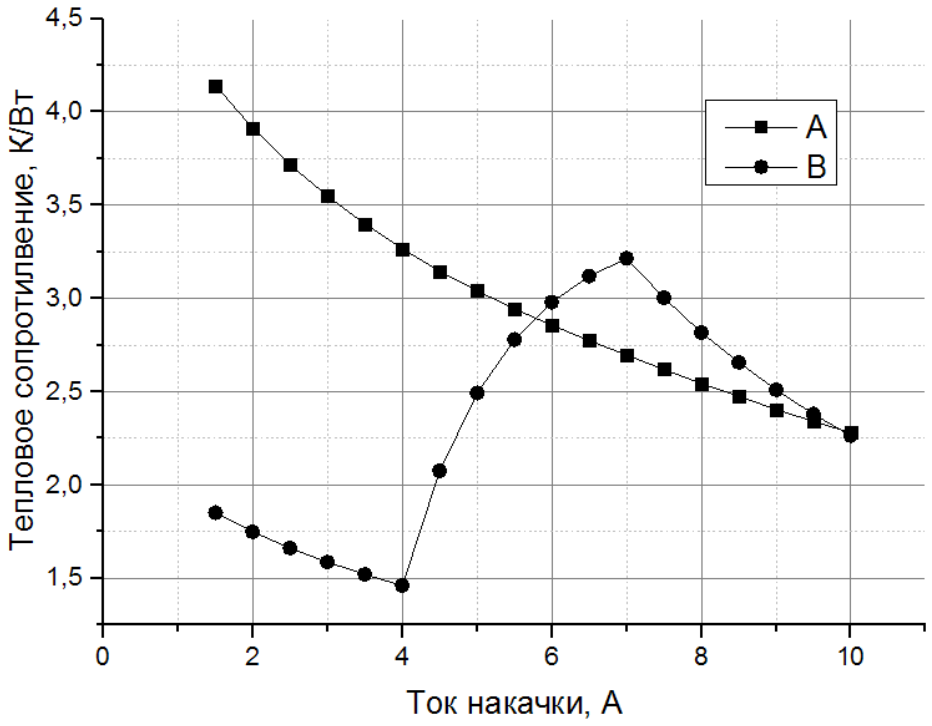


Рис. 49 -Зависимость теплового сопротивления лазерного диода от тока накачки. А – в предположении линейной зависимости от тока накачки длины волны в максимуме огибающей, В – экспериментальная кривая.

Кривая А, назовём её «идеальной», получена в предположении, что длина волны в максимуме во всём диапазоне изменяется линейно с током накачки, зависимость обратно пропорциональная в соответствии с определением теплового сопротивления, т.к. числитель зависит от тока линейно, а в знаменателе первый член растёт квадратично от тока накачки.

Кривая В построена с использованием реальной экспериментальной зависимости длины волны от тока накачки приведенной на Рис. 48. Три линейных участка зависимости на Рис.48 определяют наличие 3-х участков зависимости на Рис.49. Действительно, на первом участке к.п.д. растёт, соответственно тепловое сопротивление несколько снижается поскольку в общем тепловом балансе увеличивается доля излучаемой энергии. Между первым и вторым участком наблюдается минимум теплового сопротивления, далее при увеличении тока к.п.д. плавно снижается, доля «тепловой нагрузки» растёт, соответственно растёт тепловое сопротивление. На третьем участке экспериментальная кривая выходит на «идеальную» кривую, что коррелирует с насыщением зависимости к.п.д. при увеличении тока, а также свидетельствует о достаточной адекватности предложенного метода определения максимума спектральной огибающей. В работе [43] приведены данные о результатах измерений теплового сопротивления для лазерного диода на 980нм с длиной резонатора 4мм и шириной полоскового контакта 96мкм. При использовании сабмаунта на основе композита медь-алмаз получено тепловое сопротивление 2 К/Вт, при монтаже указанной конструкции на микроканальные охладители тепловое сопротивление снижено до рекордно низкого значения 1.5 К/Вт., что по всей видимости является пределом при существующих технологиях охлаждения и применяемых материалах сабмаунтов и теплоотводящих элементов. В работе [29] для С-маунтов и F - маунтов получены значения теплового сопротивления соответственно 4.25 К/Вт и 2.97 К/Вт.

Полученные нами результаты при монтаже лазерных кристаллов непосредственно на медные теплоотводящие элементы дают значения около

2.25 К/Вт при токе накачки 10 А, что незначительно уступает рекордным значениям [43] полученном с использованием композита медь-алмаз и существенно превосходит значение полученное в [29] . Отметим, что вблизи максимума к.п.д. при токе накачки около 4 А измеренное значение составляет около 1.5 К/Вт, равное рекордным значениям, приведённым в [43]. Считаем, что адекватное сравнение теплового сопротивления должно проводиться при одинаковом токе накачки. Полагаем, что полученные результаты свидетельствует о высоком качестве монтажа и высокой эффективности теплопередачи обеспечиваемыми разработанной нами технологией.

3.5.2. Выводы

Наиболее важный вывод очевиден – использование термина «тепловое сопротивление», и анализ тепловых параметров лазерных диодов на его основе допустимы. Однако для диодных лазеров такой подход очевидно нельзя считать строгим при изучении тепловых параметров вследствие того, что даже в рассмотренном «идеальном» случае тепловое сопротивление по определению зависит от выбранной для измерений рабочей точки по току накачки. Зависимость теплового сопротивления от тока накачки обратно пропорциональная, чем выше ток и соответственно чем больше выходная мощность, тем меньшие значения теплового сопротивления будут получены даже в «идеальном» случае линейной зависимости максимума длины волны от тока накачки. Вследствие этого очевидного факта следует проявлять осторожность при сравнении результатов полученных различными группами исследователей при различных уровнях накачки, а также при использовании различных материалов в качестве теплоотводящих элементов и применении различных схем охлаждения лазерных диодов. Наши эксперименты показывают, что при измерениях теплового сопротивления большую роль играет тип применяемой схемы охлаждения, в качестве которой могут использоваться радиаторы с кондуктивным отводом тепла, радиаторы с принудительным воздушным охлаждением, системы жидкостного

охлаждения – «чиллеры», а также термоэлектрические охладители, тепловые трубки, тепловые камеры и другие. Важную роль при измерениях играет расположение термодатчика относительно корпуса лазерного диода и относительно самого лазерного кристалла, а также параметры работы электронной системы термостабилизации.

Уширение спектров и появление особенностей в спектральной огибающей при высоких уровнях накачки (начиная от 5-6 кратного и до 15 кратного превышении над порогом генерации) ещё более осложняют адекватное определение положения максимума спектральной огибающей и вычисление теплового сопротивления. Предложен простой и логичный метод определения спектрального максимума и теплового сопротивления.

При использовании такого подхода, при высоком уровне накачки (15–ти кратном превышении над порогом генерации), экспериментальная зависимость теплового сопротивления практически совпадает с «идеальной», рассчитанной для линейной зависимости максимума спектральной огибающей от тока накачки.

3.6. Сравнение экспериментальных образцов лазеров смонтированных на ТОЭ типа С-маунт и F- маунт.

Из результатов трёхмерного моделирования, приведённых в Главе 2, следует, что F-маунт способен обеспечить тот же тепловой режим для лазерного кристалла при тепловой нагрузке в 35 Вт, что и С-маунт, но лишь при 25 Вт тепловой нагрузки, поскольку в этом случае F-маунта, тепловой поток от активного слоя лазерной гетероструктуры является более однородным по сравнению с тепловым потоком при использовании С-маунта. Тем самым, меняя лишь конструкцию ТОЭ, без изменения его материала или способов обработки, тепловая нагрузка может быть увеличена почти на 40%, при переходе от С-маунта к F-маунту. 40% -теоретически предельно возможная цифра. И необходимо учитывать, что речь идёт о тепловой нагрузке 25Вт и 35 Вт. Так как к.п.д. МОЛД при токах накачки,

соответствующих тепловой нагрузке 25 Вт и 35 Вт, падает существенно ниже 50%, то выигрыш в 40% оптической мощности ожидать не приходится. Учитывая относительную простоту замены ТОЭ, без использования сабмаунтов, этот метод для повышения ресурсной мощности является привлекательным и целесообразным.

3.6.1. ВтАХ и к.п.д. для МОЛД на С-маунте и F-маунте.

Лазерные диоды на длине волны 980нм с шириной полоскового контакта 100мкм были смонтированы непосредственно на медных теплоотводящих элементах типа F-маунт и С–маунт без использования промежуточных элементов (сабмаунтов). При эффективном охлаждении с помощью термоэлектрических модулей Пельтье, полученные лазеры на F-маунте устойчиво работали до мощности 20 Вт. Проведены испытания при выходной мощности 15 Вт в течение 100 часов показали, что в пределах точности измерений снижения мощности не наблюдается. Измеренный экспериментально К.П.Д. в максимуме составил 71.7 %, полный К.П.Д при номинальной выходной мощности 15 Вт составил 61 %.

Для монтажа использованы идентичные чипы лазерных кристаллов из одной партии и одного гель-пака. Они были смонтированы с использованием теплоотводящих элементов типа F- маунт и С – маунт с одинаковыми параметрами планарности и шероховатости рабочей и базовой теплоотводящих поверхностей. В экспериментах применялся один тип припоя одинаковой толщины и близкие тепловые режимы сборки.

С точки зрения технологии монтажа лазерного чипа, при переходе на другой тип теплоотводящего элемента существенных сложностей не возникло, за исключением того, что был незначительно скорректированы термоциклы сборки чипа с учётом отличной от С-маунта геометрии и более высокой теплоёмкости F –маунта, были также учтены его размеры при организации ламинарного потока инертного газа. Некоторые особенности были выявлены в зоне монтажа F-маунтов на базовый теплоотводящий блок.

Как показали детальные измерения локальной температуры проведенные с помощью микро-термодатчика при высоких тепловых нагрузках, в различных зонах конструкции F-маунта при использовании 2-х крепёжных винтов несколько сложнее обеспечить равномерный прижим и соответственно однородный тепловой контакт с базовым блоком термоэлектрического охлаждения чем при использовании 1 крепёжного винта, как в случае С-маунта. Обнаруженная особенность была учтена, повышена планарность и снижена шероховатость теплоотводящей поверхности базового блока, а также применён контроль усилия прижима отвёрткой с динамометрической головкой.

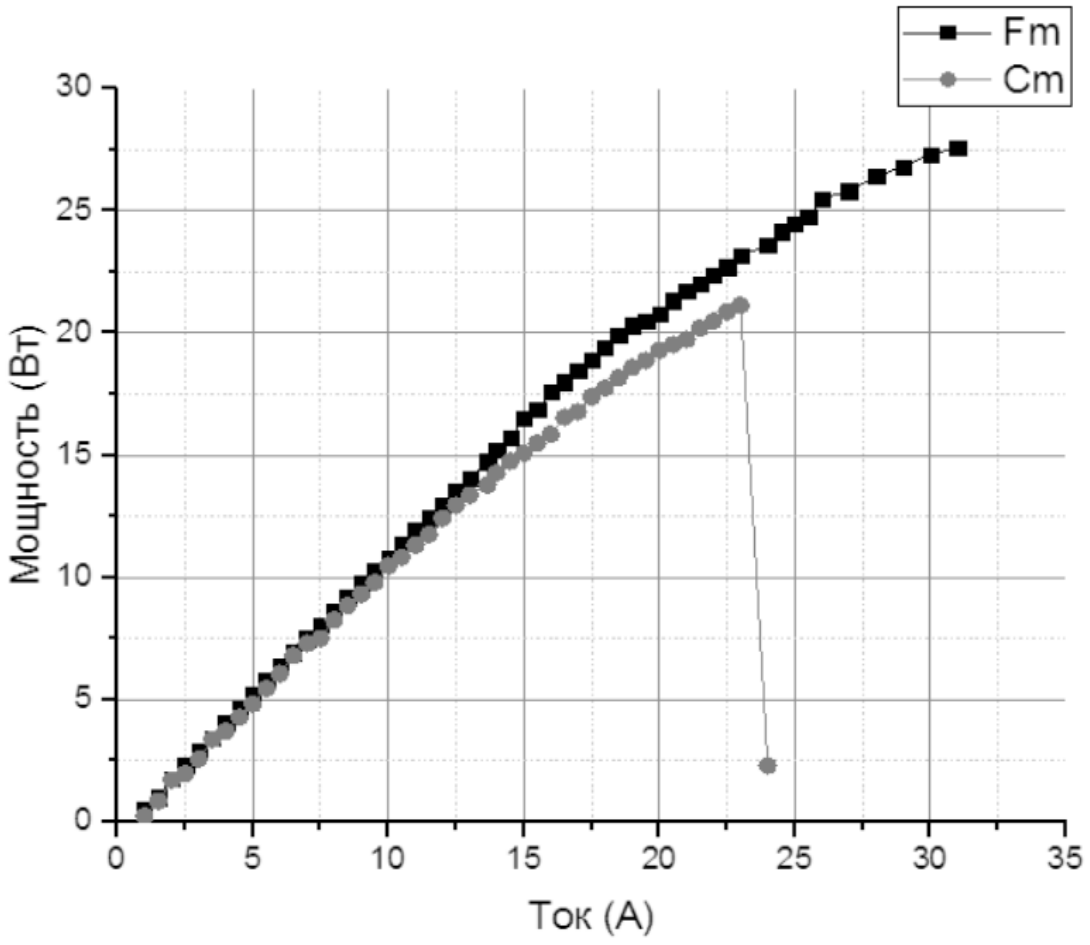


Рис.50 - Ватт - амперные характеристики образцов, собранных на С –маунте и F –маунте.

Очевидно, с точки зрения теплового режима, желательно уменьшение толщины теплоотводящих элементов типа F-маунт для снижения перепада температуры по его толщине, однако слишком тонкая пластина из пластичной меди при креплении 2 –мя винтами по краям испытывает деформацию и прогиб, что приводит к ухудшению отвода тепла в центре пластины, там, где расположен чип лазерного диода, из этих соображений оптимальная толщина F –маунта по нашим результатам составляет 2.5 - 3мм.

На Рис. 50 представлены ВтАХ МОЛД, смонтированных на С-маунте и F-маунте. Пороговый ток образцов практически одинаков, до мощности 10 Вт ВтАХ близки к линейным, не наблюдается существенных различий Ватт-амперных характеристик двух образцов, при этом наблюдается незначительное преимущество F –маунта по дифференциальной эффективности. По мере повышении тока накачки более 10 А и соответственно выходной мощности более 11 Вт, различия увеличиваются, обе ВтАХ становятся сублинейными. При мощности 20-21 Вт наблюдалась катастрофическая оптическая деградация (КОД) лазеров на С- маунте, лазеры на F- маунте работали до мощности 27-28 Вт, при этом ВтАХ многократно повторялась, максимальная выходная мощность воспроизводилась.

Таким образом, наиболее важный экспериментальный результат, представленный на Рис.50 – повышение максимальной мощности при использовании F – маунта. По нашему мнению, наряду с уменьшением средней температуры активного слоя, основную роль в повышении максимальной мощности играет, согласно [44] существенное снижение температуры выходного зеркала. Исследование выходного зеркала под микроскопом после 10 циклов испытаний до максимальной мощности не выявило видимых повреждений для образцов на F- маунте, в то время как для С–маунтов зеркала имели характерные для КОД повреждения.

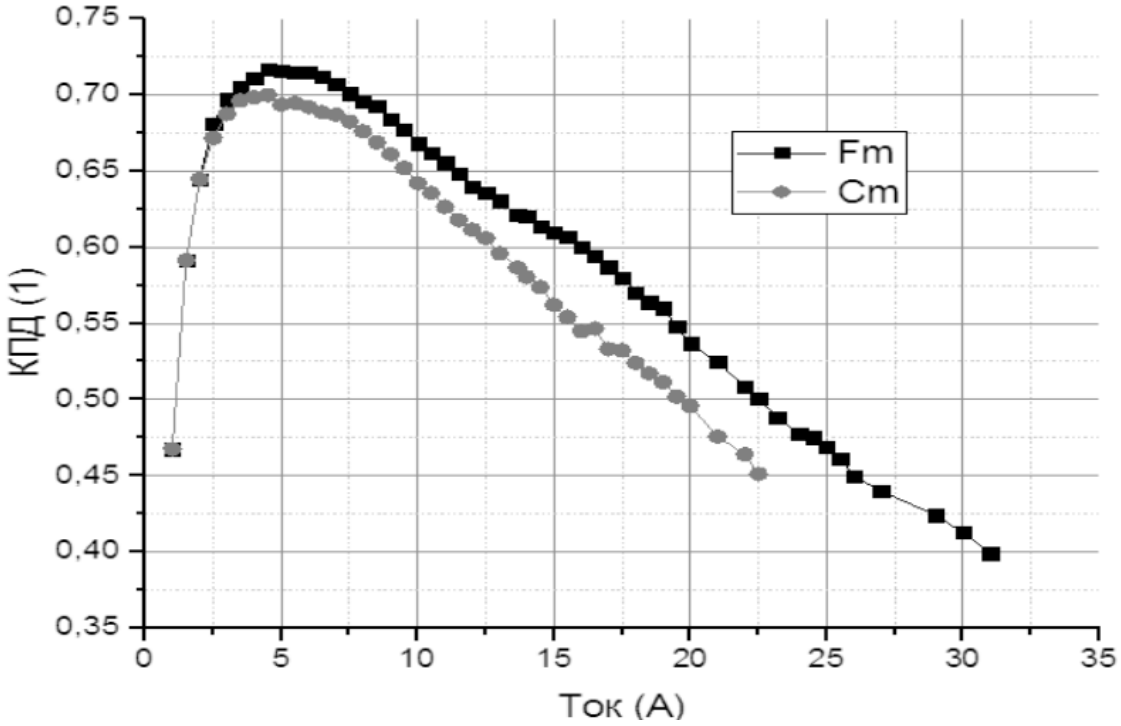


Рис. 51 - Экспериментальный к.п.д. для лазерного диода излучающего на длине волны 970нм и длиной резонатора 4мм, смонтированного на C- маунте и F-маунте.

На Рис. 51 представлены фактически экспериментальные зависимости полного К.П.Д лазеров смонтированных на C-маунте и F-маунте от тока накачки, рассчитанные по экспериментальным ватт-амперным и вольт-амперным характеристикам. Сравнивая полученные результаты, можно отметить следующие моменты. При токах накачки до 3 А кривые для К.П.Д практически совпадают, т.к. тепловой режим при малой тепловой нагрузке отличается незначительно. Токи накачки $I_{max,}$ при которых наблюдается максимум (10) полного К.П.Д. η_{tot}^{max} согласно [45] равны:

$$\eta_{tot}^{\max} = \frac{\eta_d J E_g}{I_{\max}(U_{th} + R_s J)} \quad (10)$$

$$J = \sqrt{I_{th} U_{th} / R_s} \quad (11)$$

$$I_{\max} = I_{th} + J$$

где в (10) и в (11) I_{th} – пороговый ток, U_{th} – напряжение на пороге генерации, R_s – последовательное сопротивление лазерного диода. η_d – дифференциальная эффективность, E_g –ширина запрещённой зоны. Экспериментальные значения этих токов I_{max}, как следует из Рис.51, несколько различаются, для монтажа на F -маунте $I_{max} = 5$ А, для монтажа на С- маунте $I_{max} = 4.5$ А, что в соответствии с (11) может свидетельствовать о более низком последовательном сопротивлении лазерного чипа при монтаже на F-маунте, т.к. пороговые токи и пороговое напряжение для этих лазеров практически равны ввиду того, что эти параметры измеряются при незначительной тепловой нагрузке.

Более высокий максимальный к.п.д. при монтаже на F-маунте согласно (10) может быть объяснён также более высокой дифференциальной эффективностью благодаря более эффективному отводу тепла в случае монтажа на F – маунте. При увеличении тока накачки, согласно данным на Рис.51, прослеживается тенденция к увеличению разницы в к.п.д., что также ожидаемо, т.к. увеличивается тепловая нагрузка. При выходной мощности 15 Вт значения к.п.д. составили 61 % и 56 % соответственно для F и C маунтов.

При повышении тепловой нагрузки более явно проявляется отличие в эффективности и равномерности отвода тепла, при этом для F-маунта обеспечивается значительное уменьшение перепада температуры по длине кристалла, что особенно актуально для больших длин лазерного резонатора, в том числе в нашем случае, когда длина резонатора равна 4мм. Вероятно, именно это преимущество F-маунта проявляется в повышении максимальной мощности благодаря, как снижению температуры выходного зеркала, так и градиента температур между глухим и выходным зеркалами.

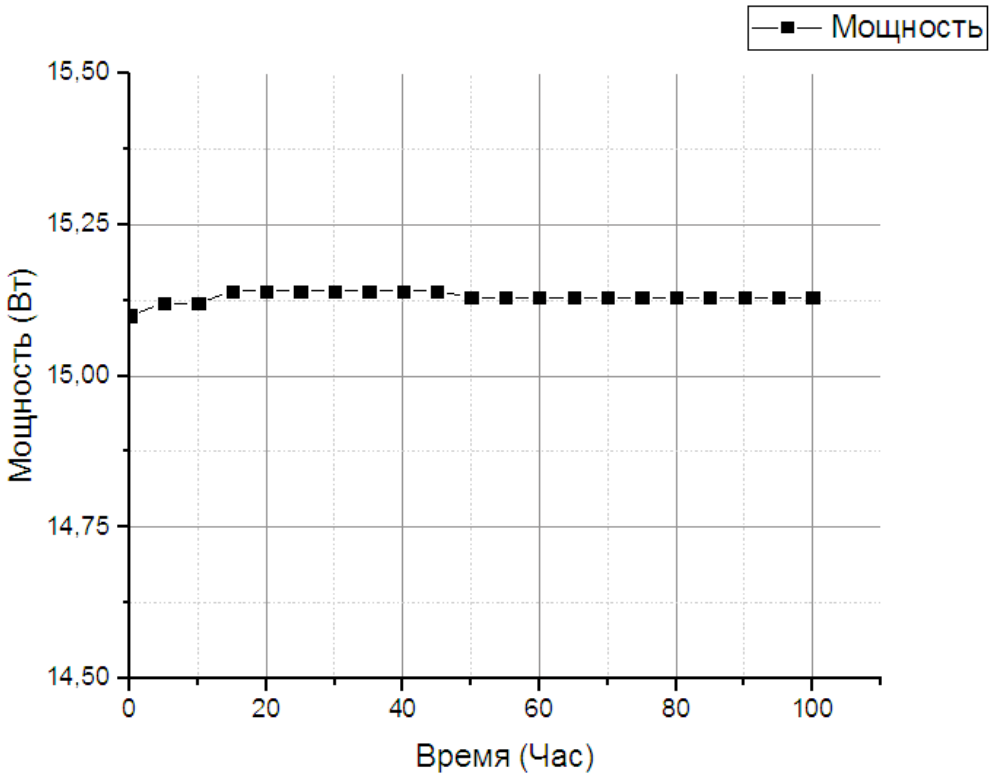


Рис. 52 - Ресурсные испытания МОЛД, смонтированного на F-маунте без сабмаунта, на мощности 15 Вт без её изменения в течении 100 часов.

На Рис.52 показаны результаты контроля мощности при испытании лазерного диода, смонтированного на F-маунте в течении 100 часов на мощности 15 Вт. В первые 15 часов наблюдалось небольшое увеличение мощности, затем незначительные колебания, после этого при наработке 50 часов наблюдалась стабилизация на уровне 15,1 Вт.

3.6.2. Выводы

Изготовлены экспериментальные образцы мощных лазерных диодов собранные на теплоотводящих элементах типа С-маунт и F –маунт. на основе идентичных чипов на длине волны 980нм с шириной полоскового контакта 95мкм и длиной резонатора 4мм. Получено увеличение максимальной выходной мощности от 21 Вт при монтаже на С-маунте до 28 Вт на F-маунте. При монтаже непосредственно на медном F-маунте без сабмаунтов получена стабилизация выходной мощности на уровне 15 Вт в течение 100 часов испытаний, при удельной мощности 0,16Вт/мкм, что на 30% выше мирового уровня.

Глава 4. Прогнозирование срока службы и поиск методов восстановления параметров

4.1. Ресурсные испытания

Заключительным этапом, проверяющим качества и надёжность изготовленных образцов являются ресурсные испытания.

Стандартные методы оценки качества изготовленных мощных лазерных диодов (МОЛД) включают в себя предварительные измерения параметров (т.н. параметры на первом измерении), кратковременные испытания, именуемые тренировкой (обычно около 100 часов) и долговременные испытания (до 1000 часов). Предварительные измерения проводятся на всех без исключения образцах, кратковременные испытания проводятся обычно на образцах, отобранных по данным предварительных измерений, образцы не прошедшие предварительные измерения, как правило, бракуются. Долговременные испытания проводятся на произвольной выборке образцов, прошедших кратковременные испытания.



Рис.53 - Ресурсный стенд LDT-10

Ресурсные испытания проводились на ресурсных стендах фирмы IPG-GROUP, Рис.53. Номиналы токов и количество позиций: на стенде LDT-6 до 6А, 36 штук и на LDT-10 до 10А, 18 штук. Стенды позволяли в режиме

реального времени получать данные о выходной мощности лазерных диодов и фиксировать их в памяти ПК. Температура термостабилизации плиты радиатора стенда при ресурсных испытаниях для всех образцов составляла 30 ºС.

Используемая нами методика для проверки ресурсных параметров лабораторных образцов различной мощности и конструкций является идентичной для всех мощных диодных лазеров. После первых измерений выходных параметров и визуального контроля, исключающих очевидные дефекты, образцы поступают на кратковременную ресурсную наработку. Экспериментальные образцы, или один образец помещается в посадочное гнездо ресурсного стенда, где лицевой стороной он прижимается к теплосъемной плите, за счёт давления на заднюю грань прижимного винта оканчивающегося площадкой на шарнире. Излучение диода попадает через отверстие в теплосъёмной плите на вмонтированный, откалиброванный фотодиод, для учёта изменения выходной мощности за время наработки. Теплосъёмная плита поддерживается при температуре около 30˚С. В одном ряду находится 6 посадочных место для диодов, соединённых последовательно. Новые экспериментальные образцы в зависимости от стабильности их параметров проходят несколько ступеней повышения постоянного тока накачки. Обычно проверка начинается примерно с половины желаемой ресурсной мощности. В зависимости от колебаний мощности или при их отсутствии переход к большей мощности может происходить за несколько часов или за сутки испытаний.

Разработанная по итогам долгих лет исследований и опыта производства технология изготовления мощных лазерных диодов позволяет не испытывать МОЛД в течение многих сотен и тысяч часов, а полагаться только на результаты тренировки и выборочные натурные испытания. Мотивация такова — долговременные натурные испытания заведомо надёжных приборов «крадут ресурс» у потребителя и неоправданно повышают стоимость приборов, однако в ряде случаев, например для

подводных линий связи, 100 % образцов проходят натурные испытания в течение 1000 и более часов.

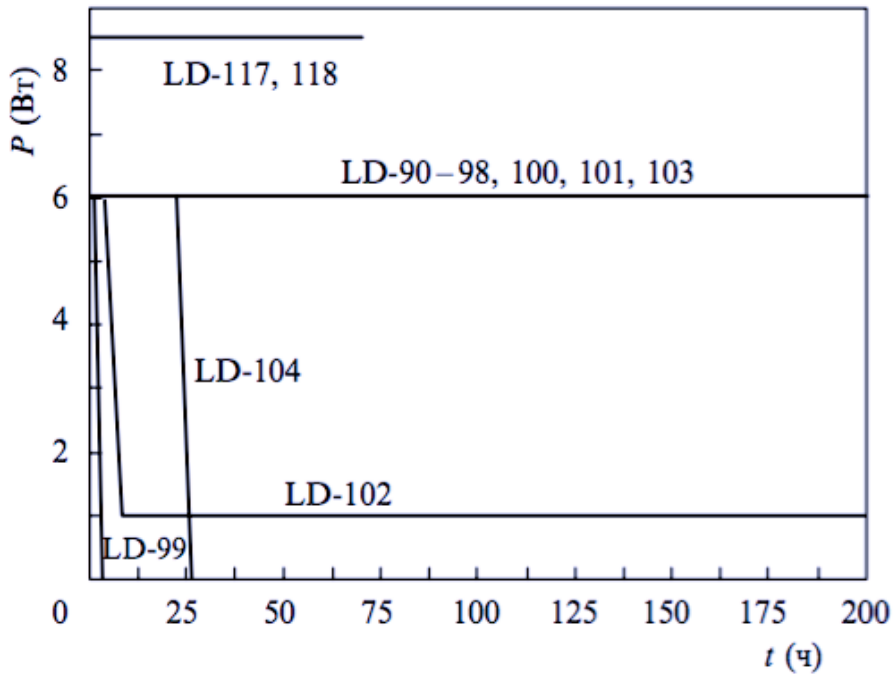


Рис.54 - Ресурсные испытания собранной экспериментальной партии из 16 штук диодных лазеров.

Как показано на Рис.54, разработанная технология монтажа и методика испытаний позволяет выявить основную часть отказов диодных лазеров за первые 30-50 часов. Последующие испытания этих МОЛД, успешно прошедшие испытания, в течение 200 часов и 500 часов показали устойчивую работу с незначительными колебаниями мощности, что для применений в системах накачки твердотельных лазеров и для медицинских аппаратов вполне достаточно. Указанные результаты доказывают, что достаточно испытывать 100 % изготовленных МОЛД в течение 100 часов. Указанный вывод не универсален, он касается только разработанной нами технологии сборки МОЛД, включающей комплектующие, оборудование, условия чистой зоны, состав припоев, термоциклы и множество других параметров.

4.2 Метод восстановления параметров

Накопленные нами экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в ряде случаев указанная методика выявления годных образцов МОЛД может быть в некоторых случаях пересмотрена. В частности это касается МОЛД, изготовленных из напряжённых гетероструктур, в которых вследствие рассогласования параметров кристаллических решёток активной области (квантоворазмерного слоя) и волноводного слоя, активная область подвергнута напряжению растяжения или сжатия.

В данной работе были исследованы образцы ЛД на длине волны 808нм, изготовленные из гетероструктур GaAsP/AlGaAs/GaAs с одной квантоворазмерной активной областью GaAsP находящейся в состоянии растяжения. Мы полагаем, что приведенные ниже результаты свидетельствуют о возможности и целесообразности пересмотра указанных выше методик по отношению к лазерам на основе напряжённых гетероструктур GaAsP/AlGaAs/GaAs и возможно на основе других типов напряженных гетероструктур и разработки реальной методики восстановления параметров ЛД не прошедших первоначальные тесты. После набора необходимых статистических данных и проведения ресурсных тестов таких образцов мы надеемся, что применение новой методики сделает возможным повышение выхода годных ЛД.

Ватт –амперные характеристики типичной серии из 11 ЛД, отобранных по результатам. Всего в данной серии было собрано 14 образцов. Три образца были забракованы, поскольку наклон их ватт-амперной характеристики (ВтАХ) на первом измерении был существенно (в 1,5 - 2 раза) меньше, чем для ВтАХ ЛД.

Первое наблюдение, на которое мы обратили внимание, анализируя параметры отобранных из нескольких партий сборки, как годные на первом измерении ЛД, заключается в том, что в процессе кратковременных испытаний (наработка около 100 часов) выходная мощность немного

возрастает, причём в большей степени у тех МОЛД, у которых на первом измерении она была ниже, чем на лучших образцах.

Обычно прирост мощности на таких образцах находился в диапазоне 0.1 – 0.3 Вт и происходил в течение первых 24 часов наработки, после 100 часов наработки на токе 8 А однородность параметров ЛД по кривым ВтАХ для всех образцов возрастала, приближаясь к ВтАХ лучших образцов МОЛД (контрольная точка 8А / 8 Вт). Традиционно наблюдаемое явление трактовалось нами ранее как процесс «приработки» контактов и контактной металлизации.

Также неоднократно наблюдались на некоторых МОЛД значительные колебания мощности при первом измерении и предварительных измерениях спектров излучения, дальних зон излучения и других выходных параметров, а также на первом этапе кратковременных испытаний. Такие образцы квалифицировались как потенциально ненадёжные, снимались с испытаний и браковались. Высказывались предположения, что нестабильность параметров может быть обусловлена «мостиками» или «закоротками» припоя, попавшего в процессе сборки на боковые грани или зеркала чипов лазерных кристаллов.

Иногда удавалось идентифицировать такие дефекты сборки при изучении паяного соединения собранного ЛД в сканирующем электронном микроскопе.В ряде случаев ВтАХ МОЛД имели низкую эффективность, но нам не удалось наблюдать дефекты сборки и выбросы припоя на зеркалах или боковых гранях чипа. Заметим, что на боковых гранях чипов, имеются канавки, покрытые диэлектриком, они играют существенную позитивную роль в предотвращении короткого замыкания мостиками припоя, возникающими при сборке, а также явлений «ползучести» припоя иногда наблюдаемых при работе лазера, в особенности на «мягких» припоях типа индия. Мы предположили, что причина наблюдаемого явления кроется в объёме лазерного кристалла. Также было замечено, что подобные явления в

значительно большей степени наблюдаются в ЛД на длине волны 808нм по - сравнению с ЛД на длинах волн 980нм и 1060нм.

На Рис.55 приведены две ВтАХ одного из забракованных ЛД, снятые сразу после сборки и после 24 часов наработки.

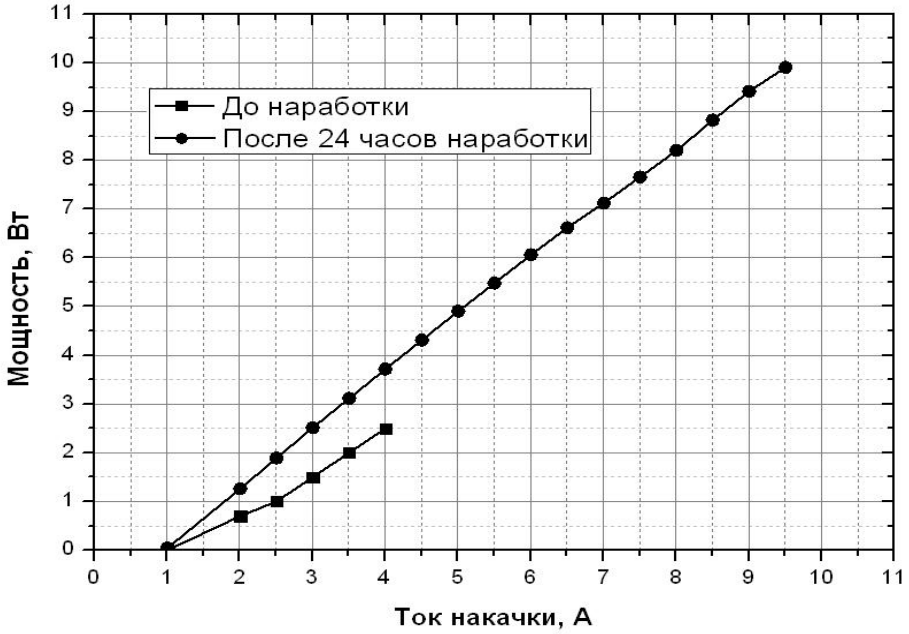


Рис.55 - ВтАХ ЛД на первом измерении после наработки и после 24 часов наработки.

На первом измерении данный образец ЛД показал мощность 2.5 Вт при токе 4 А, а его спектр излучения свидетельствовал о перегреве активной области. Было установлено, что дальнейшее увеличение тока накачки в образцах аналогичных приводит к насыщению мощности на уровне 3 - 5 Вт и последующей необратимой деградации ЛД при увеличении тока накачки.

Мы попытались восстановить параметры исследуемого и подобных ему образцов. Для этого был проведен низкотемпературный кратковременный отжиг, после которого ЛД был поставлен на измерительный стенд при токе накачки 4 А.

После 24 часов наработки, как видно из Рис.55, пороговый ток уменьшился, наклон ВтАХ значительно возрос, выходная мощность составила 10 Вт при токе 9.6 А, что соответствует параметрам лучших

образцов, причём в течение следующих 24 часов наработки параметры данного образца ЛД практически не изменились в пределах точности измерений. Таким образом, обнаружена возможность восстановления излучательных параметров забракованных образцов. Для исследования данного эффекта было написано новое программное обеспечение для управления измерительным стендом, позволяющее фиксировать основные излучательные параметры (ВтАХ, ВАХ, спектры излучения) с небольшим интервалом времени.

Главный и позитивный результат заключается в том, что образцы лазерных диодов или, по крайней мере, часть этих образцов, ранее считавшихся браком (предположительно из-за дефектов гетероструктуры, операций процессинга чипа лазерного кристалла и сборочных операций), могут полностью восстановить свои излучательные параметры в процессе наработки в течение 20-50 часов. Как установлено, в отдельных случаях их параметры могут быть почти полностью восстановлены без наработки путём кратковременного низкотемпературного отжига лазерных чипов перед сборкой. Более эффективно восстановить параметры можно комбинацией метода отжига и наработки в правильно выбранной рабочей точке (наиболее эффективно выбрать рабочую точку в области перехода линейного участка ВтАХ в участок насыщения мощности).

Одной из возможных причин наблюдаемых явлений является механизм безизлучательной рекомбинации, приводящей к увеличению порогового тока и падению внешней дифференциальной квантовой эффективности ЛД. В процессе наработки в течение 10 -50 часов или в результате отжига в определённых условиях, по крайней мере, на части образцов собранных ЛД, в той и иной степени канал или каналы безизлучательной рекомбинации, вероятно ассоциированные с дефектами, нейтрализуются, в пользу чего свидетельствует синхронный рост напряжения и мощности. Одной из возможных причин наличия центров безизлучательной рекомбинации может быть присутствие в

полупроводниковой гетероструктуре водорода и дейтерия, попадающих в гетероструктуру при процессе роста. Источником водорода и дейтерия может быть газ – носитель (как в процессе МОС–гидридной эпитаксии), а также арсин и фосфин, применяемые как источники фосфора и мышьяка. Необходимо отметить, что в классической технологии молекулярно–пучковой эпитаксии водород не используется, но во многих случаях в современных её модификациях он также используется либо присутствует в применяемых при росте соединениях. Водород, как известно [46-48], может образовывать комплексы с дефектами полупроводников, такими, как вакансии элементов 5 группы, кроме того он может вести себя в полупроводниках как амфотерная примесь. В гетероструктуре GaAsP/AlGaAs/GaAs в активной области присутствует фосфор, кроме того имеется напряжение растяжения, что может служить причиной наблюдаемых явлений. Водородные комплексы, связанные с вакансией фосфора нестабильны, вследствие чего они могут разрушаться под воздействием температуры, тока накачки и оптической мощности внутри резонатора.

Полученных результатов явно недостаточно для выяснения причин наблюдаемых явлений. Для изучения и понимания механизмов происходящих процессов требуются современные методы исследований, такие как специальная инфракрасная спектроскопия [46] (LVM - local vibrational mode spectroscopy) и спектроскопия глубоких уровней [47].

4.2. Выводы.

Установлено, что комбинацией методов кратковременного низкотемпературного отжига и наработки в правильно выбранной рабочей точке ВтАХ, параметры первоначально забракованных образцов могут быть восстановлены до уровня лучших образцов в серии. Несколько таких ЛД успешно прошли кратковременные испытания в течение 100 часов. Изучение физических механизмов обнаруженных процессов представляет значительный научный и практический интерес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы были проведены теоретические исследования по моделированию к.п.д. и численному расчёту тепловых потоков в мощных инжекционных лазерах на основе трёхмерной модели. На основе данных расчетов были получены оптимальные параметры для различных конструкций МОЛД, в том числе с использованием сабмаунтов с высокой теплопроводностью. На основе полученных результатов были разработаны технологии создания экспериментальных образцов МОЛД, изучены и улучшены их параметры.

Результаты работы в данный момент защищены патентом РФ № 2582302, и внедряются на предприятии НПП «Инжект», город Саратов, в рамках соглашения с Минобрнауки РФ.

ПОЛОЖЕНИЯ ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

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˚С обеспечивает непрерывную ресурсную мощность 15 Вт от лазерного диода с шириной полоскового контакта 95мкм на длине волны 970нм без использования термокомпенсаторов.

3. Тепловое сопротивление лазерного диода зависит от уровня возбуждения, поэтому при анализе и сравнении тепловых параметров различных конструкций на базе такого подхода 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 808нм забракованных по результатам первого измерения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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 (4х2х0,3мм) 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 808нм от лазера с шириной полоскового контакта 130мкм при монтаже на медном С-маунте, и 27 Вт на длине волны 970нм, от лазера с шириной полоскового контакта 95мкм 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 гетероструктуры, 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 95мкм на длине волны 970нм.
7. Обнаружен и описан эффект восстановления параметров мощных лазерных диодов спектрального диапазона 808нм на основе разработанной, имеющей практический интерес оригинальной комбинированной методики температурно-токовой тренировки.
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 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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность коллективу группы полупроводниковых лазеров НФО ФИАН и её руководителю Юрию Михайловичу Попову. Отдельная благодарность научному руководителю Виктору Владимировичу Безотосному за передачу уникальных знаний в области лазерной физики и технологии.

Работа выполнена при поддержке Соглашения № 14.575.21.0047 с Минобрнауки РФ, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях:

1. Безотосный В.В., Бондарев В.Ю., Кривонос М.С., Олещенко В.А., Попов Ю.М., Чешев Е.А. «Мощные лазерные диоды спектрального диапазона 808нм и 980нм», Краткие сообщения по физике физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. 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 808нм», 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 однополосковых лазерных диодов диапазона 800-808нм 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 808нм 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 808нм 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 980нм», 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 физического института им. П.Н. Лебедева российской академии наук. 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 980нм 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 976нм и мощностью 15 Вт», Квантовая электроника. 2016, т.46. №8. с. 679-681.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “Skin Tightening in Lipoplasty following Security Parameters for Use of the Diode Laser with Double Wavelength 924 nm and 975 nm” Wolfenson, Moises; Norberto dos Santos Filho, Fernando CerqueiraPLASTIC AND RECONSTRUCTIVE SURGERY Том: 130 Выпуск: 1 Стр.: 235E-236E JUL 2012
2. ”Endovenous laser ablation of great saphenous veins using a 1470 nm diode laser and the radial fibre - follow-up after six months”. Arnez, A.; Kiser, R.; Lakhanpal, et al. S 2011;26:35-9.PHLEBOLOGY Том: 27 Выпуск: 2 Стр.: 101-101
3. “Evaluation of the vacuum-assisted handpiece compared with the sapphire-cooled handpiece of the 800-nm diode laser system for the use of hair removal and reduction»Xia, Yang; Moore, Rachael; Cho, Sunghun et al. JOURNAL OF COSMETIC AND LASER THERAPY Том: 12 Выпуск: 6 Стр.: 264-268
4. ”Lipolysis Using a 980-nm Diode Laser: A Retrospective Analysis of 534 Procedures” Reynaud, Jean Pascal; Skibinski, Martine; Wassmer, Benjamin; et al. AESTHETIC PLASTIC SURGERY Том: 33 Выпуск: 1 Стр.: 28-36
5. “High power diode laser surface melting of SUS 420F steel: investigations on the microstructural, and mechanical properties”. Sivanandham, N.; Rajadurai, A.; Shariff, S. M.; et al. INTERNATIONAL JOURNAL OF SURFACE SCIENCE AND ENGINEERING Том: 10 Выпуск: 1 Стр.: 11-26
6. «High-Power Diode Laser-Treated 13Cr4Ni Stainless Steel for Hydro Turbines”. Mann, B. S. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE Том: 23 Выпуск: 6 Стр.: 1964-1972
7. “Microstructure and mechanical properties of high power diode laser (HPDL) treated cast aluminium alloys”. Labisz, K. MATERIALWISSENSCHAFT UND WERKSTOFFTECHNIK Том: 45 Выпуск: 4 Стр.: 314-324
8. “High-Power Diode Laser Surface Treated HVOF Coating to Combat High Energy Particle Impact Wear”. Mann, B. S.; Arya, Vivek; Pant, B. K. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE Том: 22 Выпуск: 7 Специальный выпуск: SI Стр.: 1995-2004
9. “Microstructure, microhardness and corrosion resistance of remelted TiG2 and Ti6Al4V by a high power diode laser”. Amaya-Vazquez, M. R.; Sanchez-Amaya, J. M.; Boukha, Z.; и et al. CORROSION SCIENCE Том: 56 Стр.: 36-48
10. “Field-deployable diode-laser-based differential absorption lidar (DIAL) for profiling water vapor”. Spuler, S. M.; Repasky, K. S.; Morley, B.; et al. ATMOSPHERIC MEASUREMENT TECHNIQUES Том: 8 Выпуск: 3 Стр.: 1073-1087.

11. “Eye-Safe Diode-Laser-Based Micropulse Differential Absorption Lidar (DIAL) for Water Vapor Profiling in the Lower Troposphere”. Nehrir, Amin R.; Repasky, Kevin S.; Carlsten, John L. JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY Том: 28 Выпуск: 2 Стр.: 131-147
12. “Water Vapor Profiling Using a Widely Tunable, Amplified Diode-Laser-Based Differential Absorption Lidar (DIAL)”. Nehrir, Amin R.; Repasky, Kevin S.; Carlsten, John L.; et al. JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY Том: 26 Выпуск: 4 Стр.: 733-745
13. “Quantum dot diode lasers for optical communication systems”. Zhukov, A. E.; Kovsh, A. R. QUANTUM ELECTRONICS Том: 38 Выпуск: 5 Стр.: 409-423
14. “Free space optical wireless communications using directly modulated two-electrode high brightness tapered laser diode”.Feng, Feng; Page, H.; Penty, R. V.; et al. ELECTRONICS LETTERS Том: 48 Выпуск: 5 Стр: 281-U1582
15. “Thermal Characterization of a Laser Diode and Its Peltier Cooler for Optical Communications: Measurements and Predictive Modeling”. Fontaine, Maxime; Paris, Bertrand; Grard, Emmanuel; et al. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY Том: 3 Выпуск: 8 Стр.: 1342-1347
16. “High-Power Continuous-Wave Directly-Diode-Pumped Fiber Raman Lasers”. Yao, Tianfu; Harish, Achar V.; Sahu, Jayanta K.; et al.APPLIED SCIENCES-BASEL Том: 5 Выпуск: 4 Стр.: 1323-1336
17. “All-optical Q-switching limiter for high-power gigahertz modelocked diode-pumped solid-state lasers”. Klenner, Alexander; Keller, Ursula. OPTICS EXPRESS Том: 23 Выпуск: 7 Стр.: 8532-8544
18. “Diode-pumped continuous-wave and femtosecond Cr:LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet”. Demirbas, Umit; Baali, Ilyes; Acar, Durmus Alp Emre; et al. OPTICS EXPRESS Том: 23 Выпуск: 7 Стр.: 8901-8909
19. “Comparison of high-power diode pumped actively Q-switched double-clad flower shape co-doped-Er3+:Yb3+ fiber laser using acousto-optic and mechanical (optical) modulators”. El-Sherif, Ashraf F.; Harfosh, Amr. JOURNAL OF MODERN OPTICS Том: 62 Выпуск: 15 Стр.: 1229-1240
20. “Both Sides Cooled Packages for High-Power Diode Laser Bars“.Leers, Michael; Westphalen, Thomas; Liermann, Erik. 60th Electronic Components and Technology Conference Местоположение: Las Vegas, NV публ.: JUN 01-04, 2010 Стр.: 708-712 Опубликовано: 2010
21. “Modeling of Thermal Phenomena in a High Power Diode Laser Package”. Suhir, Ephraim; Wang, Jingwei; Yuan, Zhenbang; et al. International Conference on

Electronic Packaging Technology & High Density Packaging Местоположение: Beijing, PEOPLES R CHINA публ.: AUG 10-13, 2009

22. “10 W CW blue-violet diode laser array on the micro-channel cooler”. Suzuki, Nobuyasu; Morimoto, Kiyoshi. Conference on High-Power Diode Laser Technology and Applications X Местоположение: San Francisco, CA. JAN 22-24, 2012
23. “Die Bonding of Single Emitter Semiconductor Laser with Nano-Scale Silver Paste”. Yan, Yi; Chen, Xu; Liu, XingSheng; et al.12th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging (ICEPT-HDP) Местоположение: Shanghai, PEOPLES R CHINA публ.: AUG 08-11, 2011
24. “Defect Temperature Kinetics during Catastrophic Optical Damage in High Power Diode Lasers” Martin Hempel, Jens W. Tomm Proc. of SPIE Vol. 9002, 90021H.
25. “Reliability of High Power/Brightness Diode Lasers Emitting from 790 nm to 980 nm“. L. Bao*, J. Bai, K. Price, M. DeVito, et.al. nLight Corporation Vancouver, WA 98665, USA
26. “GaInAsP/GaInP/AlGaInP-лазеры, излучающие на длине волны 808нм, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии”. А.В. Алуев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, и другие. Физика и техника полупроводников, 2009, том 43, вып. 4
27. “Линейки лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaPAs/GaAs с компенсацией механических напряжений“. А. А. Мармалюк, М. А. Ладугин, И. В. Яроцкая, В. А. Панарин, Г. Т. Микаелян. *Квант. электрон.*, 42:1 (2012), 15–17
28. “Двухволновые лазерные диоды на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур“. Е. И. Давыдова, В. П. Коняев, М. А. Ладугин, Е. И. Лебедева, А. А. Мармалюк, А. А. Падалица, С. В. Петров, С. М. Сапожников, В. А. Симаков, М. Б. Успенский, И. В. Яроцкая Квант. электрон., 40:8 (2010), 697–699.
29. “Influence of Package Structure on the Performance of the Single Emitter Diode Laser”, Xiaoning Li, Yanxin Zhang, Jingwei Wang, et. al. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, VOL. 2, NO. 10, OCTOBER 2012, 1592-1599.
30. “Modeling of Thermal Phenomena in a High Power Diode Laser Package”. Suhir, Ephraim; Wang, Jingwei; Yuan, Zhenbang; et. al.International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging Местоположение: Beijing, PEOPLES R CHINA AUG 10-13, 2009
31. “Numerical Modeling and Simulation of Laser Diode Diamond Microcoolers Kaiser Matin, Yan Zheng, and Avram Bar-Cohen. 14th IEEE ITHERM Conference

2014.

32. “Advances in Bonding Technology for High Power Diode Laser Bars”.

    Jingwei Wang[1*], Xiaoning Li[1,2,3], Dong Hou[1], Feifei Feng[1],et. al. Focuslight Technologies Co., LTD, Xi'an 710119, China. Components and Packaging for Laser Systems, edited by Alexei L. Glebov, Paul O. Leisher, Proc. of SPIE Vol. 9346, 934605 ·2015

33. “Experimental investigation of factors limiting slow axis beam quality in 9xx nm high power broad area diode lasers”. M. Winterfeldt, P. Crump, H. Wenzel, G. Erbert, and G. Trankle. Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut fu€r Ho€chstfrequenztechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 4, 12489 Berlin, Germany. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 116, 063103 (2014).

34. "Thermal Modeling and Analysis of High Power Semiconductor laser Arrays". Zhiyong Zhang, Pu Zhang, Xiaoning Li, Lingling Xiong, et al. 2012 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging.2012

35. “A New Continuous Wave 2500W Semiconductor Laser Vertical Stack»Xiaoning Li1,2, Chenhui Peng1, Yanxin Zhang1, Hi-Tech Industrial Development Zone, Xi'an, Shaanxi, 710119, P.R. China.

36. “Study on Effects of Solder Fluxes on Catastrophic Mirror Damages During Laser Diode Packaging”. Parisa Zhalefar, Ali Dadoo, Mehran Nazerian, Ali Parniabaran, Alireza Ghadimi Mahani, et al. IEEE Transactions on components packaging and manufacturing technology. Том 3. Выпуск 1, стр. 46-51. Jan2013.

37. “20W continuous wave reliable operation of 980nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96μm”. Crump P., Blume G., Paschke K., Staske R., Pietrzak A., Zeimer U., Einfeldt S., Ginolas A.,Bugge F., Häusler K., Ressel P., Wenzel H., and Erbert G. Proc. of SPIE Vol. 7198 719814-1, 2012.

38. «Reliability of High Power Brightness Diode Lasers Emitting from 790 nm to 980 nm». L. Bao, J. Bai, K. Price, M. DeVito, et. a.l nLight Corporation. Vancouver, WA 98665, USA

39. A. P. Meilakhs, E. D. Eidelman. JETP Letters , March 2013, Volume 97, Issue 1, pp 38-40.

40. Abyzov A.M., Kidalov S.V., Shakhov F.M. Physics of the Solid State , 54, 1, 2012 , 210- 215.

41. “Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808нм на основе различных типов ассиметричных гетероструктур со сверхшироким волноводом”,В.В.Безотосный, В.В.Васильева, Д.А.Винокуров,В.А.Капитонов,

О.Н.Крохин, А.Ю.Лешко, А.В.Лютецкий, А.В.Мурашова, Т.А. Налет, Д.Н.Николаев, Н.А.Пихтин, Ю.М.Попов, С.О.Слипченко, А.Л.Станкевич, Н.В.Фетисова, В.В.Шамахов, И.С.Тарасов, Физика и техника полупроводников, 2008, том 42, вып.3, стр. 357 –360.

42. “Модификация структуры плёнок металлизации излучением твердотельного лазера с диодной накачкой для повышения выходных параметров мощных лазерных диодов”, В.В.Безотосный, В.Ю.Бондарев, В.И.Коваленко, О.Н.Крохин, В.Ф.Певцов, Ю.М.Попов, В.Н.Токарев, Е.А.Чешев, Квантовая Электроника, 37, № 11, 2007, 1055-1059.
43. Crump P., Wenzel H., Erbert G., Trankle G., Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 8241, 2012, 824120U.
44. 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 980нм» Квантовая электроника», 44, № 2 (2014), 145-148.
45. V.V. Bezotosnyi, O.N. Krokhin, V.A. Oleshchenko, V.F. Pevtsov, Yu.M. Popov, E.A. Cheshev. Thermal Regime of High-power Laser Diodes. Physics Procedia, Volume 72, 2015, Pages 399–404.
46. “Annealing of the deep recombination center in GaInP/AlGaInP quantum wells grown by solid-source molecular beam epitaxy”. J. Dekker, A. Tukiainen, N. Xiang, S. Orsila, M. Saarinen, M. Toivonen, and M. PessaN. Tkachenko and H. Lemmetyinen JOURNAL OF APPLIED PHYSICS VOLUME 86, NUMBER 7 1 OCTOBER 1999, p. 3709-3713.
47. “Hydrogen in compound semiconductor”. M. D. McCluskeya and N. M. Johnson, s, J. Vac. Sci. Technol. A 17.4., Jul/Aug 1999, p 2188-2193
48. Hydrogen Co-Doping in III-V Semiconductors:. Dopant Passivation and Carbon Reactivation Kinetics in C-GaAs”. Mimila-Arroyo, J. Bland, S. W. Modern Physics Letters B, Volume 15, Issue 17-19, pp. 585-592 (2001).