

Моделирование конструкции двумерной матрицы лазерных диодов с прямым охлаждением потоком теплоносителя

В.А.Олещенко, А.П.Богатов, Н.В.Дьячков, В.В.Безотосный

Проведен анализ достигнутых уровней выходной мощности одиночных линеек лазерных диодов (ЛЛД) и плотности мощности излучения двумерных матриц лазерных диодов (МЛД). Предложена новая конструкция МЛД и приведены результаты моделирования её теплового режима. При использовании в предложенной конструкции стандартных непрерывных ЛЛД (выходная мощность 100 Вт, КПД 50%, длина резонатора 2 мм) плотность выходной мощности излучения МЛД в непрерывном режиме может составить около 5 кВт/см². Рассчитаны требуемые для реализации указанных уровней мощности параметры потока теплоносителя в микроканалах охлаждения МЛД.

Ключевые слова: матрица лазерных диодов, теплоноситель, охлаждение, выходная мощность излучения.

1. Введение

Повышение выходной мощности излучения современных лазерных диодов (ЛД) является одним из важнейших направлений их развития. Прогресс в этой области достигнут в результате оптимизации длины резонатора и коэффициента отражения зеркал [1], повышения КПД [2] и снижения тепловой нагрузки активной области. Последнее обеспечивается совершенствованием методов монтажа лазерных чипов на теплоотводящие элементы, а также использованием материалов с достаточно высокой теплопроводностью, согласованных по коэффициенту теплового расширения (КТР) с лазерным кристаллом с целью снижения термоупругих напряжений и повышения эффективности отвода тепла.

Уровень мощности излучения одной линейки ЛД (ЛЛД) в непрерывном режиме генерации вплотную приблизился к 1 кВт при температуре теплоносителя 15 °С, полном КПД 70 %, стандартной ширине излучающей апертуры 10 мм и длине резонатора 4 мм [3]. Годом ранее в импульсном режиме работы (QSW) от одной подобной ЛЛД была получена оптическая мощность 2 кВт при использовании теплоносителя с температурой –70 °С и 1 кВт – при комнатной температуре [4]. Главное препятствие на пути повышения выходной мощности ЛЛД – это экстремально высокие плотности теплового потока в системе охлаждения.

Отвод тепловых потоков высокой плотности от матрицы ЛД (МЛД) – двумерного массива ЛЛД – ещё более сложная задача. Одним из последних достижений группы исследователей COHERENT-DILAS является конструкция МЛД, состоящая из восьми сэндвичей (термокомпенсатор/ЛЛД/термокомпенсатор) с мощностью излучения каждого 450 Вт. Мощность излучения МЛД в QSW-режи-

ме составила 3.6 кВт при плотности мощности 2.7 кВт/см² [5]. В непрерывном режиме при 25 °С МЛД, состоящая из 50 ЛЛД мощностью 250 Вт каждая, генерировала излучение с плотностью мощности около 2 кВт/см² [5].

Аналогичный результат (около 2 кВт/см² в непрерывном режиме) при общей мощности МЛД 6 кВт получен также в работе [6]. Здесь особое внимание было сосредоточено на решении проблемы возникающих при работе деформаций и термоупругих напряжений и достигнут изгиб («смайл») ЛЛД на уровне 1 мкм при апертуре 10 мм. Необходимость уменьшения смайла обусловлена требованием повышения однородности излучающей апертуры ЛЛД и МЛД для промышленных применений.

При анализе результатов работ [5, 6] создается впечатление, что уровень плотности мощности 2 кВт/см² для непрерывного режима и вблизи 3 кВт/см² для QSW-режима работы МЛД близок к предельному для применяемых конструкций. Принципиальные ограничения обусловлены, в основном, недостаточной теплопроводностью материалов и отличием их КТР от КТР полупроводниковых кристаллов ЛЛД.

В настоящей работе рассмотрена конструкция МЛД на основе принципиально нового подхода к решению проблемы повышения эффективности охлаждения двумерной матрицы, который заключается в непосредственном прямом двустороннем охлаждении ЛЛД теплоносителем в составе МЛД (патент РФ №2712764, приоритет от 11.06.2019 г., ФИАН им. П.Н.Лебедева, и заявка на изобретение №2020137239 от 12.11.2020 г). В предложенном техническом решении тепло от ЛЛД отводится непосредственно потоком теплоносителя за счет конвекционного охлаждения, что эффективнее использования на первой ступени кондуктивного типа охлаждения, применяемого во всех известных конструкциях МЛД. В предложенной нами модели рассматривается МЛД на основе освоенных отечественной промышленностью стандартных ЛЛД с длиной резонатора 2 мм, работающих в непрерывном режиме при комнатной температуре [7]. В качестве базовой рассмотрена конструкция, содержащая 50 таких ЛЛД при апертуре МЛД 10×10 мм.

В.А.Олещенко, А.П.Богатов, Н.В.Дьячков, В.В.Безотосный. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: bezotosnyjvv@lebedev.ru

2. Принципиальная конструкция МЛД и её параметры

Упрощённая схема конструкции МЛД в виде ее фрагмента из семи ЛЛД представлена на рис.1. Размеры ЛЛД l близки к стандартным: толщина 100 мкм, длина (апертура) 10 мм и ширина (длина резонатора лазера) 2 мм. Каждая ЛЛД содержит 50 излучателей – кластеров, представляющих собой отдельные лазеры, которые заполняют всю апертуру ЛЛД с фактором заполнения 50%. ЛЛД расположены параллельно друг другу на расстоянии 100 мкм, таким образом между кристаллами ЛЛД и боковыми стенками 7 формируются восемь каналов в форме тонкостенных труб прямоугольного сечения, по которым прокачивается теплоноситель, непосредственно охлаждающий обе металлизированные стороны ЛЛД. Потоки теплоносителя, обозначенные стрелками 8, могут быть как односторонне направленными (ОНП), так и противоположно направленными (ПНП), как это показано на рис.1 для смежных каналов. В статье [8] на примере двухуровневых микроканальных охладителей было показано, что ПНП теплоносителя дополнительно повышают эффективность теплоотвода и улучшают однородность тепловых полей.

ЛЛД со стороны зеркал резонаторов крепятся к прозрачным для их излучения пластинам 2, которые в рассматриваемом случае изготовлены из сапфира с тепло-

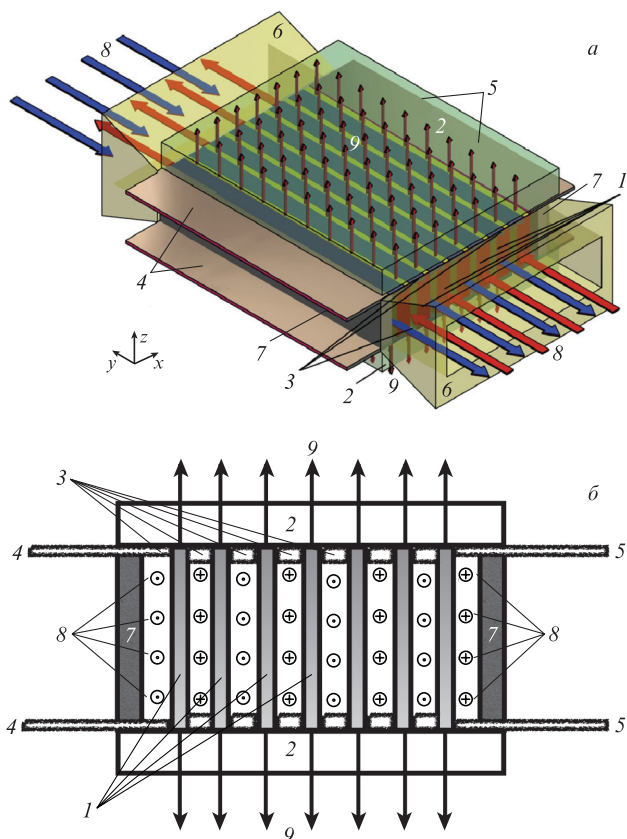


Рис.1. Принципиальные схемы конструкции МЛД с противоположно направленными потоками теплоносителя в изометрии (а) и в плоскости сечения xz (б):

1 – ЛЛД; 2 – сапфировая пластина; 3 – токопроводящее металлизированное покрытие; 4, 5 – контактные электроды; 6 – рупоры канала; 7 – внешние стенки МЛД; 8 – встречные потоки теплоносителя; 9 – выходное излучение.

проводностью $33 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Отметим, что это могут быть пластины из другого прозрачного материала (например, оптического стекла) или плоские грани твердотельных активных элементов (слоэбов, дисков), накачиваемых излучением матрицы (стрелки 9). Пластины 7 обеспечивают механическую прочность МЛД и герметизацию системы каналов. Сами ЛЛД в основном состоят из GaAs с теплопроводностью $\sim 35 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. В расчёте учтены параметры всех слоёв линейки на основе стандартной двойной гетероструктуры с отдельным ограничением и слоёв металлизации. Такой дизайн МЛД позволяет реализовать двухстороннее охлаждение ЛЛД и, при необходимости, осуществить вывод излучения в обе стороны. Последнее может быть полезным с точки зрения повышения мощности ЛЛД за счёт увеличения КПД линейки, поскольку при двухстороннем выводе излучения растёт соотношение между полезными и внутренними потерями.

Накачка матрицы осуществляется током, протекающим через последовательно включенные ЛЛД. При этом электрическое соединение между соседними ЛЛД обеспечивается металлизацией стенок каналов 3, по которым протекает диэлектрический теплоноситель. Электрическая цепь окончательно замыкается положительным (4) и отрицательным (5) электродами, подключаемыми к источнику питания.

Источниками тепла в модели являются активные области ЛЛД со следующими параметрами: толщина 0.1 мм, непрерывная мощность излучения 100 Вт, КПД 50%, плотность отводимой от каждой ЛЛД тепловой мощности 500 Вт/см^2 , средняя плотность мощности оптического излучения МЛД 5 кВт/см^2 ; начальная температура системы 20°C . В модели учитывается температурная зависимость вязкости охлаждающей жидкости; в расчёте в качестве теплоносителя использована дистиллированная вода, температурные параметры которой приведены в [9]. Граничные условия по температуре таковы: внешние грани сапфировых пластин 2 (рис.1) и внешние грани рупоров подачи теплоносителя 6 на входе и выходе термостабилизированы при температуре 20°C . Как известно, для высокоэффективного теплопереноса предпочтительнее использовать турбулентный поток теплоносителя, поскольку он характеризуется тонким пристеночным слоем; при этом возрастает вклад конвективного механизма охлаждения по сравнению с кондуктивным, что проявляется в росте числа Пекле, являющегося отношением этих двух величин.

Для вычисления итогового стационарного распределения тепловых полей и поля скоростей турбулентного потока охлаждающей жидкости использован метод конечных элементов и лицензионный пакет Comsol Multiphysics. С целью решения задачи турбулентности была применена модель течения с автоматическим выбором пристеночных функций, с использованием которой рассчитывалась зависимость коэффициента турбулентной вязкости от локальной скорости жидкости и расстояния до стенки канала с учетом температуры жидкости. Эта модель наиболее устойчива и характеризуется низкой требовательностью к вычислительным ресурсам. Разбиение на конечные элементы производилось в автоматическом режиме, на каждый объём модели 58.5 мм^3 пришлось более 123000 элементов разбиения в каналах с жидким теплоносителем. Для повышения точности вычислений число элементов разбиения вблизи стенок каналов было существенно увеличено.

3. Результаты 3D моделирования

В ходе моделирования использованные скорости теплоносителя на входе рупора составляли 10 и 15 м/с при остаточном давлении 2 атм на выходе из рупора. На рис.2,*а* представлено распределение давления теплоносителя в сечении zy канала, а на рис.2,*б* – усредненная скорость теплоносителя в центре канала размером 0.1 мм (в сечении xu), расположенного в середине ЛЛД (вставка на рис.2,*а*). Данные распределения справедливы для течения во всех каналах и для случаев как ОНП, так и ПНП, поскольку каналы идентичны и меняется только направление течения теплоносителя. Из рис.2,*а* следует, что при начальных скоростях теплоносителя 10 и 15 м/с давление на входе в рупор немного превышает 6 и 10 атм соответственно, однако в каналах между кристаллами ЛЛД оно существенно снижается и составляет на их входе 5 и 7 атм, а на выходе – менее 1.5 и 0.3 атм. Причём чем больше давление на входе рупора, тем ниже оно на выходе из канала в области расширения поперечного сечения рупора, что свидетельствует о турбулентном характере потока при повышении давления. Моделирование показало, что при давлении на входе в канал более 10 атм на выходном участке возможно образование области пониженного давления и возникновение кавитации с появлением пузырьков воздуха.

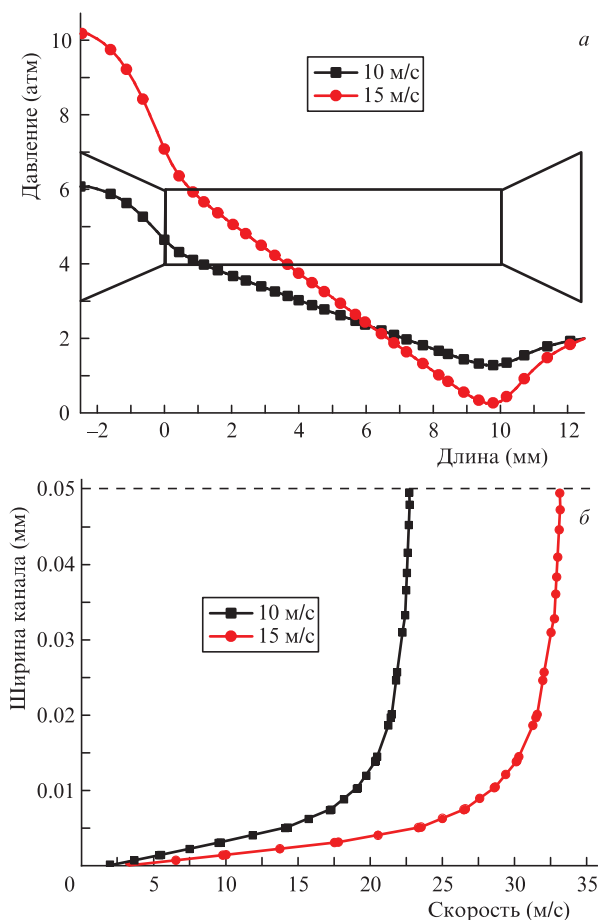


Рис.2. Распределения давления теплоносителя в системе охлаждения и согласованное с координатами графика сечение системы рупор–канал–рупор (*а*), а также распределение скорости теплоносителя в центральной части канала в xu -плоскости; штриховая линия – продольная ось симметрии канала (*б*).

С точки зрения надёжности работы устройства режим кавитации нежелателен, а кроме того, при давлении теплоносителя свыше 10 атм требования к механической прочности элементов конструкции повышаются, что может создавать технические проблемы, поэтому при моделировании давление на входе не превышало 10 атм. Анализ вычислительных процедур Comsol [10] показал, что в выбранном диапазоне давлений и скоростей потока влиянием упомянутых областей пониженного давления на скорость протекания потока теплоносителя и, следовательно, на эффективность охлаждения можно пренебречь.

Расчёты показали, что скорость теплоносителя изменяется по длине каналов незначительно, и это весьма важно для равномерного охлаждения активных элементов МЛД. Скорость ламинарного потока, как известно, обратно пропорциональна площади сечения. В нашем случае, при турбулентном режиме потока в каналах между ЛЛД, она в 2.2 раза превышает начальную скорость на входе рупора (10 и 15 м/с) и в центре сечения каналов составляет 22 и 33 м/с соответственно. Таким образом, в каналах реализуется турбулентное течение жидкости для более эффективного теплообмена. Форма профиля распределения скорости теплоносителя (рис.2,*б*) заметно отличается от параболической – вблизи стенки канала скорость растёт значительно быстрее, что характерно для турбулентного потока.

Благодаря турбулентному характеру потока его скорость на расстоянии менее 1 мкм от стенки (металлизированная поверхность кристалла ЛЛД) при начальной скорости потока 15 м/с составляет 2.7 м/с и быстро растёт, достигая 15 м/с при удалении всего на 2.5 мкм, что обеспечивает высокую эффективность отвода тепла. При начальной скорости потока 10 м/с скорость у стенки составляет 1.9 м/с, скорости 15 м/с поток достигает на расстоянии 5.5 мкм от стенки.

Исходя из поставленной задачи, особый интерес представляет распределение температурных полей в МЛД, в частности в ЛЛД. На рис.3 показаны распределения температуры активной области ЛЛД, рассчитанные для случаев двух начальных скоростей потока теплоносителя, движущегося в прямом и обратном направлениях.

Ноль координат на горизонтальной оси рис.3,*а* (ось y вдоль канала) соответствует входу в канал. Видно, что при ОНП теплоносителя возникает неоднородность температурного поля, при этом его амплитуда в активной области ЛЛД увеличивается в направлении выхода канала. Поскольку температура охлаждающей жидкости при движении по каналу вдоль выделяющей тепло активной области ЛЛД растёт, эффективность охлаждения в направлении выхода канала уменьшается. Причём с увеличением скорости потока с 10 до 15 м/с максимальная по апертуре температура активной области ЛЛД снижается с 54 до 45 °С, а перепад средней температуры уменьшается с 3.5 до 2 °С.

Расчёты средней и максимальной температур активной области ЛЛД для ОНП и ПНП при скоростях теплоносителя на входе в канал 10 и 15 м/с показали, что среднюю температуру потоков обоих типов можно считать одинаковой, а максимальная температура при ОНП не более чем на 1.5 °С выше, чем при ПНП. Максимальные температуры для обоих потоков при рассматриваемых входных скоростях находятся в диапазоне 45–55 °С, приемлемом для надёжной работы ЛЛД, причем для ПНП

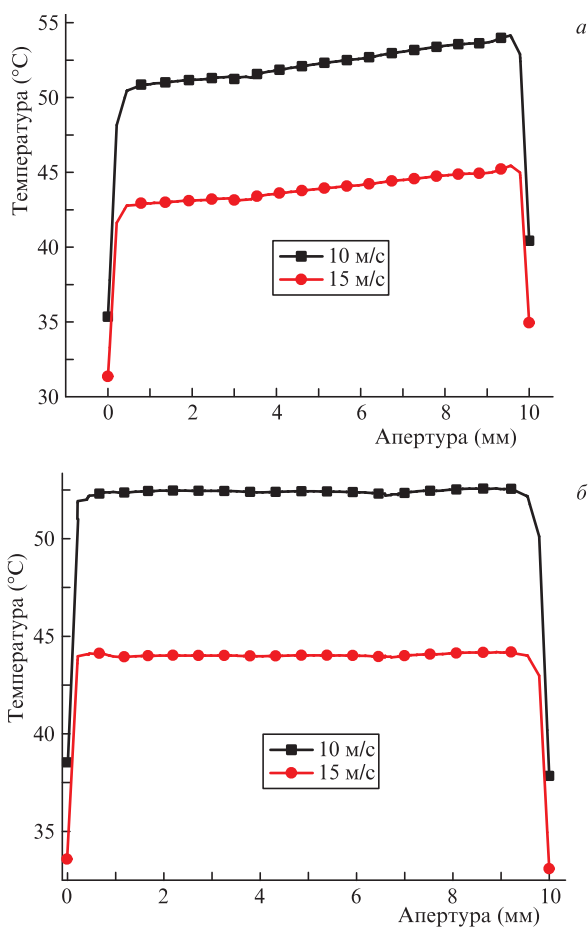


Рис.3. Средняя температура активной области по апертуре ЛЛД при ОНП (а) и ПНП (б).

они в среднем на 1 °С ниже, чем для ОНП. Таким образом, основное преимущество охлаждения с помощью ПНП – повышение однородности распределения тепловых полей вдоль апертуры – способствует снижению термоупругих напряжений и повышению однородности выходных параметров ЛЛД. Последнее особенно актуально для схем спектрального суммирования излучения, применяемых с целью повышения яркости МЛД.

4. Сравнение прямого конвективного метода охлаждения ЛЛД с методами, использующими кондуктивное охлаждение

Двухстороннее охлаждение ЛЛД известно уже давно, оно обеспечивает большую эффективность и однородность распределения температуры, но более сложно реализуется технически. Как уже упоминалось выше, в статьях [5, 6] в качестве строительного элемента МЛД предлагается использовать сэндвич, состоящий из кристалла ЛЛД, помещенного между двумя термокомпенсаторами. Это схема двухстороннего кондуктивного отвода тепла. Насколько нам известно, предложенная нами схема прямого двухстороннего конвективного охлаждения ЛЛД теплоносителем, в том числе с использованием чередующихся каналов с ПНП, расположенных в одной плоскости, рассматривается впервые.

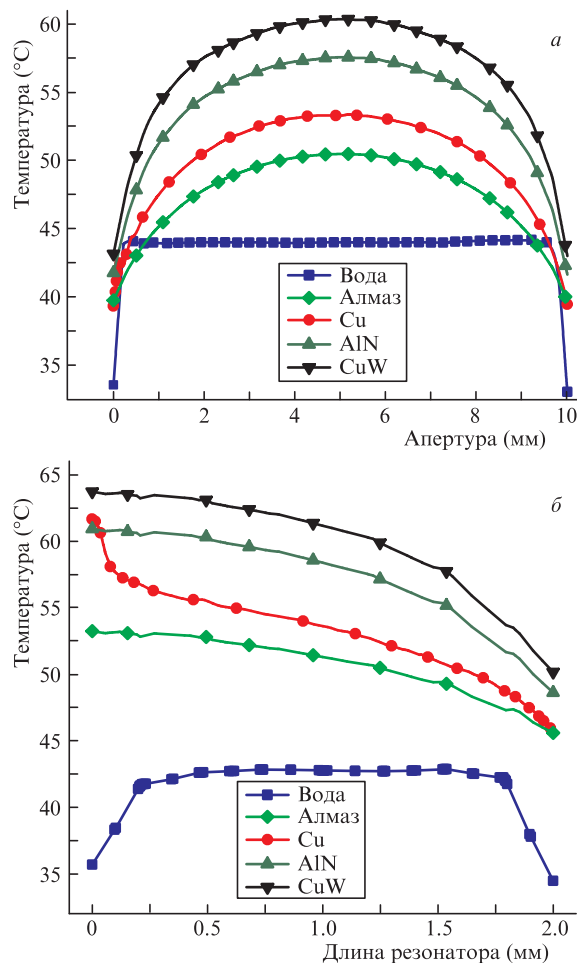


Рис.4. Температурные профили в сечении активной области ЛЛД вдоль излучающей апертуры (а) и по длине резонатора (б). Выходное зеркало резонатора на рис.4,б находится слева.

На рис.4 показаны температурные профили в сечении активной области ЛЛД с размерами 2×10 мм при тепловой нагрузке 100 Вт и её монтаже как непосредственно на медный теплоотводящий элемент (Cu), так и с использованием промежуточных термокомпенсаторов и сабмаунтов на основе CuW, AlN и синтетического алмаза с теплопроводностью $1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, а также в случае двухстороннего непосредственного охлаждения ЛЛД (в составе МЛД, состоящей из 50 линеек) противоположно направленным потоком воды со скоростью 15 м/с.

Из рис.4 следует, что при стандартных вариантах монтажа односторонний поток тепла от активной области и расположение выходного зеркала на краю теплоотводящего элемента приводят к выраженным неоднородностям тепловых полей, причем перепад температур по апертуре ЛЛД может достигать 20 °С, а по длине резонатора – около 14 °С. Естественно, чем выше теплопроводность сабмаунта или термокомпенсатора, тем ниже максимальная температура теплового поля и меньше его неоднородность. Так, при одинаковой тепловой нагрузке максимальная температура в районе расположения центральных кластеров ЛЛД превышает 60 °С при использовании термокомпенсатора из CuW против 50 °С в случае алмазного сабмаунта. Тем не менее, даже при использовании последнего, перепад температур по длине резонатора (2 мм) составляет около 7 °С.

Приведенные на рис.4 зависимости убедительно демонстрируют качественные и количественные преимуще-

ства предлагаемого нами «монтажа на теплоноситель». Наш вариант монтажа, помимо возможности разгрузки зеркал ЛЛД за счёт двухстороннего вывода излучения из МЛД и дополнительного их охлаждения элементами конструкции (что невозможно в стандартных конструкциях), обеспечивает замечательную однородность тепловых полей по апертуре и вдоль длины резонатора. При этом средняя температура ЛЛД на 10°C ниже, чем в случае использования сабмаунта из искусственного алмаза. Эти преимущества важны для повышения надёжности МЛД, поскольку чем больше градиент температур, тем выше уровень термоупругих напряжений как в самой ЛЛД, так и на границах пайки элементов сборки из-за различия в их КТР. «Монтаж на теплоноситель» нивелирует эти проблемы. В результате мы имеем практически плоский профиль температуры в сечении активной области по апертуре и температуру зеркал ЛЛД ниже температуры середины резонатора на 7°C .

5. Выводы

Расчёты и анализ полученных результатов показывают существенные преимущества предложенного нового метода прямого охлаждения ЛЛД теплоносителем. Следует отметить, что в рассмотренной нами модели использованы ЛЛД с заведомо заниженными параметрами (мощность непрерывного излучения 100 Вт, полный КПД 50%), тем не менее полученная расчетная плотность непрерывной оптической мощности МЛД составила 5 кВт/см^2 при температуре теплоносителя 20°C , что в 2.5 раза превышает опубликованные рекордные результаты. При использовании в предложенной нами конструкции описанных в упомянутых выше работах ЛЛД с мощностью 250 Вт и полным КПД 65%–70% и повышении плотности упаковки лазерных линеек в матрице расчётная плотность мощности излучения МЛД может, по оценкам, превысить 15 кВт/см^2 .

Очевидно, что на сегодняшний день практическая реализация предложенной конструкции является технически непростой задачей, связанной с необходимостью соз-

дания новой и, возможно, дорогостоящей технологии сборки МЛД. Это касается, в частности, вопросов монтажа ЛЛД, обеспечения герметичности соединений, организации циркуляции турбулентных потоков теплоносителя со встречным направлением движения в соседних каналах, минимизации термоупругих напряжений, повышения плотности упаковки ЛЛД в составе МЛД для увеличения плотности мощности излучения и т. д. В связи с этим возникает вопрос – насколько достоинства МЛД нового типа могут «окупить» трудности его реализации. Настоящая работа в какой-то мере даёт ответ на этот вопрос.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Г.Т.Микаеляна и Е.А.Чешева за сотрудничество, а также О.В.Ревинского за оформление патента.

1. Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Шамахов В.В., Шашкин И.С., Капитонов В.А., Тарасов. И.С. *Квантовая электроника*, **45**, 7 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 7 (2015)].
2. Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Лобинцов А.В., Давыдова Е.И., Сапожников С.М., Данилов А.И., Подкопаев А.В., Иванова Е.Б., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **47**, 4 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 4 (2017)].
3. Strohmaier S.G., Erbert G., Meissner-Schenk A.H., Lommel M., Schmidt B., Kaul T., Karow M., Crump P. *Proc. SPIE*, **10086**, 100860C (2017).
4. Frevert C., Bugge F., Knigge S., Ginolas A., Erbert G., Crump P. *Proc. SPIE*, **9733**, 97330L (2016).
5. Fassbender W., Lotz J., Kissel H., Biesenbach J. *Components Packaging for Laser Systems IV*, **10513**, 105130M (2018).
6. Zhang Hongyou, Cai Lei, Zah Chung-en, Liu Xingsheng. *Proc. SPIE*, **11182**, 111820F (2019).
7. Безотосный В.В., Козырев А.А., Кондакова Н.С., Кондаков С.А., Крохин О.Н., Микаелян Г.Т., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **43** (12), 41 (2016) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **43**, 369 (2016)].
8. Gongnan Xie, Yanquan Liu, Sunden Bengt, Zhang Weihong. *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, **5**, 0111004 (2013).
9. Holmes M.J., Parker N.G., Povey M.W. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **269**, 012011 (2011).
10. CFD Module User's Guide. Comsol (2018).