

Влияние уровня накачки на однородность распределения мощности и спектра по излучающей апертуре непрерывных линеек лазерных диодов

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

Проведены экспериментальные исследования и 3D моделирование тепловых параметров непрерывных линеек лазерных диодов (ЛЛД) для выявления причин ограничения их выходной мощности и срока службы. С помощью тепловизора получены картины тепловых полей для ЛЛД с 47 излучающими кластерами и фактором заполнения апертуры 50%, собранных в корпусе типа C-S-маунт. Методом зондирования измерены распределения мощности и спектров излучения по излучающим кластерам. Проанализированы полученные расчетные и экспериментальные результаты, а также проведено их сравнение и обсуждение.

Ключевые слова: линейки лазерных диодов, непрерывный режим генерации, мощность и спектр излучения.

1. Введение

В работах [1, 2] сообщалось о создании оригинальной конструкции линеек лазерных диодов (ЛЛД) с выходной мощностью 60 Вт в непрерывном режиме и до 300 Вт в квазинепрерывном режиме. Как было показано в работе [3], тепловой режим непрерывных ЛЛД со стандартной шириной излучающей апертуры 10 мм характеризуется достаточно выраженной неоднородностью отводимого теплового потока, которая обусловлена неодинаковыми условиями отвода тепла от центральных и периферийных кластеров. Сравнение положения максимумов спектров излучения центрального и крайних периферийных кластеров показало хорошее согласие с расчетными результатами для ЛЛД с 19 кластерами и фактором заполнения $FF = 50\%$. Следует отметить, что по мере роста выходной мощности, особенно в непрерывном режиме, возрастает актуальность не только повышения эффективности охлаждения активной области лазерного кристалла для отвода экстремально высоких тепловых потоков, но также решения проблемы неоднородности тепловых полей в ЛЛД. Примером успешного продвижения в данном направлении является недавняя публикация [4], в которой сообщается о получении от одной непрерывной ЛЛД мощности 880 Вт, что открывает новые горизонты для освоения киловаттного диапазона.

Повышение выходной мощности сопряжено с проблемой отвода тепловых потоков экстремальной плотности. Одним из путей решения данной проблемы является увеличение длины резонатора со стандартных 2 мм (для ЛЛД, выпускаемых промышленностью) до 4 мм и более. Снижение плотности тепловой нагрузки принципиально возможно также при увеличении фактора заполнения апертуры излучающими кластерами с типичных значе-

ний 50% до 70% при оптимизации ширины излучающего кластера. Повышение FF , кроме того, позволяет снизить плотность оптической нагрузки на выходное зеркало ЛЛД. Результаты наших расчетов [5] показали, что при увеличении длины резонатора и фиксированной тепловой нагрузке имеет место не только снижение плотности отводимых тепловых потоков, но также уменьшение перепадов температуры по длине резонатора и снижение температуры выходного зеркала. Это улучшает выходные параметры и повышает надежность линейки. Вместе с тем, при увеличении FF возрастает пороговый ток ЛЛД, а также обостряется проблема взаимного теплового влияния излучающих кластеров. Поэтому при построении модели ЛЛД нужно учитывать все основные параметры, включая пороговый ток, крутизну ватт-амперной характеристики ($ВтАХ$), полный КПД, тепловое и последовательное сопротивление, а также их зависимости от температуры и термоупругих напряжений.

В настоящей работе, являющейся одним из этапов разработки такой модели, основное внимание уделено более строгой экспериментальной проверке результатов работы [3], в частности путем изучения распределений мощности и спектров излучения отдельных кластеров, а также прямой проверке соответствия экспериментальных результатов расчетным данным, полученным с помощью 3D моделирования. Проведенные расчеты и полученные экспериментально результаты представляют самостоятельный интерес, а также важны для разработки систем спектрального суммирования мощности от ЛЛД и двумерных матриц лазерных линеек с целью их использования для прямой лазерной обработки материалов [6, 7]. Рассматриваемым вопросам посвящено значительное количество публикаций, в частности [8, 9].

2. Моделирование и результаты расчетов

Для моделирования тепловых процессов использовался метод конечных элементов в среде Comsol Multiphysics. Моделирование проводилось для непрерывных, смонтированных на медном теплоотводе типа C-S-маунт с $FF = 50\%$, ЛЛД шириной 10 мм, содержащих 47 излучающих

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

Поступила в редакцию 26 марта 2018 г., после доработки – 9 апреля 2018 г.

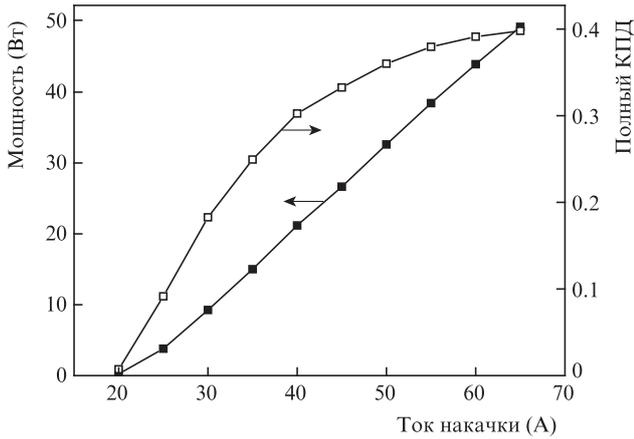


Рис. 1. Зависимость мощности и КПД линейки лазерных диодов от тока накачки.

кластеров. Сделаны следующие основные допущения: однородность накачки всех кластеров линейки во всем диапазоне токов накачки, однородность теплового контакта всех кластеров линейки, одинаковая толщина слоя припоя по всей площади теплопередачи, отсутствие прогиба кристалла ЛЛД («смайла»); граничным условием выбрано постоянство температуры нижней грани С–S-маунта (20 °С).

Для удобства сравнительного анализа результатов расчетов и экспериментов использовался параметр «тепловая нагрузка» лазерного кристалла:

$$P_{\text{therm}} = P_{\text{electr}}(1 - \eta_{\text{tot}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{electr}} = IU$; I – ток накачки; U – напряжение; η_{tot} – полный КПД. В расчете использовались полученные экспериментально зависимости выходной мощности (ВтАХ) и полного КПД от тока накачки, фрагмент которых показан на рис. 1.

Так, согласно данным рис. 1, при токе накачки 65 А и выходной мощности излучения 50 Вт полный КПД равен 40%, вложенная электрическая мощность $P_{\text{electr}} = 125$ Вт и, следовательно, тепловая нагрузка в данной рабочей точке $P_{\text{therm}} = 75$ Вт.

На рис. 2 приведены результаты 3D расчета по тепловой модели распределений температуры по линии актив-

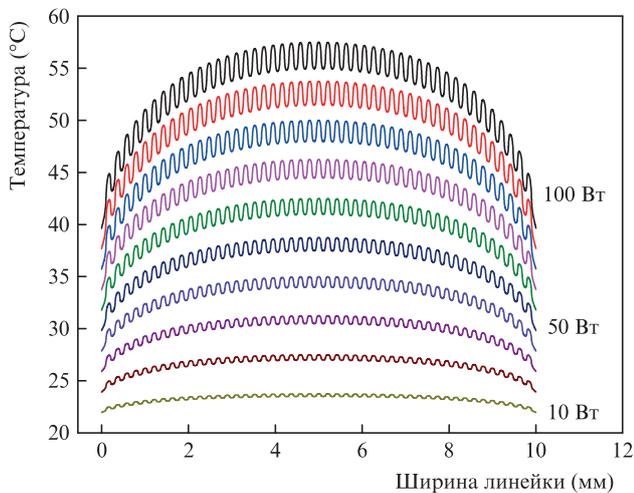


Рис. 2. Профиль температур по линии активной области на выходном зеркале ЛЛД при изменении тепловой нагрузки в диапазоне 10–100 Вт с шагом 10 Вт.

ного слоя на выходном зеркале излучающей апертуры ЛЛД с 47 излучающими кластерами при уровнях тепловой нагрузки в диапазоне от 10 до 100 Вт. Температурные распределения промодулированы с периодом, соответствующим периоду расположения кластеров, глубина модуляции в центральных кластерах больше, чем в периферийных, амплитуда модуляции растет с увеличением тепловой нагрузки от долей градуса при $P_{\text{therm}} = 10$ Вт до 2.5 °С при 100 Вт, при этом максимальная температура в центральном кластере возрастает от 23 °С до 57 °С. Таким образом, перегрев центрального кластера относительно нижней термостабилизированной поверхности С–S-маунта (20 °С) при тепловой нагрузке 100 Вт равен 37 °С. Как и ожидалось, при увеличении количества кластеров с 19 до 47 максимальная температура при одинаковых FF и P_{therm} практически не меняется, так, при тепловой нагрузке 60 Вт для 19 кластеров она равна 42.35 °С, а для 47 кластеров – 42.49 °С. Различие температур обусловлено незначительным изменением тепловых потоков при изменении размера кластера.

3. Экспериментальные результаты

Для прямой экспериментальной проверки достоверности результатов, полученных в [3], и их сравнения с расчетами 3D моделирования были проведены измерения распределения температур на работающей ЛЛД с помощью тепловизора. Чтобы повысить его пространственное разрешение, была использована линза из ZnSe, а для подавления засветки матрицы болометров изучением ЛЛД на длине волны 808 нм – пластинка Si с двусторонней полировкой. На изображении с монитора тепловизора (рис. 3) видно, что под центральной частью ЛЛД температура выше, чем под периферийными кластерами, и уменьшается по направлениям к периферийным кластерам и нижней грани С–S-маунта. Несмотря на принятые меры для подавления засветки, мощность излучения ЛЛД при работе с тепловизором была фактически ограничена уровнем 10 Вт из-за возможности повреждения элементов оптической схемы при их нагреве излучением ЛЛД.

Для получения адекватных абсолютных значений температуры была проведена калибровка тепловизора. Показанное на рис. 3 изображение соответствовало тепловой нагрузке около 50 Вт, максимальная температура под

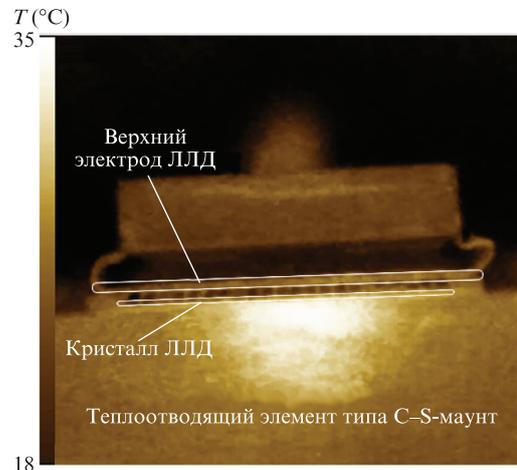


Рис. 3. Изображение фронтальной поверхности работающей ЛЛД на мониторе тепловизора при тепловой нагрузке 45 Вт. Белым контуром обозначены положения кристалла и верхнего электрода ЛЛД.

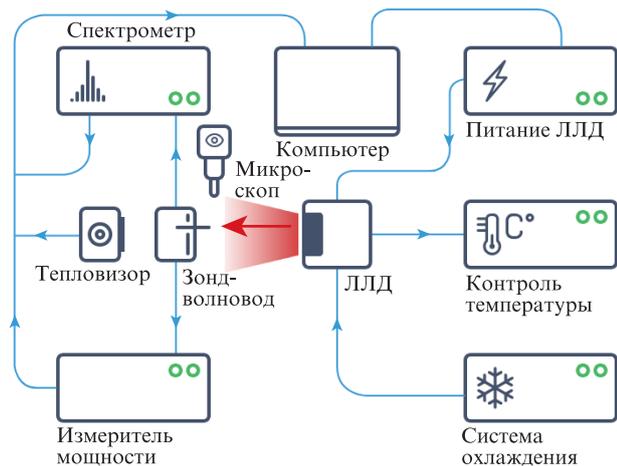


Рис.4. Схема эксперимента.

центральной частью линейки составила 35°C , базовая температура нижней грани C–S-маунта была 18°C (перепад температур 17°C). Расчетное значение температуры в максимуме распределения согласно рис.2 для данной тепловой нагрузки составляет 38°C при базовой температуре 20°C , т.е. перепад равен 18°C , что хорошо согласуется с показаниями тепловизора.

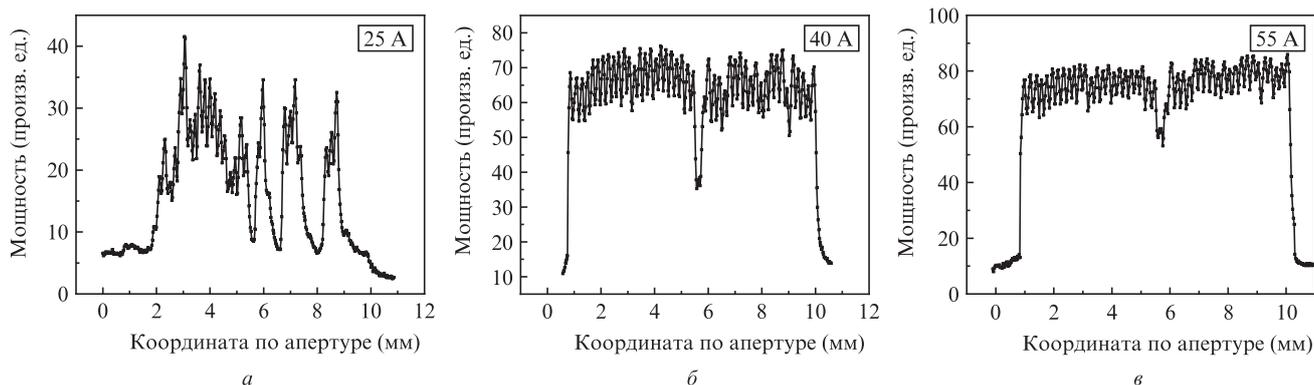
Схема экспериментальной установки для измерений распределения мощности и спектра излучения по апертуре непрерывных ЛЛД показана на рис.4. Образцы исследуемых линеек с длиной волны излучения 808 нм были смонтированы на теплоотводе типа C–S-маунт. Корпуса C–S-маунтов ЛЛД монтировались на массивный блок теплоотвода Newport (США) с внутренними каналами, подключенный к системе жидкостного охлаждения. Электрическое питание линеек осуществлялось драйвером накачки Fedal (С.-Петербург) со встроенной системой контроля параметров накачки. Измерения интегральной мощности ЛЛД проводились с помощью приборов Gentec (Канада). В отличие от эксперимента, описанного в работе [3], конструкция установки была доработана с учетом полученного опыта измерений и требований к измерению параметров ЛЛД с большим количеством кластеров. Для автоматизации измерений была добавлена моторизованная платформа микроперемещений Standa (Литва) с компьютерным управлением шаговым двигателем. На платформе находилась пятикоординатная головка микроперемещений (3 координаты и 2 угла) с установленным на ней измерительным зондом, позволившая проводить измерения на серии ЛЛД с большим числом кластеров. Кроме того, была изменена конструкция зонда:

разработан и изготовлен двухканальный зонд для измерения мощности и спектров излучения, его входная апертура имела диаметр 250 мкм . В схему был включен микроскоп, позволяющий более точно отрегулировать и визуально контролировать положение входной апертуры зонда относительно зеркала ЛЛД при сканировании излучающей апертуры.

При изменении уровня накачки, особенно при высокой тепловой нагрузке, требовалось определенное время для установления стационарного теплового режима ЛЛД, поэтому измерения мощности и спектров излучения в каждой рабочей точке ВТАХ после ступенчатого изменения тока накачки проводились, когда устанавливалось тепловое равновесие. Полученные в результате измерений данные поступали в компьютер для дальнейшей обработки.

На рис.5 показаны результаты сканирования мощности излучения по апертуре ЛЛД при различных токах накачки. При токе накачки 25 А (рис.5,а) и соответствующей выходной мощности около 4 Вт распределение мощности неоднородно и имеет сильно выраженную асимметрию слева. Боковые кластеры находятся ниже порога генерации, распределение мощности по излучающей части апертуры имеет вид квазипериодических пиков с глубокими провалами; видна модуляция, соответствующая по периоду положению излучающих кластеров. При токе накачки 40 А (рис.5,б) и выходной мощности 21 Вт излучающая апертура заметно заполняется, в генерацию включаются боковые кластеры, при этом огибающая распределения выравнивается (но имеет 50%-ный провал в центре), мощность боковых кластеров существенно возрастает и незначительно (в пределах 10%) отстает от средней мощности, сохраняется небольшая асимметрия слева. При токе 55 А (рис.5,в) и выходной мощности 38 Вт распределение становится почти симметричным, мощность в боковых кластерах практически достигает среднего уровня распределения, провал мощности в центральных кластерах снижается с 50% до менее 20%. В целом, картина заполнения излучением апертуры ЛЛД с ростом тока накачки качественно аналогична картине, наблюдаемой в лазерах с широким полосковым контактом.

На рис.6 представлены расчетные распределения температуры по апертуре ЛЛД с 47 кластерами и типичные экспериментальные результаты, полученные из спектральных измерений при сканировании апертуры (тепловая нагрузка 75 Вт). По оси ординат отложена разность температур между измеряемым и центральным (нулевым) кластером. Совпадающие максимумы расчетной и экспериментальной кривых соответствуют положению центрального кластера. По температурной шкале наблюда-

Рис.5. Распределение мощности излучения ЛЛД по излучающей апертуре при непрерывных токах накачки 25 А (а), 40 А (б) и 55 А (в).

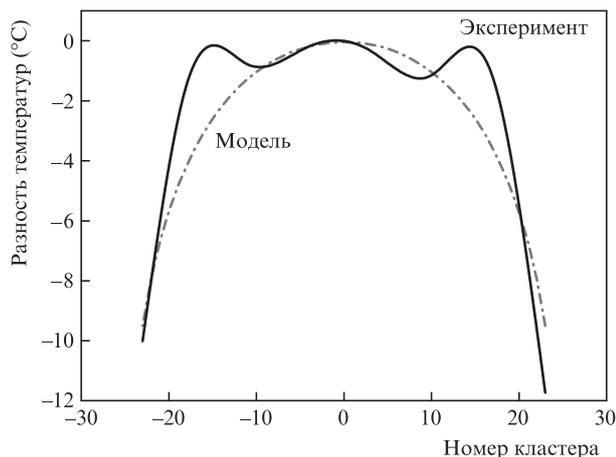


Рис.6. Расчетная и экспериментальная зависимости перепада температуры между центральным (нулевым) и периферийными кластерами на излучающей апертуре ЛЛД при тепловой нагрузке 75 Вт.

ется хорошее согласие результатов, однако экспериментальные результаты имеют более сложную координатную зависимость. В отличие от расчетной, экспериментальная кривая несколько асимметрична, на ней видны 3 максимума, расположенных в центре ЛЛД и симметрично на удалении 15 кластеров. Возможно, такая картина распределения температур связана с распределением термических упругих напряжений, возникающих в результате как монтажа кристалла, так и нагрева линейки в рабочем режиме.

4. Обсуждение и выводы

Выполнено 3D моделирование и экспериментальное измерение распределения температур в непрерывных ЛЛД с шириной апертуры 10 мм, содержащих 47 излучающих кластеров с $FF = 50\%$. Рассчитаны температурные профили при различном уровне тепловой нагрузки. Результаты измерений температурных распределений в работающей ЛЛД, полученные с помощью тепловизора при небольших уровнях выходной мощности (тепловая нагрузка до 50 Вт), качественно подтвердили характер распределения температур и хорошо согласуются по величине с перепадами температур, найденными с помощью теплового 3D расчета при соответствующей тепловой нагрузке. Температурные профили в развитом режиме генерации измерить не удалось из-за засветки тепловизора и нагрева элементов оптической схемы излучением ЛЛД.

Схема эксперимента модифицирована для изучения однородности мощности и спектра излучения отдельных кластеров. Проведены измерения распределений по апертуре мощности излучения нескольких ЛЛД при различных уровнях накачки. Результаты показали, что с ростом тока происходит выравнивание мощности излучения отдельных кластеров, подключение к генерации периферийных кластеров, более полное заполнение апертуры излучением, снижение асимметрии распределения мощности. При интегральной выходной мощности 38 Вт в центральной части ЛЛД мощность излучения существ-

венно (до 20%) ниже, чем средняя по всем кластерам, что нельзя в полной мере объяснить более высокой температурой в центре из-за менее благоприятных условий отвода тепла вследствие теплового влияния периферийных кластеров. Изучение зеркал резонаторов кластеров при большом увеличении под микроскопом не выявило на них каких-либо дефектов. Наличие объемных дефектов гетероструктуры различных образцов ЛЛД, расположенных строго в центральной части лазерного кристалла, представляется маловероятным. Данный вопрос требует дальнейшего исследования. Вместе с тем, наблюдение увеличенной ближней зоны при выходной мощности более 60 Вт показало отсутствие узких провалов мощности в центральной части ЛЛД.

Температурные профили, полученные из спектральных измерений при сканировании апертуры, хорошо согласуются по абсолютной величине с расчетными данными, однако характер распределения более сложный и существенно отличается от расчетного, что также требует дальнейшего изучения.

Разработанная схема измерений с использованием зонда имеет преимущество перед схемой со сканированием увеличенного с помощью оптики изображения ближней зоны ЛЛД, поскольку не вносит искажений. Такая схема может быть применена для корректировки технологических режимов монтажа лазерных кристаллов, сертификации и экспресс-отбора ЛЛД по параметрам однородности распределения мощности и спектра излучающих кластеров, в частности для использования в системах спектрального суммирования.

Авторы выражают благодарность Ю.М.Попову, О.Н.Крохину, Г.Т.Микаеляну и Е.А.Чешеву за помощь и интерес к работе, а также Н.Г.Борисенко за предоставленную возможность использования вычислительных мощностей.

1. Безотосный В.В., Козырев А.А., Кондакова Н.С., Кондаков С.А., Крохин О.Н., Микаелян Г.Т., Олещенко В.А., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Кр. сообщ. физ., ФИАН*, №12, 41 (2016).
2. Безотосный В.В., Козырев А.А., Кондакова Н.С., Кондаков С.А., Крохин О.Н., Микаелян Г.Т., Олещенко В.А., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **47** (1), 5 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (1), 5 (2017)].
3. 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)].
4. Schmidt B., Kaul T., Karow M., Crump P. *Proc. SPIE*, **10086**, 10086C-1 (2017).
5. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **44** (2), 145 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (2), 145 (2014)].
6. Crump P., Decker J., Winterfeldt M., Maaßdorf A., Erbert G., Tränkle G. *Proc. SPIE*, **9348**, 93480D-1 (2015).
7. Haas M., Rauch S., Nagel S., Beißwanger R., Dekorsy T., Zimer H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **53** (3), 2600111 (2017).
8. Huang R.K., Chann B., Burgess J., Lochman B., Zhou W., Cruz M., Cook R., Dugmore D., Shattuck J., Tayebati P. *Proc. SPIE*, **9730**, 97300C-1 (2016).
9. Meng H., Ruan X., Du W., Wang Z., Lei F., Yu J., Ta H. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 1 (2017).