



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ВЫСОКОМОЩНЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ КИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ

ДЛЯ КОНФИГУРАЦИЙ DPSSLs.

ЧАСТЬ 2

Д.Ху¹, Ц.Ван¹, С.Ли¹, Л.Гао¹, В.Цай¹, Х.Чжан¹, Ч.Ма¹,
И.Шан¹, И.Фан¹, С.Лян¹, С.Лю^{1,2};

¹ Focuslight Technologies Inc., Технологическая Зона,
Сиань, Шэньси, КНР;

² Государственная ключевая лаборатория пере-
ходной оптики и фотоники, Институт оптики
и точной механики Сианя, Китайская академия
наук, Новый индустриальный парк, Зона техноло-
гического развития, Сиань, Шэньси, КНР

Во второй части статьи^{*} представлены последние достижения в области компоновки решеток высокомо мощных диодных лазеров, рассмотрены такие ключевые факторы разработки процессов компоновки лазерных решеток, как контроль температуры, анализ отказов и оценка надежности. Результаты показывают, что созданные лазерные устройства с высокой мощностью, узким спектром, высокой электрооптической эффективностью и высокой надежностью подходят для использования в качестве твердотельной лазерной накачки.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОМОЩНЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ КИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ

Благодаря достижениям технологий созда-
ния диодных лазерных баров и развитию тех-
нологий их компоновки, значительно улуч-
шились характеристики источников накачки
высокомощных диодных лазеров. Эволюция
выходной мощности линейки лазерных дио-
дов постоянно демонстрировала ее увеличение
(рис.13, 14). В массовом производстве из ком-
мерческих материалов выпускаются диодные

ADVANCEMENTS IN PACKAGING OF KILO-WATTS LEVEL HIGH POWER DIODE LASERS FOR DPSSLs APPLICATIONS.

PART 2

D.Hou¹, J.Wang¹, X.Li¹, L.Gao¹, W.Cai¹, H.Zhang¹, C.Ma¹,
Y.Shang¹, Y.Fan¹, X.Liang¹, X.Liu^{1,2};

¹ Focuslight Technologies Inc., High-Tech Zone, Xi'an,
Shaanxi, China

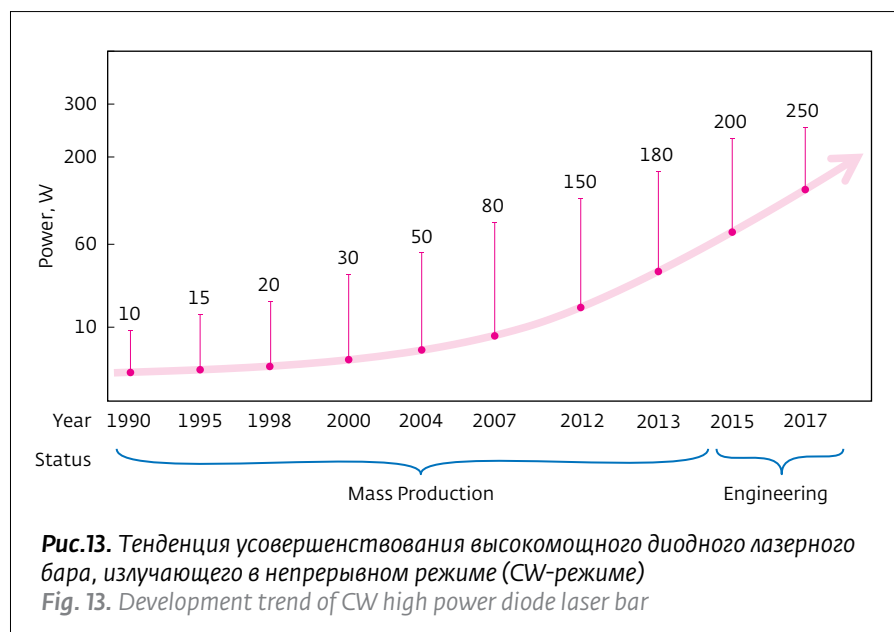
² State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics,
Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese
Academy of Sciences, New Industrial Park, Xi'an Hi-Tech
Industrial Development Zone, Xi'an, Shaanxi, China

The second part of the work^{*} reports on the latest advancements in packaging of high power diode laser arrays. In this paper, the key factors, such as thermal management, processes development, failure analysis and reliability evaluation are presented in developing kW-level diode laser arrays. A variety of high power diode laser arrays are fabricated and tested. The results indicate that the devices with high power, narrow spectrum, high electro-optical efficiency and high reliability, are suitable for solid state laser pumping.

ADVANCES IN KILO-WATTS LEVEL HIGH POWER DIODE LASERS

With the advances in diode laser bar technologies and the development of packaging technologies, the performances of high power diode laser pumping sources have been improved significantly over the past years. The evolution of the output power of diode laser bar is shown in Figure 13 and Figure 14. For reliable operation in mass production from commercial products, the CW output power of an 808nm single bar is up to 200W, and QCW output power of a single bar is up to 500W [24]. The output power reaches 250W in CW mode and 600W in QCW mode in engineering level. In order to further scale the output power, different packaging technologies and structures is developed to achieve KW-watts and even ten KW-watts level high power diode lasers, including horizontal array, liquid cooled diode laser stack and conduction cooled diode laser stack etc.

* Часть 1, см. "Фотоника", 2017, № 5, с. 28-42.

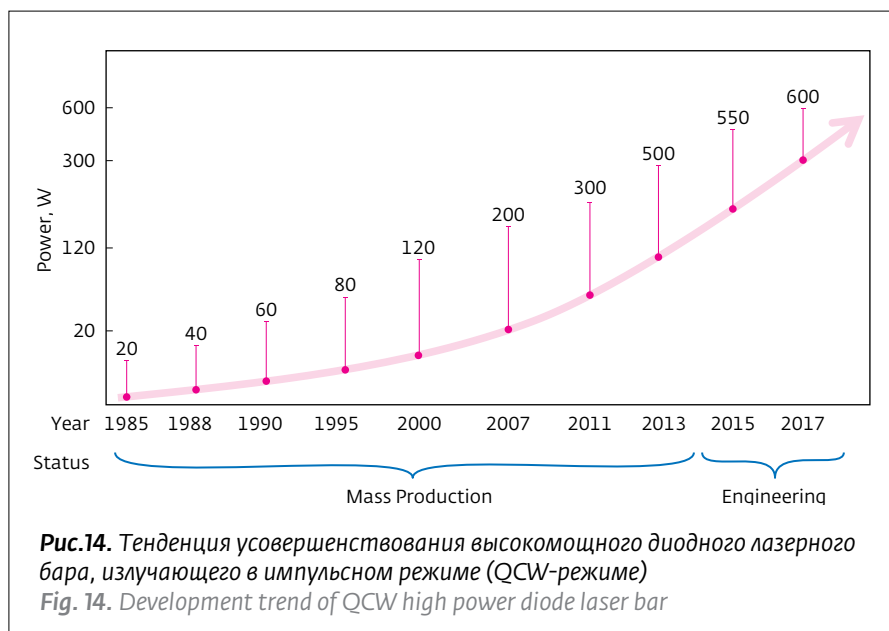


Single bar package structure

Based on the micro-channel liquid cooler, diode laser array can be constructed with four important parts: MCC, a laser chip, a cathode plate, and an insulator as shown in Figure 15 [13]. The heat is mainly dissipated through the MCC cooler. In order to improve the performance of the MCC laser array, it's critical to optimize the MCC structure with sophisticated structure design.

Figure 16 shows a typical PVI and spectrum data of a liquid cooled single bar diode laser packaged with improved MCC structure in CW and QCW mode. Figure 16 (a) shows the output power of 200W at 199.8A in CW mode. For QCW

линейки с выходной мощностью до 200 Вт с одного бара, излучающего на длине волны 808 нм в непрерывном режиме, а выходная мощность одного бара, излучающего в импульсном режиме, достигает 500 Вт [24]. На уровне инженерных исследований достигнуты значения выходной мощности 250 Вт в непрерывном режиме и 600 Вт в импульсном режиме. Для дальнейшего увеличения выходной мощности диодных лазеров необходимо разрабатывать новые технологии компоновки диодных решеток и применять их для достижения мощности на уровне киловатт



Focuslight Technologies Inc (Focuslight) (Китай) – это быстроразвивающаяся высокотехнологичная компания, основанная в 2007 году и занимающаяся исследованием, разработкой и производством лазерных диодных систем и высокомощных диодных модулей. Представлены линейки одиночных лазерных диодов для диапазона 808–940 нм и матрицы, построенные на них, работающие при высоких температурах до 74 °C с мощностью до 300 Вт на линейку. Благодаря инженерному опыту разработок в области термодина-

мики, оптики и механики, Focuslight обеспечивает качественное выполнение таких производственных процессов, как монтаж кристаллов, сборка с коллимацией быстрой оси, оптоволоконное соединение и системная интеграция.

Компания **"ОЭС Спецпоставка"** представляет весь спектр продукции Focuslight на территории РФ и предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции, полную техническую поддержку, а также предоставление образцов.

и даже десятков киловатт. Они включают в себя горизонтальную решетку, стек диодного лазера с жидкостным охлаждением, стек с охлаждением за счет теплопроводности и т.д.

Структура компоновки с одним баром

Взяв за основу микроканальный жидкостный охладитель, можно собрать упаковку диодного лазера, в конструкцию которой входят четыре важных компонента: микроканальный охладитель (МКО), лазерный чип, катодная пластина и изолятор (см.рис.15 из работы [13]). Тепло в основном рассеивается через охладитель МКО. Чтобы улучшить производительность лазерной решетки с МКО, крайне важно оптимизировать конструкцию сложной структуры МКО.

На рис.16 показаны стандартные PVI-характеристики и спектры излучения упаковки лазерного диода в виде одного бара с жидкостным охлаждением. Упаковка излучает в непрерывном и импульсном режиме и содержит усовершенствованную структуру МКО. На рис.16(a) показано, что в непрерывном режиме выходная мощность 200 Вт получена при токе 199,8 А. Для импульсного режима максимальная выходная пиковая мощность 500 Вт была достигнута при токе 407 А, при условии 8% рабочего цикла: 200 мкс, 400 Гц (см. рис.16(b)).

Максимальная выходная мощность диодного лазерного стержня с МКО ограничена либо тепловым загибом, либо катастрофическим повреждением оптического зеркала (КПОЗ) [25]. Надежная работа лазерного устройства в значительной степени зависит от величины теплового загиба и значения КПОЗ. Максимальная мощность диодного лазера с МКО, излучающего в импульсном режиме, тестировалась на пластине толщиной 940 нм при температуре 20 °С (рис.17). Выходная мощность достигает 1088 Вт/бар до появления теплового загиба в условиях испытаний: 600 мкс, 133 Гц, 1000 А. Максимальная степень преобразования электрической энергии в оптическую составляет приблизительно 75% при токе 130 А. Степень преобразования электрической энергии в оптическую незначительно уменьшается с 75% до 58% при увеличении тока от 130 А до 1000 А.

Также в ходе испытаний были получены данные о сроке службы стандартных диодных лазерных линеек ($\lambda=808$ нм) мощностью 500 Вт, паянных твердым припоем (рис.18). Демонстрируется отсутствие снижения мощности для МКО-одностержневого лазера мощностью 500 Вт,

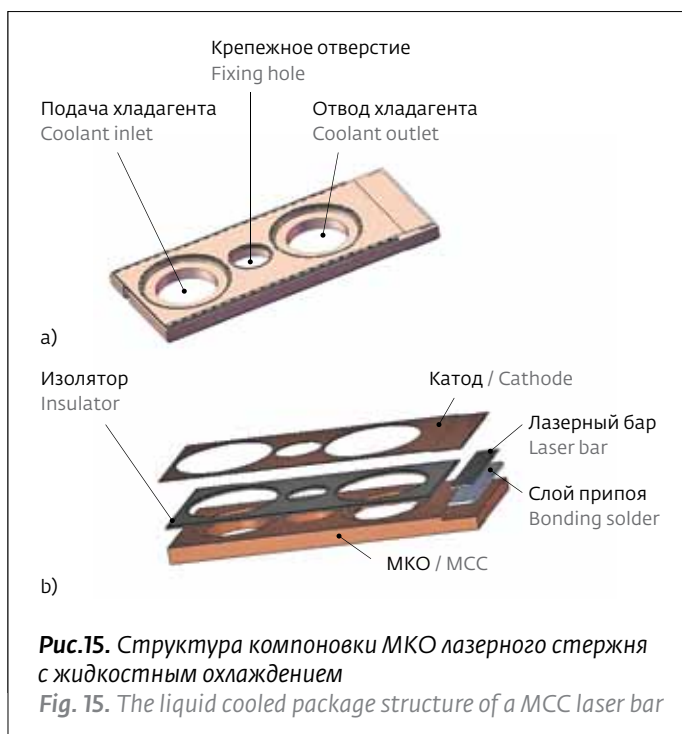


Рис.15. Структура компоновки МКО лазерного стержня с жидкостным охлаждением

Fig. 15. The liquid cooled package structure of a MCC laser bar

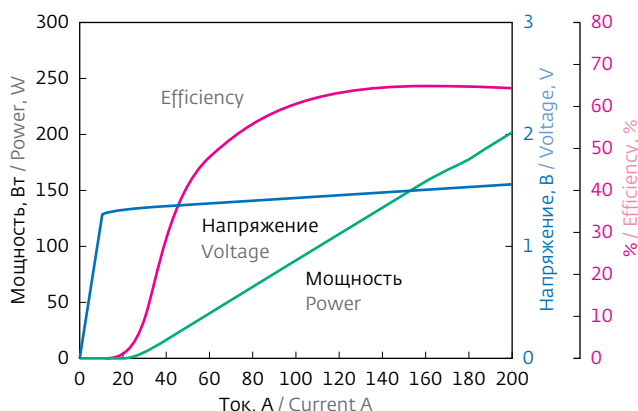
mode, the output peak power of 500W at 407A under the condition of 8% duty cycle (200us, 400Hz) was obtained, as shown in Figure 16 (b).

The maximum output power of the MCC diode laser bar is limited either by thermal rollover or catastrophic optical mirror damage (COMD) [25]. Reliable operation of the laser device highly depends on high thermal rollover and COMD value. The maximum QCW power of the MCC diode laser bar is tested with the 940nm wafer under the temperature of 20 °C as shown in Figure 17. The output power reaches 1088W/bar before thermal rollover in the testing condition of 600us, 133Hz, 1000A. The maximum wall plug efficiency is about 75% in the current of 130A. The wall plug efficiency slightly decreases from 75% to 58% when the current increases from 130A to 1000A.

The lifetime data of typical 808nm 500W single bar hard solder bonded diode lasers were also characterized, as shown in Figure 18. It can be seen that there is no power degradation for 500W hard solder MCC single bar after running 1.38×10^9 shots. The performance of the hard solder MCC single bar with AuSn bonding technology is stable and reliable.

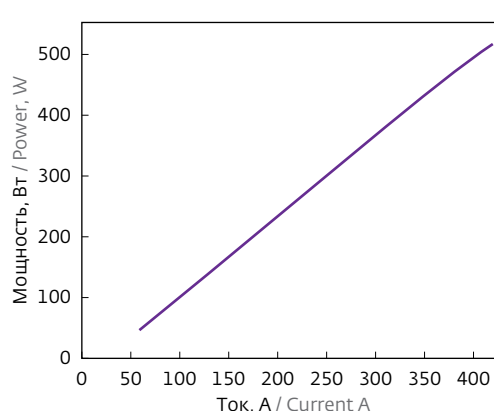
The non-linearity of the near-field of emitters (or the so called "smile") in a laser diode array poses significant challenges in optical coupling and beam shaping and has become one of the major roadblocks in broader applications of laser arrays. If near field linearity of a laser array is poor, the coupling efficiency of the laser array to a fiber array or micro-optics such as a fast

PVI-характеристики (мощность, напряжение, ток)
PVI characteristics



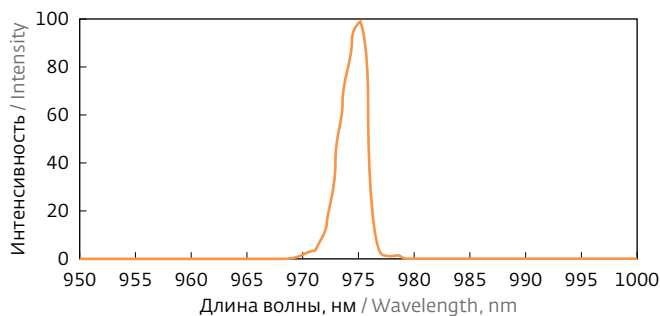
Pop(W)	200,00	Slope Eff.(W/A)	1,16	Rs(mOhms)	1,25
Iop(A)	199,80	Eff.@Iop(%)	64,39	V@Iop(V)	1,55
Ith(A)	25,42	Max Eff.(%)	64,87	TC	20,00

PVI-характеристики (мощность, напряжение, ток)
PVI characteristics



Peak Pop(W)	200,00	Slope Eff.(W/A)	1,30
Iop(A)	407,71	Average Pop(W)	64,87
Ith(A)	20,18	TC	22,0

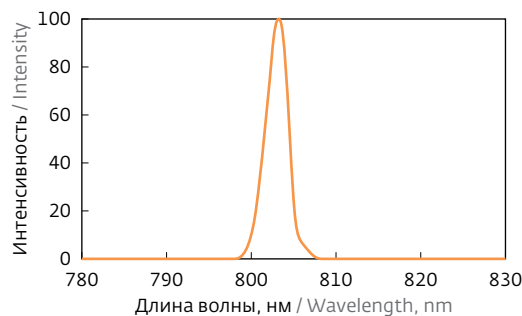
Спектр / Spectrum



Peak wavelength(nm)	975,09
Centroid wavelength(nm)	974,47
FWHM(nm)	2,97
FW90% Energy(nm)	4,01

a)

Спектр / Spectrum



Peak wavelength(nm)	805,05
Centroid wavelength(nm)	804,75
FWHM(nm)	3,12
FW90% Energy(nm)	4,90

b)

Рис.16. Типичные PVI-характеристики и спектры излучения линейки лазерного диода с жидкостным охлаждением: (а) МКО с жидкостным охлаждением, компоновка с помощью пайки твердым припоем (CW-режим); (б) МКО с жидкостным охлаждением, компоновка с помощью пайки твердым припоем (QCW-режим)

Fig.16. A typical PVI and spectrum data of liquid cooled single bar diode laser, (a) hard solder MCC liquid cooling package in CW mode; (b) hard solder MCC liquid cooled package in QCW mode

паянного твердым припоем, после выполнения $1,38 \times 10^9$ импульсов. Технические характеристики МКО-одностержневого лазера, паянного твердым AuSn-припоем, проявили стабильность и надежность.

Нелинейность ближнего поля излучателей (или так называемая "дуга") в решетке диодного лазера создает значительные проблемы при формировании луча и использовании его в оптической связи. Этот эффект превратился в одно из основных препятствий в расширении применений лазерных решеток. Если линей-

axis collimation lens is very low. Increasing the near-field linearity of a pumping laser diode array enables the laser system manufacturer to improve the laser system compactness, optical coupling efficiency, power, and beam quality while at the same time reducing manufacture cost in the laser system, such as diode pumped solid state lasers and fiber lasers. Therefore, the near-field linearity of a laser bar is one of the key specifications of laser array products and improving the near field performance is especially important in order to increase production yield, reduce cost and gain competitiveness [26].

ность ближнего поля лазерной решетки недостаточная, то эффективность связи лазерной решетки с волоконной матрицей или микрооптикой (например с коллимационной линзой с быстрой осью) очень мала. Увеличение линейности ближнего поля лазерного диода позволяет производителю лазерной системы повысить компактность лазерной системы, эффективность оптической связи, мощность и качество луча. Одновременно с этим увеличение линейности позволяет снизить затраты на производство лазерной системы, например твердотельных лазеров с диодной накачкой и оптоволоконных лазеров. Поэтому линейность ближнего поля лазерного стержня – одна из ключевых характеристик лазерных решеток. Улучшение характеристики ближнего поля особенно важно для увеличения выхода годной продукции, это снижает ее стоимость и повышает конкурентоспособность [26].

Увеличенные изображения "дуги" стандартной упаковки диодной лазерной решетки показаны на рис.19. Было обнаружено, что если достичь лучшей совместимости коэффициентов теплового расширения (СТЕ) между подставкой и лазером, то "дуга" значительно уменьшается. Был проведен статистический анализ результатов наблюдений "дуги" для 898 образцов решеток высоко-мощных диодных лазеров, скомпонованных с МКО. Обнаружено, что среднее значение "дуги" составляет 0,52 мкм. Результат показывает, что влияние эффекта "дуги" приемлемо у решеток высоко-мощных диодных лазеров, скомпонованных с МКО с помощью твердого припоя.

Горизонтальные решетки

Для некоторых конструкций, например используемых в случаях, когда требуется более высокая оптическая мощность (боковая накачка твердотель-

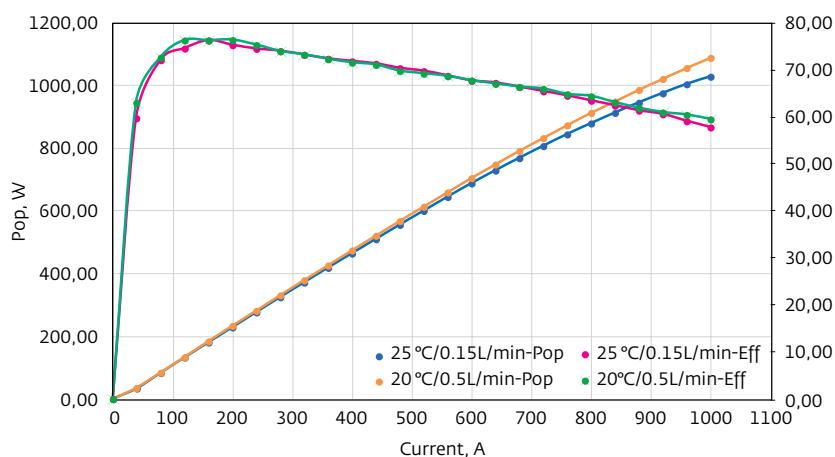


Рис.17. Максимальная мощность диодного лазера с МКО (QCW-режим)
Fig. 17. The maximum QCW power of the MCC diode laser bar

The enlarged "smile" images of a typical diode-laser array is shown in Figure 19. It was found that when there was a better CTE match between submount and the laser bar, "smile" was decreased significantly. For MCC-packaged high power diode laser arrays, the statistics of smile data of 898 samples were conducted. It is found that the average smile value is 0.52μm. The result shows that high power diode laser arrays using hard soldering MCC-packaged technology have acceptable smile.

Horizontal arrays

For certain applications, such as side pumping of a solid state laser, when higher optical power are required, an array of laser bars are packaged horizontally. The industrial water can be directly used, as the diode laser

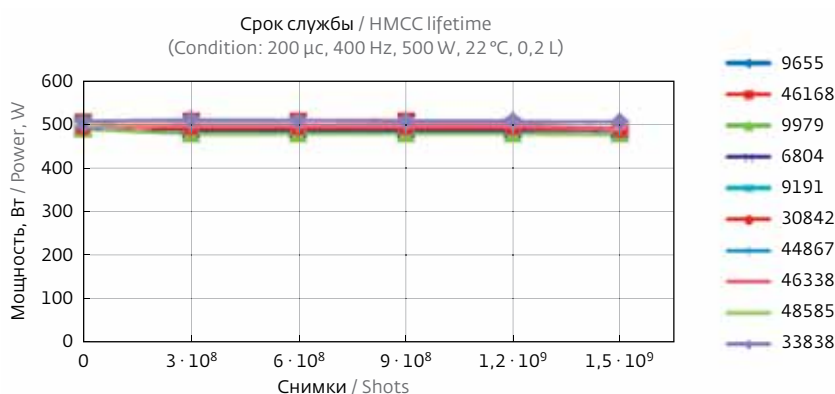


Рис.18. Результаты наработки на отказ стандартного лазерного бара ($\lambda=808$ нм) с микроканальным охладителем, припаянного твердым припоем (QCW-режим)
Fig. 18. Lifetime test result of a typical 808nm QCW single bar hard solder bonded micro-channel cooler diode laser



Рис.19. Увеличенное изображение «дуги» диодного лазера, созданного с помощью твердого припоя
Fig.19. Enlarged "smile" image of the hard solder diode laser

ного лазера), решетка лазерных стержней комплектуется горизонтально. В этих случаях для охлаждения можно непосредственно использовать промышленную воду, так как решетки диодных лазеров электрически изолированы от охлаждающей пластины. Для горизонтальной решетки в конфигурации 3×10 баров (рис.20) диодный лазер генерирует в импульсном режиме. Эта решетка состоит из десяти 3-барных модулей, припаянных на микроканальном охладителе, ожидаемая выходная оптическая мощность 6000 Вт. СТЕ-совместимые подставки применяются для пайки диодного лазерного стержня твердым припоем для обеспечения большей надежности [27].

Числовое моделирование горизонтальной решетки из 30 барных диодных лазерных стеков проводилось с использованием анализа методом конечных элементов (FEA), результаты представлены на рис.21. Результаты моделирования показали, что горизонтальная решетка работает в условии 6,6% от рабочего цикла (200 мкс, 330 Гц) в импульсном режиме с выходной мощностью 6000 Вт. Температура охлаждающей воды составляет 25 °С, расход воды составляет 2 л/мин. На рис.22 показано распределение

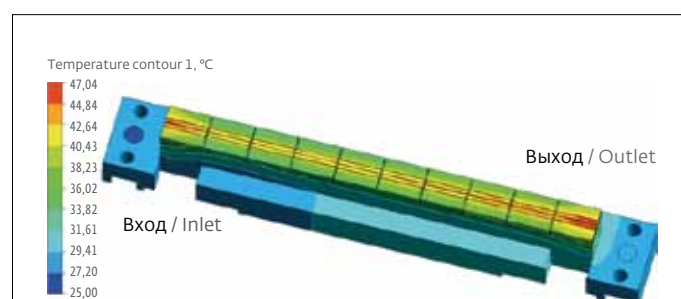


Рис.21. Числовое моделирование горизонтальной решетки из 30 баров
Fig. 21. The numerical simulation of 30-bars horizontal array

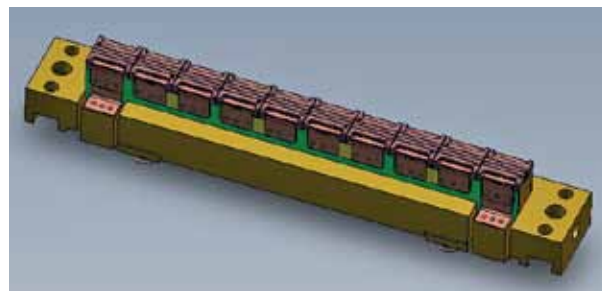


Рис.20. Структура упаковки 3×10 баров в стандартной конфигурации горизонтальной решетки
Fig.20. Package structure design of a typical horizontal 3×10 bar arrays

stacks are electrically isolated from the cooling plate. For the horizontal bar array of 3×10 package structure illustrated in Figure 20, the diode laser is used in QCW mode because of compact design. This array consists of ten 3-bars modules soldered on a macro channel cooler with the expected optical output peak power of 6000W. The CTE-matched submounts are applied for bonding the laser diode bar with hard solder to achieve higher reliability [27].

The numerical simulation of a 30 bars horizontal array of diode laser stacks were conducted using finite element analysis (FEA) as shown in Figure 21. In

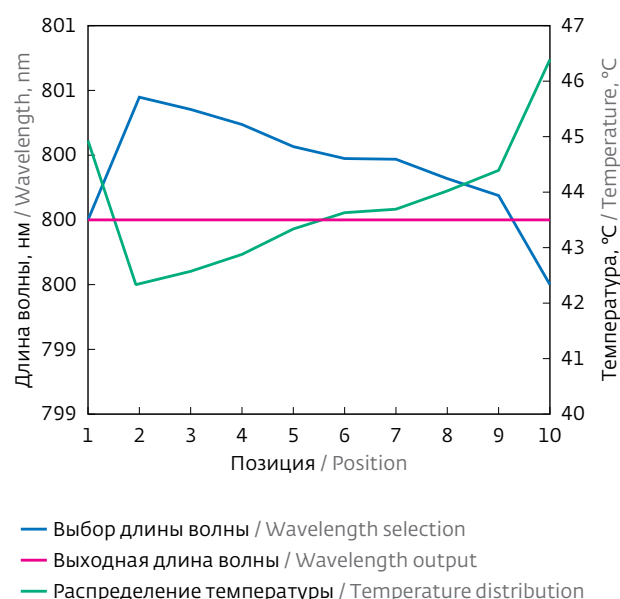
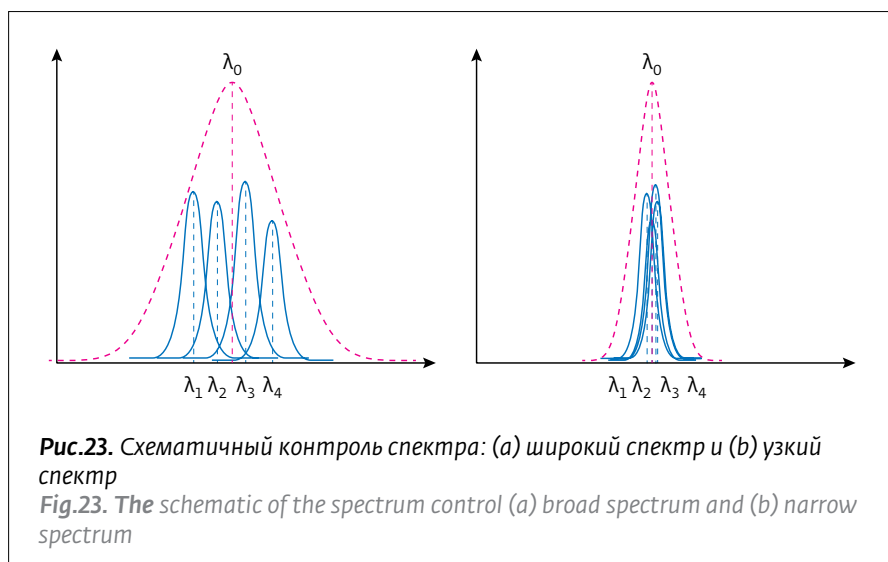


Рис.22. Распределение длины волны и температуры вдоль массива горизонтальной решетки
Fig. 22. The wavelength and temperature distribution along the horizontal array

температуры 3-барных стеков вдоль охлаждающей пластины от входа до выхода. Видно, что температура распределяется неравномерно.

Рассеянные волны разных стеков приводят к возникновению широкого спектра (рис.23а), а концентрированные волны приводят к получению узкого спектра (рис.23б). Для получения узкого спектра и точно заданной центральной длины волны излучения от горизонтальной решетки требуется точное управление спектром стеков, состоящих из трех диодных линеек, в десяти положениях. Как правило, для устройств с диодным лазером ($\lambda=808$ нм) на основе GaAs коэффициент смещения длины волны от температуры составляет 0,28 нм/К. То есть при колебании температуры на 1К длина волны смещается на 0,28 нм. Распределение выбранной и выходной длины волны трех-стержневых стеков показано на рис.22. Равномерная длина волны излучения наблюдается вдоль охлаждаемой пластины. Как показывают результаты моделирования, центральная длина волны хорошо контролируется до 800 нм.

На рис.24 показан пример изготовленных горизонтальных решеток из лазерных линеек. Кривые LIV могут быть получены путем измерения мощности или напряжения выходного света в зависимости от движущегося тока. Графики мощности по сравнению с входным током и соответствующим спектром излучения стека



the simulation, the horizontal array operates in the condition of 6.6% duty cycle (200μ, 330Hz) in QCW mode with the output peak power of 6000W. The temperature of cooling water is 25 °C and the water flow rate is 2L / min. Figure 22 illustrates the temperature distribution of the 3-bars stacks along the cooling plate from the inlet to outlet. It can be seen that the temperature distribution is not uniform.

The scatter wavelengths of different stacks lead to wide spectrum in Figure 23 (a), while the concentrate wavelengths lead to narrow spectrum in Figure 23 (b). In order to achieve narrow spectrum and accurate central wavelength of horizontal array, accurate spectrum control is required for the 3-bars stacks on the ten positions. Typically for GaAs-based 808nm diode laser devices, the wavelength temperature coefficient is 0.28nm/K, which indicates the temperature change of 1K results in 0.28nm change of wavelength. The distribution of selected and output wavelength of the 3-bars stacks are illustrated in Figure 22. The uniform output wavelength is obtained along the cooling plate. The central wavelength is well controlled to 800nm based on the simulation.

Figure 24 shows the example of manufactured horizontal bar arrays. The LIV curves can be obtained by the measurement of output light power or voltage as a function of the driving current. The graphs of power versus input current and corresponding spectrum of the diode laser stack are illustrated in Figure 25. Based on the hard solder packaging technology and the spectrum control method the optical output power reaches as much as 6000W in QCW mode. The spectrum value of full width of half maximum (FWHM) and full width of 90% energy (FW90%E) is 2.36nm and 3.37nm respectively, which is rather small for a 30 bars horizontal array of

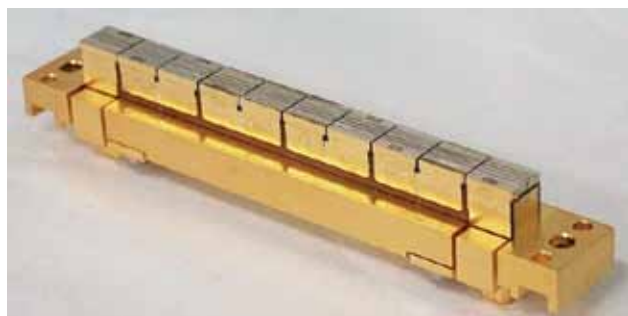


Рис.24. Типичная конфигурация массива из 3×10 баров в виде горизонтальной решетки
Fig. 24. Samples of typical 3×10 horizontal bar arrays

диодного лазера проиллюстрированы на рис.25. Опираясь на технологию твердотельной пайки и на метод управления спектром, можно получить в импульсном режиме выходную оптическую мощность 6 000 Вт. Значение ширины спектра на полувысоте максимума (FWHM) и полной ширины на уровне 90% энергии (FW90%E) составляет 2,36 нм и 3,37 нм, соответственно. Это довольно мало для 30-стержневой горизонтальной решетки диодных лазерных стеков. Как правило, значение FWHM составляет около 3 нм, а 90% энергии составляет около 5 нм.

Вертикальные стеки с жидкостным охлаждением

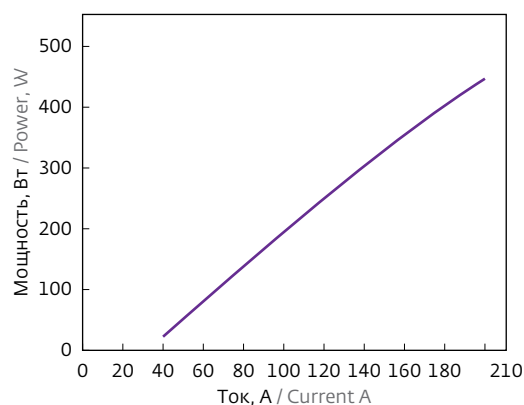
Можно масштабировать мощность вертикальных стеков путем объединения многочисленных стержней по вертикали. Качество луча вертикальных стеков лазеров вдоль медленной оси остается таким же, как у одиночной лазерной линейки*. По мере совершенствования технологии компоновки, количество лазерных стержней в вертикальном стеке лазера может составлять до 70–80 бар, а максимальная выходная мощность вертикального стека лазера составляет от нескольких сотен ватт до десятков тысяч ватт [13].

Диодный лазер в конфигурации вертикального стека (V-стек) с жидкостным охлаждением может быть скомпонован с диодными лазерами с МКО. На рис.26(а) показаны структуры компоновки V-стека с 15 диодными лазерами с МКО. Важные составные части – катод, анод, подача и отвод хладагента и скомпонованные стержни – отмечены на чертежах. Благодаря хорошей теплоотдаче точно спроектированного МКО, лазер в конфигурации V-стека способен работать в непрерывном и импульсном режиме с высоким рабочим циклом.

Рис.26(б) демонстрирует стандартный вертикальный стек с жидкостным охлаждением МКО с коллимационной линзой для работы в импульсном режиме. Этот коммерческий продукт может генерировать мощность всего 18 кВт с 60 стержнями, скомпонованными в вертикальном стеке, как показано на рис.27(а). Каждый диодный лазерный бар демонстрирует

* Примечание редактора: у структур с торцевым излучением расходимость пучка лазерного диода в плоскости эмиттера (так называемая "slow axis" – медленная ось) и в плоскости, перпендикулярной плоскости эмиттера ("fast axis" – быстрая ось), различны.

L-I Test
PI characteristics



Спектр / Spectrum

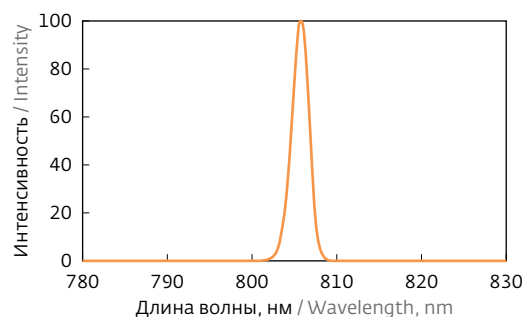


Рис.25. Результаты испытаний стандартного диодного лазера ($\lambda = 808$ нм) в конфигурации горизонтальной решетки с 3×10 барами

Fig. 25. Test data of a typical 3×10 808nm horizontal array diode laser

diode laser stacks. Conventionally the value of FWHM is about 3nm and 90% energy is about 5nm.

Liquid cooled vertical stacks

Vertical stacks offer power scaling by integrating numerous bars vertically. The beam quality of vertical stack lasers along slow axis keeps the same as a single laser bar. With the improvement of the packaging technology, the numbers of laser bars in a vertical stack laser can be up to 70–80 bars, and the maximum output power of a vertical stack laser is from several hundred watts to up to tens of thousands watts [13].

выходную мощность более 300 Вт. На рис.27(b) показан результат испытаний другой сложной структуры компоновки V-стека. Этот продукт способен выдавать в общей выходной мощности 13 кВт с 26 диодными лазерными стеками с МКО. Каждый стержень может обеспечивать выходную мощность 506 Вт.

Проблемы контроля спектра и управления лучом осложняют сборку вертикальных стеков. Хотя лазерные бары в вертикальном стеке охлаждаются при компоновке с жидкостным микроканальным охладителем, между стержнями наблюдается постоянная температурная неоднородность из-за термических перекрестных помех и/или неравномерности потока жидкости. Для достижения определенной длины волны и однородного спектра требуется экранировать диодные лазеры.

Стеки с охлаждением за счет теплопроводности

Структура компоновки диодного лазера с охлаждением за счет теплопроводности (G-стек) показана на рис.28. На рисунке три диодных лазерных стержня скомпонованы в один лазер в виде G-стека, а катод и анод лазерного стека находятся слева и справа [5]. Охладитель за счет теплопроводности находится под лазерными линейками, а слой, расположенный между лазерными линейками и охладителем за счет теплопроводности, – это слой изолятора. Для разделения катода и охладителя, анода и охладителя используются два слоя изолятора. В стеке имеется четыре крепежных отверстия. Их функция заключается в креплении стека и подсоединения анода и катода лазера стека к усилителю мощности.

Для структуры G-стека с охлаждением за счет теплопроводности диодные лазерные стержни крепятся в СТЕ-совместимых подставках (рис.29а) [14]. Дан пример численного моделирования характеристик теплового поведения 5-стержневого диодного лазерного стека с различными высотами (рис.29b). Лазерный стек моделировался для условий: длитель-

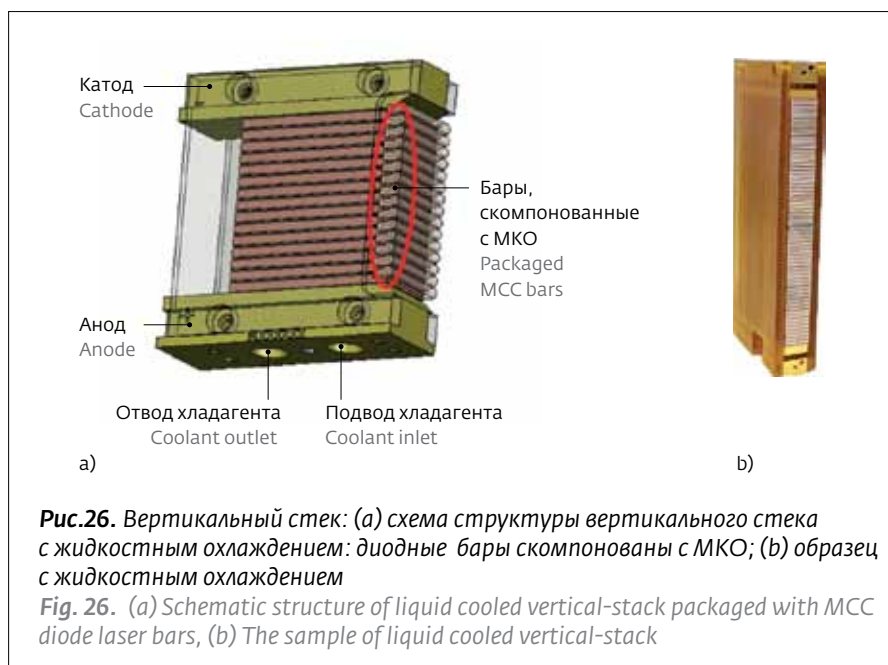


Рис.26. Вертикальный стек: (а) схема структуры вертикального стека с жидкостным охлаждением: диодные бары скомпонованы с МКО; (б) образец с жидкостным охлаждением
Fig. 26. (a) Schematic structure of liquid cooled vertical-stack packaged with MCC diode laser bars, (b) The sample of liquid cooled vertical-stack

The liquid cooled vertical-stack (V-stack) diode laser can be packaged with MCC diode lasers. Figure 26 (a) show the packaging structures of the V-stack structure with 15 MCC diode lasers. The important constituent parts, i.e. the cathode, the anode, the coolant inlet and outlet, and the packaged bars, are noted in figures. Due to the good heat dissipation capability of the precisely designed MCC, V-Stack laser is able to operate in CW mode and QCW mode with high duty cycle.

Figure 26 (b) shows a typical liquid cooled MCC package vertical stack with collimating lens for QCW application. This commercial product can deliver totally 18KW power with 60 bars packaged in vertical stack as shown in Figure 27 (a). Each diode laser bar obtains the output power of over 300W. Figure 27 (b) illustrates the advanced result of another sophisticated packaged V-stack structure. This product is able to work in the total output power of 13KW with 26 packaged MCC diode laser bars. Each bar can deliver the output power of 506W.

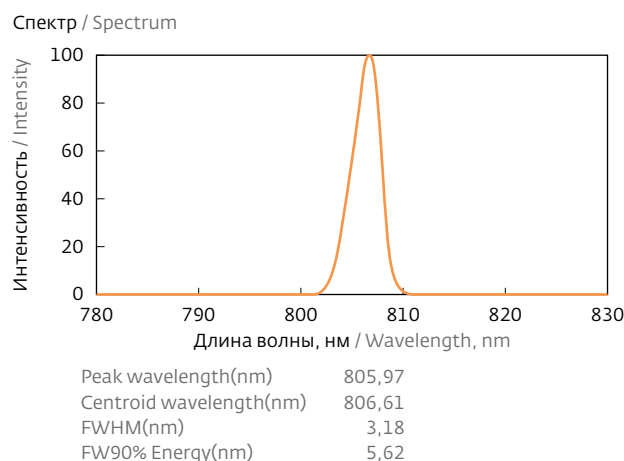
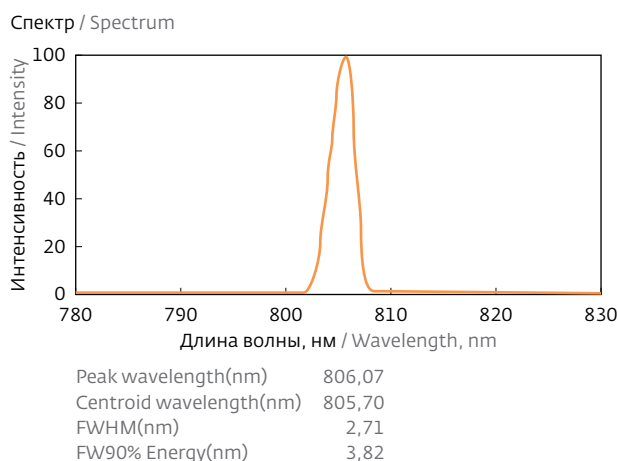
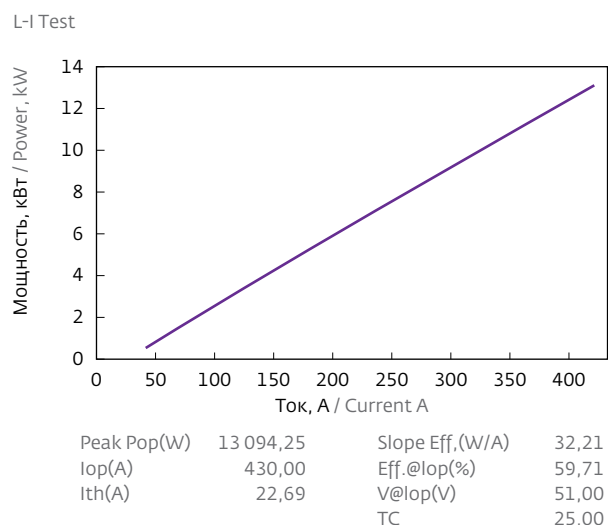
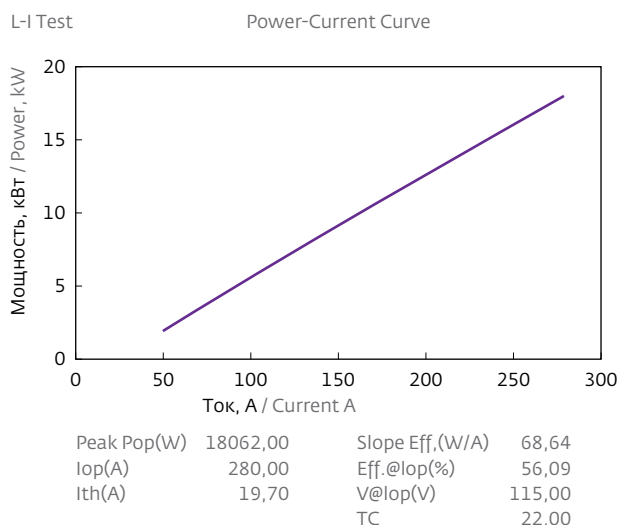
The major challenges in vertical bar stack packaging are the spectrum control and beam control. Although the laser bars in the vertical stack are cooled in micro-channel liquid cooled configuration, there remains temperature non-uniformity among the bars due to thermal crosstalk and/or liquid flow non-uniformity. The screening of the diode laser bars are required to achieve specific wavelength and uniform spectrum.

Conduction cooled stacks

The packaging structure of a conduction cooled stack (G-stack) diode laser is shown in Figure 28. In the figure,

Test:
Serial Number: VS93-000276 Operator: LJK
Part Number: 2014-3-11 Test Time: 3/11/2014 10:35:36 AM

Test Condition: 400Hz 200μs Test: ABI
Serial Number: FL000050 Operator: ZGF
Part Number: EOR0001546 Test Time: 2/7/2015 11:45:29 PM



a)

b)

Рис.27. Результаты LIV-испытаний: (а) стек с 60 барами с охлаждением МКО; (b) стек с 40 барами с охлаждением МКО
Fig. 27. LIV testing results (a) 60bar MCC cooled stack; (b) 40bar MCC cooled stack

ность импульса 30 мс, частота 3 Гц, оптическая выходная мощность 100 Вт/бар, импульсный режим. Высота лазерного стека составляет от 0,4 мм до 4,0 мм при температуре теплоотвода 20 °С. Результаты моделирования показывают, что пиковая температура быстро уменьшается в начале по мере того, как увеличивается высота стека диодного лазера. Высота может быть выбрана в качестве как параметра оптимизации для надлежащей тепловой диссипации, так и параметра компактности структуры устройства.

three diode laser bars are packaged in one G-stack laser, and the cathode and anode of the laser stack are on the left and right side, respectively [5]. The heat conduction cooler is under the laser bars, and the layer between laser bars and conduction cooler is the insulator layer. There are two insulator layers used for separating cathode and cooler, anode and cooler, respectively. There are four fixing holes in the stack, and the functions of them are to fix the stack and to connect the anode and cathode of the stack laser to the power driver, respectively.

For conduction cooled G-stack structure, e.g. the diode laser bars are sandwiched in the CTE-matched

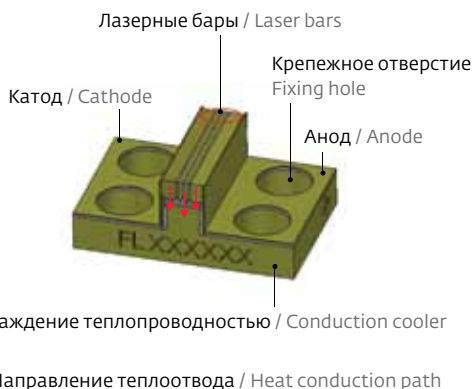


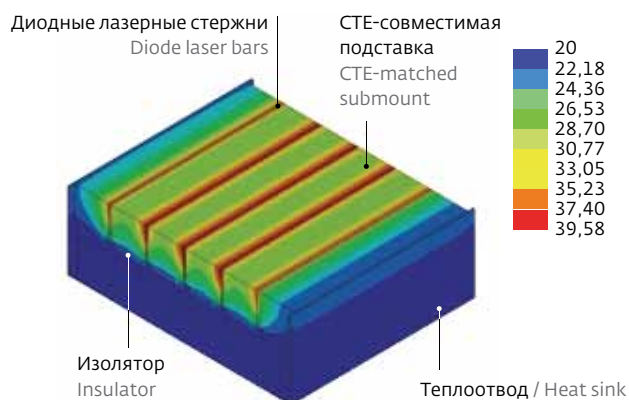
Рис.28. Структуры компоновки G-стека с охлаждением за счет теплопроводности
Fig. 28. Schematic of package structure of the conduction cooled G-stack



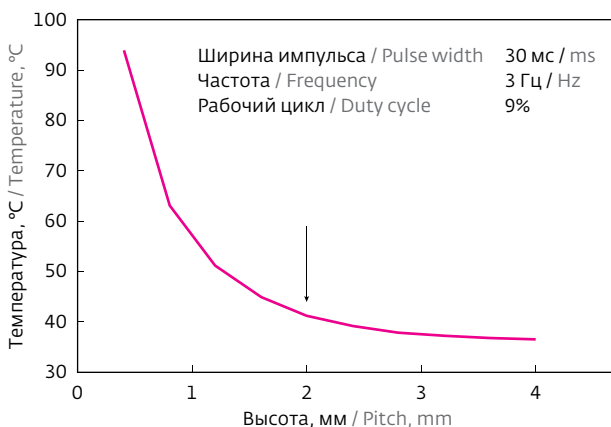
Рис.29. Структуры компоновки G-стека с охлаждением за счет теплопроводности
Fig. 29. Schematic of package structure of the conduction cooled G-stack

Выходная мощность диодного лазерного стека, изготовленного из нескольких лазерных стержней, может достигать нескольких тысяч ватт в непрерывном режиме и десятки ватт в импульсном режиме. На рис.30 (а) и (б) показан стандартный модуль G-стека с охлаждением за счет теплопроводности с коллимационной линзой в конфигурации 30 стержней и 5-стержневой модуль без коллимационной линзы. Диодные стержни электрически соединены последовательно и изолированы от теплоотвода теплопроводным и электрически изолирующим материалом. Для G-стека его можно использовать только в импульсном режиме

submounts in Figure 29 (a) [14]. An example of the numerical simulation of the thermal behavior characteristics of a 5-bar diode laser stack with different pitches were presented, as shown in Figure 29 (b). The laser stack is simulated with the pulse duration of 30ms, the frequency of 3Hz and optical output power of 100W/bar in QCW mode. The pitch of the laser stack ranges from 0.4mm to 4.0mm under the heatsink temperature of 20 °C. The simulation results indicate that the peak temperature decreases rapidly at the beginning when the pitch of the diode laser stack increases. The pitch can be chosen as the optimized pitch value for both good thermal dissipation and compact device structure.



a)



b)

Рис.30. Числовое моделирование температурных характеристик: (а) распределение температуры в конструкции 5-барного диодного лазерного стека; (б) пиковая температура в зависимости от высоты бара
Fig. 30. The numerical simulation of (a) 5-bar diode laser stack (b) peak temperature as a function of bar pitch

из-за недостаточного подхода к охлаждению. Верхний предел рабочего цикла связан с высотой стержней.

Как показано на рис.31, модуль из 30 диодных линеек может обеспечивать выходную мощность 4800 Вт в условиях испытания 250 мкс, 40 Гц и температуры 60 °С. Модуль с пятью стержнями разработан с использованием таких передовых технологий компоновки и материалов, как нанесение CuC с высокой теплопроводностью и СТЕ-совместимостью [12, 28]. Модуль с пятью стержнями способен работать в режиме высокой нагрузки (200 мкс, 400 Гц, 8% рабочего цикла) и обеспечивает общую выходную мощность 2736 Вт, при этом каждый стержень обеспечивает выходную мощность 557 Вт.

Максимальная выходная мощность 5-стержневого модуля достигает значения 3655 Вт, при этом каждый стержень обеспечивает 731 Вт (рис.32). Обычный модуль G-стека с одинаковым размером конструкции и условиями испытания может достигать мощности 400 Вт на один бар. Применение новых упаковочных материалов и передовых технологий компоновки значительно улучшают технические характеристики G-стека.

The output power of the diode laser stack fabricated by multiple laser bars can reach several thousand watts CW power and tens of Watts QCW power. Figure 30 (a) and (b) shows a typical conduction cooled G-Stack module with collimating lens of 30 bars, and a 5-bars module without collimating lens. The diode bars are electrically connected in series and isolated from the heatsink by a thermally conductive and electrically insulating material. For a G-Stack, it can be only used for QCW application due to its poor cooling approach. The upper limit of the duty cycle is related to the pitch of the bars.

As shown in Figure 31, the 30-bars module can deliver 4800W output power in the testing condition of 250us, 40Hz and the temperature of 60 °C. The 5-bars module is developed with the advanced packaging technologies and material [12][28], such as the application of the CuC with high thermal conductivity and CTE-matched property. The 5-bars module is able to work in high duty cycle (200us, 400Hz, 8% duty cycle), and delivers the total output power of 2736W, with each bar delivering the output power of 557W.

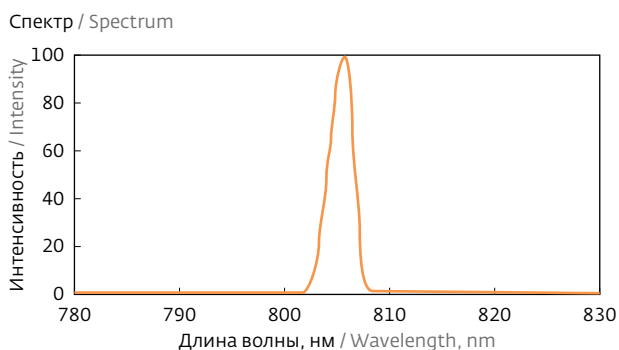
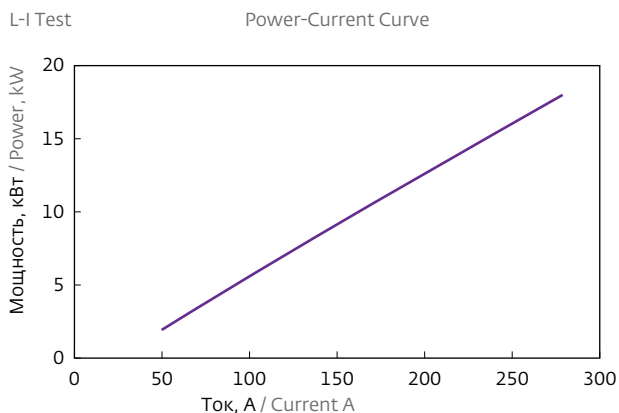
The maximum output power of the 5-bars module reaches the value of 3655W with the single bar of 731W in Figure 32. The conventional G-Stack module with the same structure dimension and testing condition, can

Диодный лазер в конфигурации массива лазерных решеток (МЛР) сконструирован из модулей G-стека, который масштабирует выходную мощность диодных лазеров с киловаттного уровня до уровня десятков киловатт. Сложное охлаждение с равномерными охлаждающими туннелями и низким перепадом давления воды от входа до выхода предназначено для случая компоновки модулей G-стека в конфигурацию массива решеток. На рис.33 представлен массив лазерных решеток из 96 баров, график зави-

only reach the power of 400W per bar. The application of the new packaging materials and advanced packaging technologies significantly improve the performance of G-Stack products.

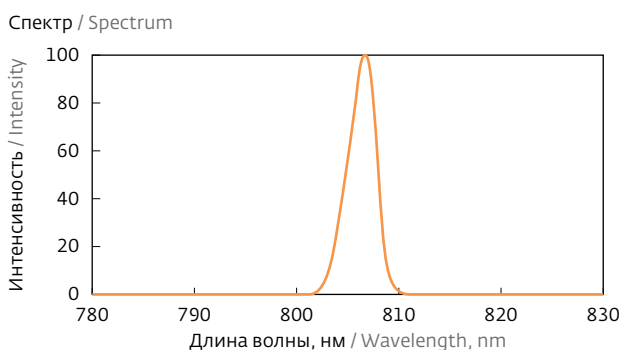
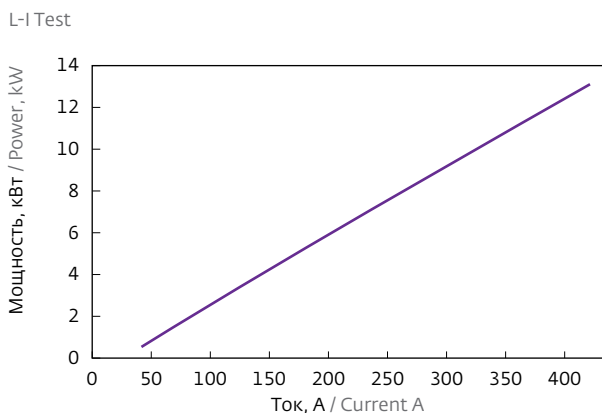
The area array (AA) diode laser is packaged through the G-stack modules, which scales the output power of diode laser bars from KW-watts level to tens of KW-watts level. Sophisticated cooling plated with uniform cooling tunnels and low water pressure drop from the inlet to outlet, is designed to construct the G-stack modules to a area array. Figure 33 (a)

Test:
Serial Number: VS93-000276 Operator: LJK
Part Number: 2014-3-11 Test Time: 3/11/2014 10:35:36 AM



a)

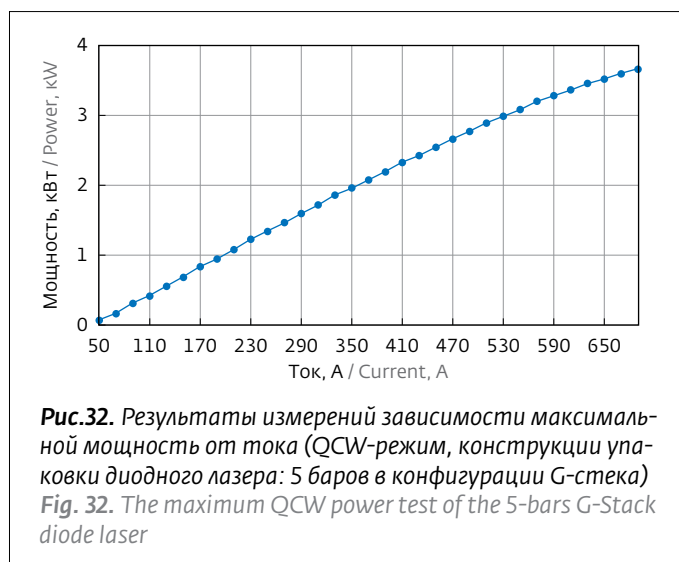
Test Condition: 400Hz 200μs Test: ABI
Serial Number: FL000050 Operator: ZGF
Part Number: EOR0001546 Test Time: 2/7/2015 11:45:29 PM



b)

Рис.31. Результаты испытаний LIV в вертикальном стеке с охлаждением за счет теплопроводности: (а) G-стек из 30 баров, (b) G-стек из 5 баров

Fig. 31. LIV testing result of conduction cooled vertical bar stack, (a) a G-Stack with 30bars (b) a G-Stack with 5bars

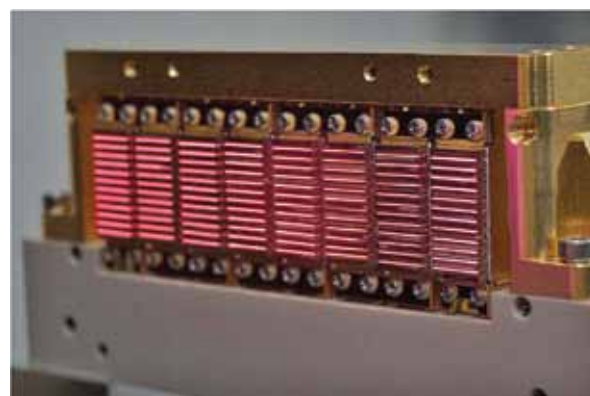


симости мощности от входного тока и спектр излучения. Основываясь на технологии твердой пайки и экранировании длины волны диодного лазерного бара, оптическая выходная мощность достигает 19 кВт в импульсном режиме в условиях испытания 5% рабочего цикла. Значение спектра полной ширины на полувысоте максимума (FWHM) и полной ширины 90% энергии (FW90%E) составляет 2,44 нм и 4,14 нм, соответственно. Это довольно узкая ширина спектра, мало достижимая для массива лазерных решеток из 96 линеек лазерных диодов. Как правило, значение FWHM и 90% энергии составляет около 4 нм и 6 нм, соответственно. Результаты испытаний подтвердили, что смещение центральной длины волны спектра излучения этого лазерного устройства очень мало.

РЕЗЮМЕ И ВЫВОДЫ

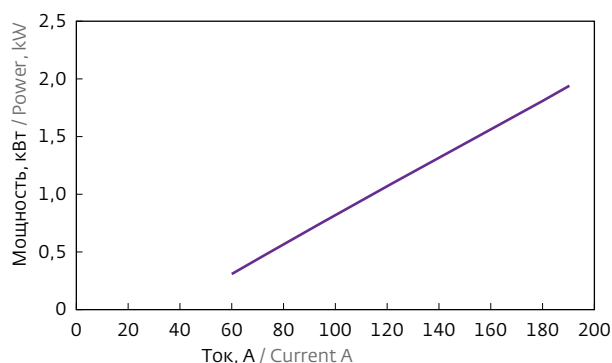
Подводя итоги данной работы, в которой рассмотрены и обсуждены технологии компоновки высокомощных диодных лазерных баров, отметим основные моменты. При разработке диодных лазеров киловаттного уровня ключевыми факторами являются контроль температуры, анализ влияния распределения температуры, разработка процессов компоновки, анализ отказов и оценка надежности.

Доминирующая технология пайки высокомощных диодных лазеров, используемая в коммерческих продуктах, по-прежнему связана с пайкой индием и AuSn. Для повышения надежности и увеличения срока службы, особенно в сложных условиях и при длительных импульсных подачах мощности, тенденция развития технологии



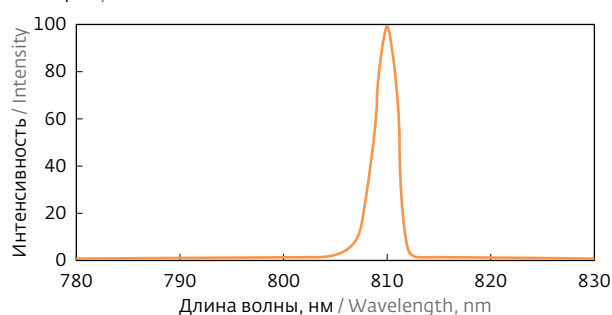
а)

L-I Test



Peak Pop(W)	19 200,00	V@Iop(V)	168,00
Iop(A)	189,35	TC	25,00
Ith(A)	34,77	Flow rate(L/min)	20,00
Slope Eff.(W/A)	126,07	Pulse Width(μs)	250,00
Eff@Iop(%)	60,36	Frequency(Hz)	200,00

Спектр / Spectrum



Peak wavelength(nm)	810,35
Centroid wavelength(nm)	810,11
FWHM(nm)	2,44
FW90% Energy(nm)	4,14

б)

Рис.33. Массив решеток лазерных диодов: (а) упаковка в конфигурации модуля G-стека; (б) результаты испытаний

Fig. 33. (a) The area array packaged through the G-stack module (b) The test result of the area array

соединения пайкой заключается в том, что соединение пайкой индием заменяется соединением AuSn-пайкой. Применение передовых композиционных материалов (например CuC) и сложная конструкция охлаждающей пластины (например МКО) могут значительно улучшить технические характеристики стека диодного лазера. Точный контроль длины волны диодных лазеров значительно улучшает спектр с точно заданной центральной волной и узким спектром.

Были разработаны и испытаны различные решетки высокомоощных диодных лазеров, в том числе диодные лазерные стеки с охлаждением за счет теплопроводности, диодные лазерные стеки с микроканальным водяным охлаждением и горизонтальные решетки диодных лазеров. Максимальная мощность стека диодного лазера, скомпонованного с микроканальным охладителем, достигает значений более 1000 Вт на один бар, в то время как стек диодного лазера в конфигурации G-стека достигает значения 731 Вт на один бар.

Массивы решеток диодных лазеров масштабируют выходную мощность диодных лазерных стеков с киловаттного уровня до уровня десятков киловатт с выходным значением 19 кВт. Наряду с усовершенствованием стержня диодного лазера необходимо разработать новый композиционный материал, современную и новую технологию компоновки, чтобы повысить производительность устройства высокомоощного диодного лазера, обеспечивая высокую мощность, большую яркость и высокую надежность.

ЛИТЕРАТУРА

24. <http://www.focuslight.com.cn>.
25. **Y.Zhang, J.Wang, Ch.Peng, X.Li, L.Xiong, X.Liu.** A New Package Structure for High Power Single Emitter Semiconductor Lasers. – 2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 978-1-4244-8142-2/10 IEEE (2010).
26. **J.Wang, Z.Yuan, L.Kang, K.Yang, Y.Zhang, X.Liul.** Study of the mechanism of "smile" in high power diode laser arrays and strategies in improving near-field linearity. – IEEE Proceedings of 59th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 837-842 (2009).
27. **D.Hou, J.Wang, L.Gao, X.Liu.** Horizontal Array of High Power Diode Laser Stack Development using Spectrum Control Technology and Hard Solder Bonding Technology. – SPIE Proceedings of Components and Packaging for Laser Systems, Proc. Of SPIE, v. 9730-9, 2016.
28. **P.Zhalefar, A.Dadoo, M.Nazerian, A.Parniabaran, A.G.Mahani, M.Akhlaghifar, P.Abbasi, M.S.Zabhi, J.Sabbaghzadeh.** Study on effects of solder fluxes on catastrophic mirror damages during laser diode packaging. – IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, 3(1), p.46-51.

shows a 96 bars area of array observed by the near-field illumination. The graphs of power versus input current and corresponding spectrum of the diode laser stack are illustrated in Figure 33 (b). Based on the hard solder packaging technology and the wavelength screening of the diode laser bar, the optical output power reaches as much as 19KW in QCW mode operation under the test condition of 5% duty cycle. The spectrum value of full width of half maximum (FWHM) and full width of 90% energy (FW90%E) is 2.44nm and 4.14nm respectively, which is rather small for a 96 bars area of array of diode laser stacks. Conventionally the value of FWHM and 90% energy is about 4nm and 6nm respectively. The result indicates that the spectrum deviation of this laser device is very small.

SUMMARY AND OUTLOOK

In conclusion, the packaging technologies for high power diode laser bars are reviewed and discussed. The key factors, such as thermal management, thermal stress analysis, processes development, failure analysis and reliability evaluation are presented in developing kW-level diode lasers. The dominant high power diode laser bar bonding technology used in commercial products are still indium bonding and AuSn bonding. To improve reliability and lifetime, especially under harsh conditions and for long pulse on-off power cycling applications, the development trend is that indium solder bonding technology is being replaced by AuSn solder bonding technology. The application of advanced packaging materials (e.g. CuC), and sophisticated design of cooling plate (e.g.MCC), can significantly improve the performance of the diode laser stack. The precise control of wavelength of diode laser bars greatly improves the spectrum with accurate central wavelength and narrow spectrum. A variety of high power diode laser arrays are fabricated and tested, including conductively cooled diode laser stacks, micro-channel water cooled diode laser stacks, and horizontal diode laser arrays. The maximum power of the diode laser stack packaged with the micro-channel cooler reaches the value of over 1000W per bar, while the G-stack diode laser stack reaches the value of 731W per bar. The area of array diode laser scales the output power of diode laser bars from KW-watts level to tens of KW-watts level, with the delivered value of 19KW. Along with diode laser bar improvement, new packaging material, advanced and novel packaging technology need to be developed to enhance high power diode laser bar device performances to achieve higher power, higher brightness and higher reliability.