Термоупругие напряжения в мощных непрерывных линейках лазерных диодов, смонтированных на сабмаунтах из CuW и AlN

В.П.Гордеев, В.А.Олещенко, В.В.Безотосный

Представлены сравнительные результаты 3D расчёта профилей термоупругих напряжений (ТУН) в линейках лазерных диодов (ЛЛД), смонтированных на сабмаунтах (термокомпенсаторах) из CuW и AlN и работающих при мощностях непрерывной тепловой нагрузки до 220 Вт. В результате моделирования впервые выявлены существенные различия в максимальной величине ТУН для линеек, собранных на сабмаунтах из CuW и AlN, а также выраженные особенности распределения ТУН в сборках ЛЛД, в частности, вблизи заднего (глухого) зеркала резонатора лазерного диода при одинаковой геометрии термокомпенсаторов. Результаты численного моделирования качественно согласуются с детальными измерениями спектральных распределений по излучающей апертуре ЛЛД. Полученные результаты представляют интерес для совершенствования технологий изготовления мощных приборов с целью повышения их выходных параметров и срока службы.

Ключевые слова: *линейки лазерных диодов, термокомпенсаторы, термоупругие напряжения.*

1. Введение

Мощные линейки (ЛЛД) и матрицы лазерных диодов (МЛД) благодаря своей высокой эффективности, надёжности и удобству использования широко применяются для накачки твердотельных лазеров и лазеров на парах металлов, для обработки материалов, в навигации, физических исследованиях и др. Ярким примером их использования является прямая лазерная обработка материалов: сварка, резка, упрочнение, очистка поверхности т. д. Вместе с тем по яркости излучения ЛЛД и МЛД существенно уступают лазерам с диодной накачкой. Однако при использовании современных методов суммирования излучения от ЛЛД и МЛД яркость такого синтезированного пучка может сравниться с яркостью излучения твердотельных лазеров. Системы, использующие суммирование излучения высокоэффективных и компактных ЛЛД и МЛД [1 – 3], обладают привлекательными характеристиками и смогут составить конкуренцию твердотельным лазерам в ряде применений. Так, использование ЛЛД в схемах спектрального суммирования [4] позволило достичь рекордной мощности более 4.6 кВт. Получение высоких выходных характеристик лазерных систем на основе суммирования излучения ЛЛД и МЛД напрямую связано с выходными характеристиками каждого излучателя.

Значительными препятствиями для достижения рекордной выходной мощности и яркости излучения при обеспечении заданной однородности спектральных параметров, поляризации, надёжности и срока службы всех элементов системы являются неоднородности тепловых полей в лазерном кристалле ЛЛД, а также полей термоупругих напряжений (ТУН), изучению которых, по нашему мнению, уделялось недостаточное внимание.

Для сабмаунтов (промежуточных теплоотводящих элементов между лазерным кристаллом и основным теплоотводом) из CuW и AlN, наиболее широко используемых при монтаже мощных одиночных лазерных диодов (ЛД) и монолитных ЛЛД, в литературе отсутствует точное и подробное описание процессов, приводящих к неоднородностям тепловых полей, спектров и поляризации излучения, что обусловлено трудоёмкостью построения требуемых 3D моделей и сложностью анализа результатов. В то же время из-за существенно более низкой по сравнению с медью теплопроводностью указанных материалов и отсутствия сравнительных данных об абсолютной величине и характере распределении ТУН в чипах ЛД и ЛЛД при их использовании не представляется возможным оценить влияние ТУН на надёжность и срок службы приборов, определить оптимальные параметры лазерных сборок и гарантированный «ресурсный» диапазон тепловых нагрузок, что особенно актуально для достоверного прогнозирования срока службы излучателей в непрерывном режиме.

Возникновение ТУН в мощных ЛД и ЛЛД, как и в любом мощном гибридном устройстве, обусловлено различием как упругих констант используемых материалов гетероструктур, сабмаунтов, припоев, электродов и теплоотводящих элементов, так и их температурных зависимостей, что приводит в результате к неоднородному нагреву прибора в рабочем режиме. Можно классифицировать следующие основные механизмы появления ТУН: «встроенные» напряжения в гетероструктурах, обусловленные рассогласованием параметров кристаллических решёток полупроводниковых слоёв разного состава, различиями в их коэффициентах температурного расширения (КТР) и температурных зависимостей КТР; напряжения, возникающие в результате сборки чипа, особенно актуальные для технологий с применением так называемого твёрдого и высокотемпературного припоя AuSn; напряжения «ра-

В.П.Гордеев, В.А.Олещенко, В.В.Безотосный. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский просп. 53; email: vs.gordeev@yandex.ru, bezotosnyjvv@lebedev.ru

Поступила в редакцию 21 февраля 2022 г.

бочего режима», возникающие вследствие неоднородного нагрева лазерного кристалла.

В работах [5–8] описаны ЛЛД, работающие в непрерывном (CW) и квазинепрерывном (QCW) режимах, и частично изучены особенности спектров выходного излучения в этих режимах, в том числе, предположительно, связанные с ТУН. Результаты моделирования показали наличие неоднородностей в профилях распределения температуры и ТУН в активной области и выявили влияние материалов чипа, теплоотвода и припоя при различных мощностях тепловой нагрузки на лазерный кристалл. В ряде работ [9–13] было установлено влияние ТУН на поляризацию выходного излучения и неоднородность её распределения по апертуре. Авторами [10, 14] показано, что высокий уровень ТУН может вызывать образование пустот (voids) в припое, которые, в свою очередь, являются причиной неоднородного отвода тепла от чипа ЛЛД – образования «горячих» точек, что приводит к неоднородности распределений мощности и спектра по ширине излучающей апертуры и снижению надёжности излучателя.

Как известно, ТУН растяжения или сжатия в гетероструктурах изменяют относительные положения уровней энергии подзон лёгких и тяжёлых дырок и тем самым влияют на поляризацию выходного излучения [14]. Для снижения негативных эффектов, вызванных неоднородностями отвода тепла и факторами, связанными с ТУН, для монтажа лазерных чипов используются технологии COS (Chip on Substate), в которых в качестве сабмаунта применяются материалы, согласованные по КТР с лазерным кристаллом.

В настоящей работе приведены наиболее интересные результаты численного 3D моделирования CW-ЛЛД, собранных на CuW- и AlN-сабмаунтах, которые в свою очередь смонтированы на стандартных медных теплоотводящих элементах типа CS-маунт, при работе ЛЛД вплоть до предельных мощностей тепловой нагрузки P_{TL}, равных 220 Вт, определяемых как

$$P_{TL} = P_{EL}(1 - \eta_{tot}), \quad (1)$$

где P_{EL} – вложенная в ЛЛД электрическая мощность; η_{tot} – полный КПД линейки. Кроме того, для сравнения приведены и проанализированы экспериментальные данные для типичного профиля спектра выходного излучения ЛЛД по ширине излучающей апертуры.

2. Моделирование

Расчётная 3D модель рассматривает собранный по технологии COS типичный кристалл CW-ЛЛД, изготовленный из гетероструктуры на подложке GaAs (λ = 808 нм), с шириной апертуры 10 мм, длиной резонатора 2 мм и толщиной 0.12 мм, содержащий 47 излучающих кластеров (эмиттеров) при факторе заполнения FF = 50%. Толщина сабмаунтов CuW или AlN составляла 300 мкм. В модели чипы ЛЛД монтировались на сабмаунты с помощью AuSn-припоя, а сабмаунты с чипами – на теплоотводы типа CS-маунт из меди с помощью PbSn-припоя. Толщина слоя AuSn-припоя при монтаже чипов на сабмаунты варьировалась в модели в диапазоне 2.5–5 мкм, а толщина PbSn-припоя – в диапазоне 5–10 мкм. Мощность непрерывной тепловой нагрузки варьировалась от 20 до 220 Вт. Нижняя грань теплоотвода поддерживалась при постоянной температуре 293 K. CS-маунт крепился винтами к базовому термостабилизированному теплоотводу через штатные отверстия корпуса. Моделирование проводилось в среде COMSOL Multiphysics. Параметры материалов, используемых в расчётной модели, приведены в табл.1.

Табл.1. Параметры используемых материалов.

Материал	Модуль Юнга (ГПа)	КТР (10^{-6} м/K)	Коэффициент Пуассона
GaAs	86	5.7	0.31
20Au – 80Sn	68	16	0.405
39Pb – 61Sn	40	26	0.4
CuW	260	7	0.3
AlN	348	4.6	0.27
Cu	128	16.5	0.36

Как следует из табл.1, КТР CuW больше, а КТР AlN меньше, чем у GaAs, при этом модули Юнга материалов сабмаунтов значительно больше, чем у GaAs. Как будет показано ниже, отличия в значениях упругих констант, в особенности КТР, приводят к различным эффектам при термическом расширении и сжатии сэндвичей кристалл–припой–сабмаунт в процессе термоцикла сборки при нагреве и охлаждении и, соответственно, к существенной разнице в картинах 3D полей термоупругих напряжений в случаях монтажа с использованием CuW- или AlN-сабмаунтов.

Для более детального представления результатов моделирования картины термоупругих напряжений, которые возникают в лазерных чипах, собранных на сабмаунтах из CuW и AlN, а также для выяснения общей картины распределения ТУН по всему объёму лазерной сборки было выбрано несколько принципиально важных сечений 3D модели: это плоскость активной области, слой припоя между кристаллом и сабмаунтом, плоскость внутри сабмаунта и слой припоя между сабмаунтом и теплоотводом.

Активная область. В расчётной модели активная область рассматривается как плоскость в силу малости её толщины по сравнению с толщиной кристалла ЛЛД (типичная толщина активной области в современных квантово-размерных гетероструктурах составляет около 100 нм). В этом модельном слое, где происходит рекомбинация носителей и тепловыделение, находятся излучающие эмиттеры (кластеры), представленные прямоугольниками. Вся рассеиваемая тепловая мощность P_{TL} выделяется на площади эмиттеров в равных долях в каждом из 47 кластеров.

Активная область – самая интересная для исследования, поскольку проявляющиеся в ней термоупругие напряжения наиболее показательно могут свидетельствовать об изменении спектра и поляризации выходного излучения. На рис.1 приведены распределения амплитуд термоупругих эквивалентных напряжений по фон Мизесу σ_{VM} для CuW- и AlN-сабмаунтов в сечении 3D картины по плоскости активной области, которые выражаются как

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_h - \sigma_r)^2 + (\sigma_h - \sigma_a)^2 + (\sigma_a - \sigma_r)^2 + 3\tau^2]}, \quad (2)$$

где σ_h – кольцевые, σ_r – радиальные, σ_a – аксиальные и τ – тангенциальные напряжения соответственно. Как видно из рис.1, наибольшее напряжение (~120 МПа) достигается на заднем зеркале резонатора сборки на CuW-саб-

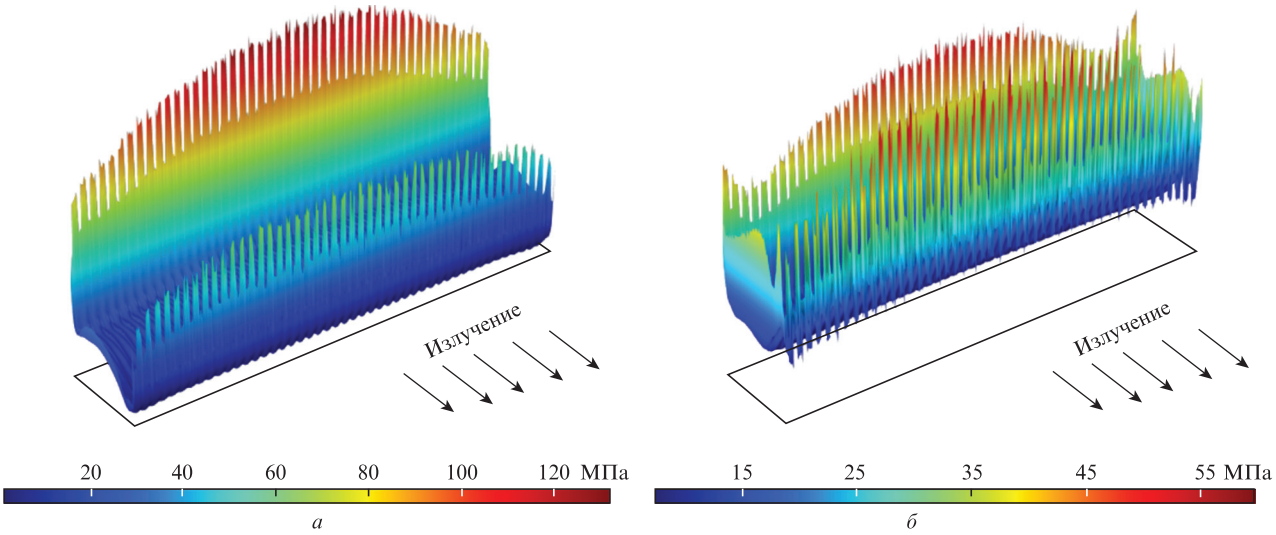

Рис.1. Профили механических напряжений в активной области лазерного кристалла, смонтированного на сабмаунте из CuW (*а*) и AlN (*б*) при тепловой нагрузке 220 Вт.

маунте, тогда как при использовании AlN-сабмаунта оно в 2.7 раза меньше (~ 44 МПа). При этом усреднённое значение напряжений в рассматриваемой плоскости составляет ~20 МПа, а наиболее высокие напряжения достигаются в тонком слое вблизи заднего глухого зеркала.

Такие заметные отличия в значениях напряжений для рассмотренных материалов обусловлены соотношением КТР материалов сабмаунтов и лазерного кристалла, а также геометрией собранного сэндвича. Наибольшие значения термоупругих напряжений на краях ЛЛД можно объяснить так называемыми краевыми эффектами, геометрией ЛЛД и сабмаунта, а также различиями в тепловых и механических характеристиках материалов. Значительная асимметрия профиля напряжений по длине резонатора обусловлена тем, что выходное зеркало ЛЛД расположено на краю сабмаунта, тогда как заднее зеркало по технологическим соображениям находится на некотором расстоянии от его заднего края. В результате смещение свободного переднего края сабмаунта больше, и, соответственно, напряжение на переднем крае меньше. На заднем крае кристалла картина иная – смещение материала сабмаунта на линии заднего зеркала демпфируется объёмом «свободного» материала, находящимся вне кристалла ЛЛД за линией заднего зеркала, поэтому напряжения на заднем зеркале значительно больше.

Слой припоя между кристаллом и сабмаунтом. На рис.2 показаны распределения амплитуд напряжений σ_{VM} для CuW- и AlN-сабмаунтов в толще припоя между кристаллом и сабмаунтом. Для большей наглядности приведён вид со стороны заднего зеркала, чтобы показать детали этого профиля.

Из рис.2 видно, что полученные профили принципиально отличаются от показанных на рис.1. Наибольшие значения ТУН достигаются вблизи выходного зеркала, а не заднего, как в случае плоскости активной области. При этом наибольшие напряжения (~180 МПа) достигаются при использовании AlN-сабмаунта – против ~160 МПа в случае CuW-сабмаунта. Также наблюдается резкий перепад напряжений в области под кристаллом ЛЛД: ~20 МПа для сабмаунта из CuW и ~10 МПа – из AlN.

Сабмаунт. На рис.3 приведены распределения амплитуд напряжений σ_{VM} в толще сабмаунта. Характерные профили ТУН в обоих сабмаунтах очень схожи. Видны особенности профилей на краях. Они обусловлены как

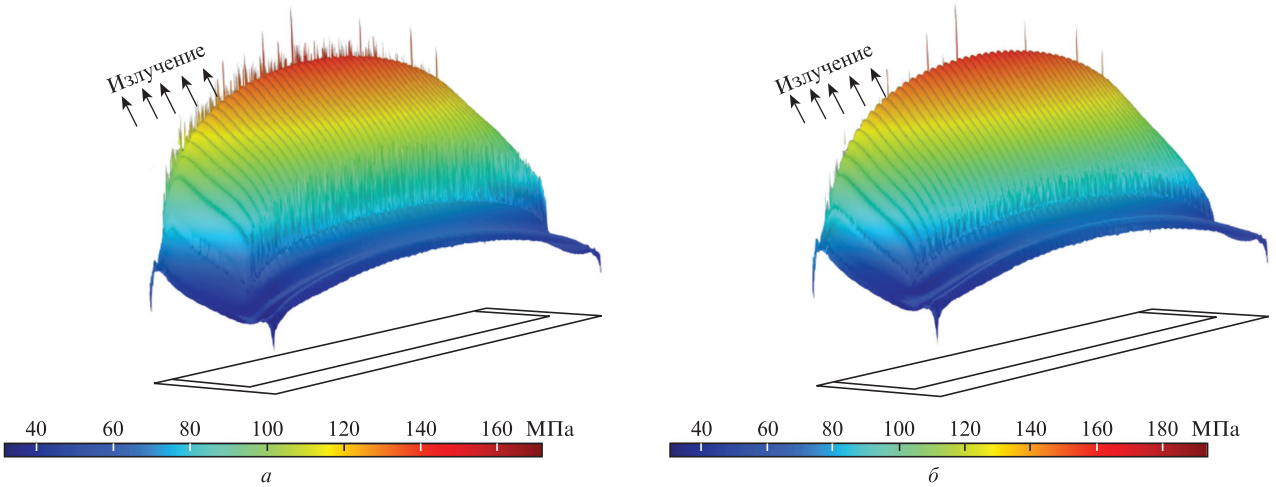

Рис.2. Профили механических напряжений в толще припоя между кристаллом и сабмаунтом из CuW (*а*) и AlN (*б*) при мощности тепловой нагрузки 220 Вт.

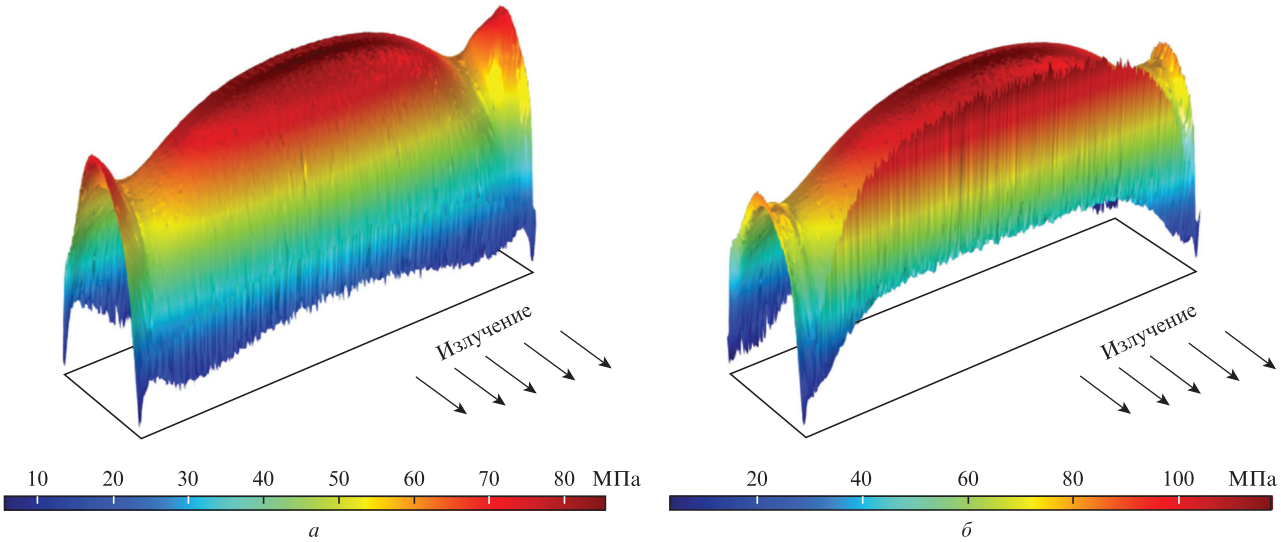

Рис.3. Профили механических напряжений в сабмаунте из CuW (*а*) и AlN (*б*) при мощности тепловой нагрузки 220 Вт.

геометрией сабмаунтов и смонтированного на них кристалла ЛЛД, так и совокупностью параметров, представленных в табл.1. Отметим, что наибольшие напряжения возникают в AlN-сабмаунте, причём их распределение имеет более выраженный максимум в центре и менее выраженные всплески по краям чипа ЛЛД.

Слой припоя между сабмаунтом и теплоотводом. Этот слой примечателен тем, что по обе стороны от него находятся материалы с наиболее различающимися КТР (см. табл.1). На рис.4 приведены распределения амплитуд напряжений σ_{VM} для CuW- и AlN-сабмаунтов в толще припоя между сабмаунтом и теплоотводом. Для удобства анализа распределения показаны со стороны переднего зеркала, которые для наглядности развёрнуты под углом.

Как видно из рисунка, наибольшие напряжения в слое припоя достигаются ближе к заднему зеркалу, но по мере приближения к нему напряжение начинает спадать, и у заднего зеркала падение в среднем составляет примерно 30 и 50 МПа для CuW- и AlN-сабмаунта соответственно. Максимальное значение ТУН для AlN-сабмаунта (~120 МПа) вдвое больше, чем для CuW-сабмаунта (~ 60 МПа).

3. Анализ результатов расчёта

Анализ результатов, представленных на рис.1–4, показывает, что имеются значительные отличия как в абсолютных значениях, так и в характере распределения ТУН, возникающих при монтаже ЛЛД на сабмаунтах из AlN и CuW. Однако профили распределения средних значений напряжений по кластерам половины излучающей апертуры в плоскости активной области (рис.5) при использовании обоих типов сабмаунтов схожи – наибольшие напряжения имеют место в центре апертуры и спадают к её краям. Распределения напряжений симметричны относительно центра апертуры, имеют максимум в центре и всплески на краях чипа ЛЛД, причём напряжение в максимуме распределения для CuW-сабмаунта значительно выше, чем для AlN-сабмаунта.

Следует отметить, что в других рассмотренных сечениях сборки величина ТУН при использовании AlN была заметно выше, чем при использовании CuW. Данная особенность распределения ТУН в сложной пятислойной конструкции, состоящей из COS, собранного на медном

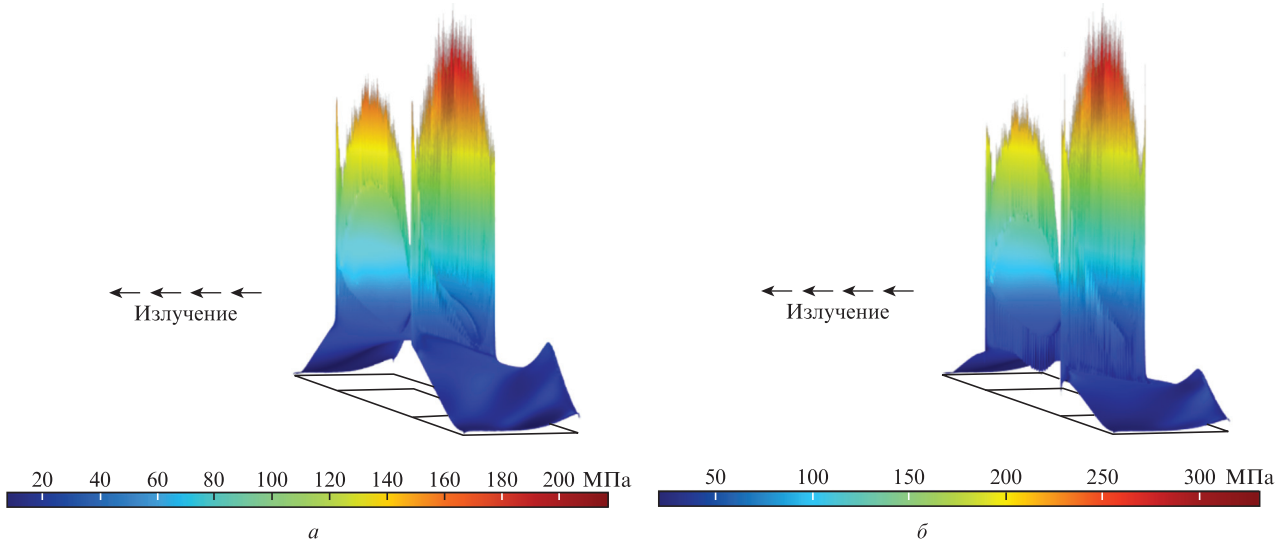

Рис.4. Профили механических напряжений в толще припоя между теплоотводом и сабмаунтом из CuW (*а*) и AlN (*б*) при мощности тепловой нагрузки 220 Вт.

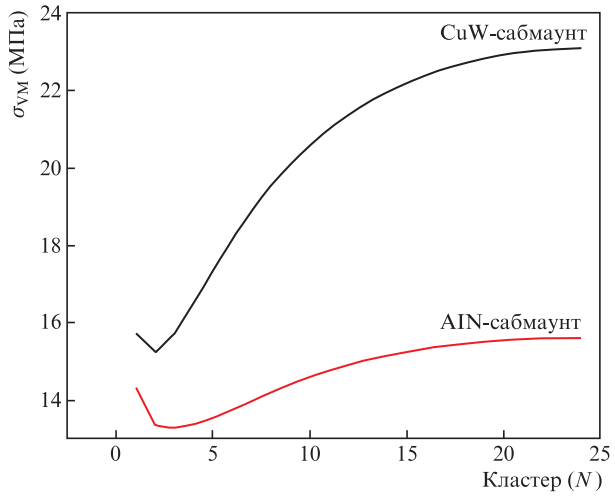

Рис.5. Усреднённые по кластерам профили механических напряжений в плоскости активной области для сабмаунтов из CuW и AlN при мощности тепловой нагрузки 220 Вт. Показана половина апертуры ЛЛД, поскольку для 47 кластеров распределение симметрично относительно центрального кластера.

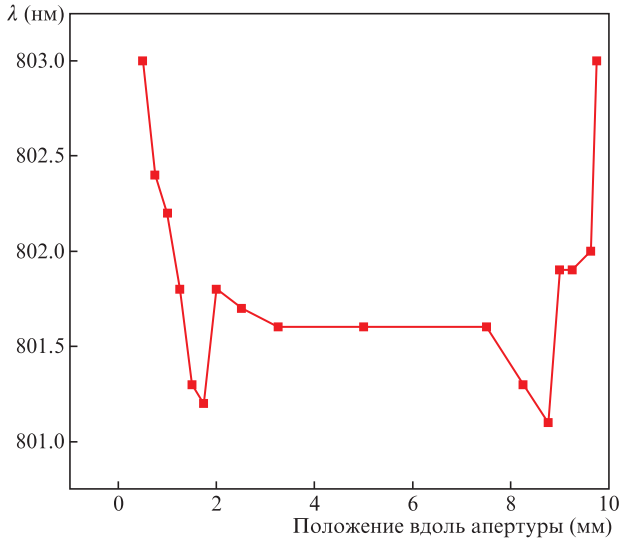

Рис.6. Типичное спектральное распределение излучения ЛЛД по длине выходной апертуры при небольшой (10 Вт) мощности тепловой нагрузки.

CS-маунте, указывает на принципиальную возможность снизить эффективные усреднённые напряжения в активной области при использовании AlN-сабмаунта, что представляет значительный интерес для технологий монтажа. Неслучайно этот материал, несмотря на его диэлектрические свойства, всё чаще используется при монтаже мощных одиночных ЛД и ЛЛД.

4. Эксперимент

Прямое экспериментальное измерение термоупругих напряжений в ЛЛД затруднено, однако возможны измерения лазерных параметров, косвенно зависящих от величины напряжений. Одним из таких параметров является спектр излучения (в нашем случае измерение спектрального распределения по ширине излучающей апертуры ЛЛД), поскольку длина волны излучения зависит от ширины запрещённой зоны, которая, в свою очередь, зависит от величины механических напряжений. Учитывая, что профиль распределения выделяющегося тепла в рабочем режиме ЛЛД существенно влияет на спектральное распределение по апертуре, такие измерения проводились в QCW-режиме при небольшом превышении тока над порогом генерации. На рис.6 приведено измеренное распределение длины волны максимума огибающей спектра ЛЛД по излучающей апертуре в QCW-режиме при сравнительно небольшой мощности тепловой нагрузки.

Общий характер спектрального распределения на рис.6 таков, что длина волны (за исключением провалов на длине ЛЛД 1.9 и 8.8 мм) тем больше, чем ближе излучающий кластер расположен к краю ЛЛД, при этом центральная часть распределения представляет собой практически плато. Последнее можно связать с профилем распределения температуры, имеющим максимум в центре излучающей апертуры, который обусловлен влиянием периферийных кластеров на более высокий нагрев центральных кластеров. Такое спектральное распределение принципиально согласуется с результатами расчётной модели распределения ТУН, имеющего максимумы на краях ЛЛД, а также качественно согласуется с расчётными данными на рис.1, демонстрирующем вблизи краёв ЛЛД провалы в распределении ТУН.

5. Обсуждение полученных результатов и выводы

Получены 3D поля ТУН, которые представлены в виде различных сечений конструкции ЛЛД, использующей два наиболее актуальных типа сабмаунта – на основе CuW и AlN. Результаты моделирования, косвенно подтверждённые экспериментально, в совокупности с результатами работ [7–10] показывают, что эффективные распределения ТУН в исследованных лазерных кристаллах, излучающих на длине волны 808 нм, приводят к заметному смещению максимума огибающей спектра отдельных кластеров и соответствуют напряжениям сжатия для исследованных образцов ЛЛД.

Рассчитаны абсолютные значения напряжений, возникающих вследствие разных механизмов возникновения ТУН, и их трёхмерные распределения в пятислойной структуре сборки ЛЛД. Подтверждено, что в рабочем режиме максимальные значения термоупругих напряжений существенно меньше напряжений, возникающих в процессе сборки лазерного чипа, поскольку наблюдаемая разность температур по излучающей апертуре существенно меньше перепада температур в термоцикле сборки. Расчёты показали, что в активной области ЛЛД эффективные усреднённые величины напряжений в конструкции, использующей сабмаунты из AlN, значительно меньше, чем в конструкции с CuW-сабмаунтом, что несомненно является преимуществом AlN.

В то же время CuW, в отличие от AlN, является токопроводящим материалом, благодаря чему при его использовании конструкция ЛЛД имеет несомненное преимущество. В этом случае легко обеспечивается низкоомный плюсовой сильноточный контакт, тогда как при использовании AlN для подведения тока к p-типу лазерного чипа необходима значительная толщина металлизации, что повышает тепловое сопротивление сборки и может вызывать проблемы с долговременной стабильностью работы

ЛЛД из-за эффекта ползучести металлизации, ускоренной протеканием токов накачки большой плотности.

Полученные результаты выявили интересные особенности распределения ТУН по излучающей апертуре и длине резонатора ЛЛД для рассмотренных двух типов сабмаунтов, в частности высокий уровень напряжений вблизи заднего глухого зеркала резонатора. Это следует учитывать как в уже используемых конструкциях ЛЛД, в технологиях монтажа и нанесения покрытий на зеркала, так и при разработке новых конструкций ЛЛД с повышенной мощностью, надёжностью и сроком службы в CW- и QCW-режимах.

Разработанная расчётная 3D модель для анализа термоупругих напряжений в многослойных конструкциях мощных ЛД и ЛЛД позволила впервые выявить принципиальную возможность смещения максимума ТУН из активной области в пассивные слои, в частности в слой припоя и даже в материал сабмаунта, что весьма привлекательно и нуждается в экспериментальной проверке. Результаты расчётов также показали, что дальнейшее более детальное исследование процессов монтажа ЛЛД с точки зрения возникновения ТУН в мощных лазерных кристаллах представляет значительный интерес для совершенствования технологий при создании ЛЛД повышенной мощности.

1. Xunchun Lin, Guyi Lin, Pengfei Zhao, Lirong Wang, Haijuan Yu. *Opt. Laser Technol.*, **116**, 219 (2019).
2. Sun Fangyuan, Shu Shili, Hou Guanyu, Wang Lijie, Zhang Jun, Peng Hangyu, Tian Sicong, Tong Cunzhu, Wang Lijun. *IEEE J. Quantum Electron.*, **55** (1), 1 (2019).
3. Zeng Deng, Jun Shen, Wenchi Gong, Wei Dai, Maoqiong Gong. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **134** (2), 41 (2019).
4. Robin K. Huang*, Bien Chann, James Burgess, Bryan Lochman, Wang Zhou, Mike Cruz, Rob Cook, Dan Dugmore, Jeff Shattuck, Parviz Tayebati. *Proc. SPIE*, **9730**, 97300C-1 (2017).
5. Безотосный В.В., Козырев А.А., Кондакова Н.С. и др. *Вестник ФИАН*, **43** (12), 369 (2016).
6. Безотосный В.В., Козырев А.А., Кондакова Н.С. и др. *Квантовая электроника*, **47** (1), 5 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (1), 5 (2017)].
7. Безотосный В.В., Гордеев В.П., Крохин О.Н., Микаелян Г.Т., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **48** (2), 115 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (2), 115 (2018)].
8. Безотосный В.В., Гордеев В.П., Олещенко В.А. *Квантовая электроника*, **48** (6), 502 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (6), 502 (2018)].
9. Hongyou Zhang, Chung-En Zah, Xingsheng Liu. *Proc. SPIE*, **10900**, 109000T (2019).
10. Zhiqiang Nie, Yao Lu, Tianqi Chen, Yu Zhang, Dehai Wu, Mingpei Wang, Lingling Xiong, Xiaoning Li, Zhenfu Wang, Xingsheng Liu. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, **8** (5), 818 (2018).
11. Zhu H., Liu K., Xiong C., Feng S., Guo C. *Microelectron. Reliab.*, **55** (1), 62 (2015).
12. Scholz C. *Thermal and Mechanical Optimisation of Diode Laser Bar Packaging* (Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2007).
13. Микаелян Г.Т. *Квантовая электроника*, **36** (3), 222 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (3), 222 (2006)].
14. Bogdanov E.V., Kolokolov K.I., Minina N.Y., in *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting 2017* (World Scientific, 2017, pp 475 – 478).