



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ВЫСОКОМОЩНЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ КИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ ДЛЯ КОНФИГУРАЦИЙ DPSSLs

Дун Ху¹, Цзинвэй Ван¹, Сяонин Ли¹, Лэй Гао¹, Ваньшоа Цай¹, Хуню Чжан¹, Чэнъян Ма¹, Ибо Шан¹,
Хаою Чжан¹, Инминь Фан¹, Сюэцзе Лян¹, Синиэн
Лю^{1,2};

¹Focuslight Technologies Inc., 56 Чжанба 6-Роуд, Технологическая Зона, Сиань, Шэньси, 710077, КНР

²Государственная ключевая лаборатория переходной оптики и фотоники, Институт оптики и точной механики Сианя, Китайская академия наук, № 17 Синьси-Роуд, Новый индустриальный парк, Сиань Зона технологического развития, Сиань, Шэньси, 710119, КНР

Высокомощные диодные лазеры обладают высокой эффективностью электрооптического преобразования, компактными размерами и длительным сроком службы. Поэтому они широко применяются в качестве источников накачки для традиционных твердотельных лазеров (DPSSLs). Технические характеристики DPSSLs сильно зависят от значений рабочих параметров источников накачки. Технология компоновки решеток высокомощных диодных лазеров значительно влияет на основные технические характеристики диодного лазера: выходную мощность, длину волны, спектр излучения, срок службы и даже поляризационные свойства. В статье сообщается о последних достижениях в области компоновки решеток высокомощных диодных лазеров.

ВВЕДЕНИЕ

Высокомощные диодные лазеры, благодаря высокой эффективности электрооптического преобразования, компактным размерам, высокой надежности и длительным срокам службы нашли применение в качестве источников накачки для традиционных твердотельных лазеров с диодной накачкой (DPSSLs) и волоконных лазеров,

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

Dong Hou¹, Jingwei Wang¹, Xiaoning Li¹, Lei Gao¹, Wanshao Cai¹, Hongyou Zhang¹, Chenyang Ma¹, Yibo Shang¹, Haoyu Zhang¹, Yingmin Fan¹, Xuejie Liang¹, Xingsheng Liu^{1,2};

¹Focuslight Technologies Inc., 56 Zhangba 6th Road, High-Tech Zone, Xi'an, Shaanxi, 710077, P. R. China

²State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, No. 17 Xinxi Road, New Industrial Park, Xi'an Hi-Tech Industrial Development Zone, Xi'an, Shaanxi, 710119, P. R. China

With the advantage of high electro-optical conversion efficiency, compact size and long lifetime, high power diode lasers have found increased applications in pumping sources for traditional diode-pumped solid-state lasers (DPSSLs). The performances of DPSSLs are significantly influenced by the main parameters of diode laser pumping sources. The thermal management, packaging process and optical effects influence the performance of the kW-level diode lasers obviously. The packaging technologies for high power diode laser arrays significantly influences major characteristics of the diode laser performance, such as output power, wavelength, spectrum, lifetime, and even the polarization properties etc. This work reports on the latest advancements in packaging of high power diode laser arrays.

INTRODUCTION

High power diode lasers with high electro-optical conversion efficiency, compact size, high reliability and long lifetime, have found increased applications in pumping sources for traditional diode-pumped solid-state lasers (DPSSLs) and fiber lasers, as well as direct applications such as material surface processing, illumination, medical treatment and display etc. [1–3]. Pumping of solid state lasers is one of the most important applications for high power diode lasers. The performances of DPSSL are significantly influenced by the main parameters of diode laser pumping sources, such as output power, wavelength, spectral width and beam quality etc.



а также для прямого использования, например обработки поверхности материала, освещения, медицинского лечения, дисплеи и т.д. [1-3]. Накачка твердотельных лазеров является одним из наиболее важных применений высокомощных диодных лазеров. На производительность DPSSLS в значительной степени влияют основные параметры источников накачки диодных лазеров, такие как выходная мощность, длина волны, ширина спектра и качество луча и т.д. Ключевыми преимуществами твердотельных лазеров с диодной накачкой являются: 1) эффективный перенос мощности насоса в усиливающую среду; 2) эффективное поглощение излучения накачки; 3) высокая однородность плотности поглощаемой мощности насоса и 4) высокая прочность в различных условиях работы [4-5]. Поэтому необходимо учитывать выбор источников диодной лазерной накачки с правильной длиной волны, узкой спектральной шириной, правильным расположением пучка и высокой надежностью. Диодные лазеры киловаттного уровня применяются для накачки высокомощных твердотельных лазеров и состоят из нескольких решеток диодных лазеров. Они обычно представляют собой вертикальный стек, горизонтальную решетку или поверхностную решетку. Контроль температуры, процесс компоновки и оптические эффекты существенно влияют на работу диодных лазеров киловаттного уровня. По мере увеличения силы тока и выходной мощности надежность и срок службы высокомощных диодных лазеров становится проблемой, особенно в сложных условиях работы, таких как повторное включение-выключение питания с большой длительностью импульса и интенсивным рабочим циклом. В результате технологии компоновки для решеток высокомощных диодных лазеров становятся критическими.

The key merits for diode laser pumping of solid state lasers are 1) efficient transport of pump power to the gain medium; 2) efficient absorption of pump radiation; 3) high uniformity of absorbed pump power density and 4) high durability under various working conditions [4-5]. Therefore, selection of diode laser pumping sources with the right wavelength, narrow spectral width, proper beam distribution, and high reliability needs to be taken into account. Kilowatt level diode lasers are used for pumping high power solid state lasers and they are made of multiple diode laser arrays. They are typically in the form of a vertical stack, a horizontal array or an area array. The thermal management, packaging process and optical effects influence the performance of the kW-level diode lasers significantly. With the increase of high current and output power, the reliability and lifetime of high power diode lasers becomes a challenge, especially for the harsh working conditions such as the repeated on-off power-cycling with long pulse duration and high duty cycling. As a result, packaging technologies for high power diode laser arrays becomes critical.

The development of packaging technology continues to improve the optical output power of diode laser arrays. The quality of the packaging technology significantly affects the major characteristics of diode laser performance, such as output power, wavelength, spectrum, lifetime, and even the polarization properties. Current materials used in bonding high power diode laser bars are commonly indium and gold-tin solders, with the indium soldering still being the dominant approach [6-10]. In order to obtain higher reliability and longer lifetime, developing hard solder bonding technology becomes a trend [5]. In this paper, the key factors, such as thermal management, processes development, failure analysis and reliability evaluation are presented in developing kW-level diode lasers for solid state laser pumping. This work also reports on the latest advancements in packaging of

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.



Развитие технологии компоновки нацелено на улучшение оптической выходной мощности решеток диодных лазеров. Качество технологии компоновки существенно влияет на основные характеристики работы диодного лазера, такие как выходная мощность, длина волны, спектр, срок службы и даже поляризационные свойства. Современные материалы, используемые для соединения стержней высокомощных диодных лазеров, обычно являются припоями из индия и золота-олова, при этом пайка индия остается приоритетным подходом [6–10]. Технология сварки твердым припоем становится общепринятым направлением, обеспечивая большую надежность и более длительный срок службы [5]. В настоящей статье представлены ключевые факторы, такие как контроль температуры, развитие процесса, анализ отказов и оценка надежности при разработке диодных лазеров киловаттного уровня для твердотельной лазерной накачки. В настоящей работе также сообщается о последних достижениях в области компоновки решеток высокомощных диодных лазеров, включая стеки диодных лазеров с охлаждением за счет теплопроводности, стеки микроканальных диодных лазеров с водяным охлаждением и горизонтальные решетки диодных лазеров. Выходная мощность стека диодного лазера, состоящего из нескольких лазерных стержней, может достигать нескольких тысяч ватт в непрерывном режиме и десятки тысяч ватт в импульсном режиме. На основе технологий, рассмотренных выше, изготавливаются и проводятся испытания различных решеток высокомощных лазеров. Результаты показывают, что устройства обладают преимуществами высокой мощности, узкого спектра, высокой электропропускательной эффективности и высокой надежности, которые подходят для твердотельной лазерной накачки.

ТЕХНОЛОГИИ КОМПОНОВКИ ДЛЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Основная структура компоновки диодного лазерного устройства состоит из лазерного чипа, скрепляющего слоя и монтажной подложки. Назначение компоновки состоит в том, чтобы закрепить диодный лазерный стержень на монтажной подложке или на подложке с нанесенной на нее металлизацией для обеспечения механической поддержки, контроля температуры и функциональных соединений. Качество компоновки критично влияет на основные характеристики диод-

high power diode laser arrays, including conductively cooled diode laser stacks, micro-channel water cooled diode laser stacks, and horizontal diode laser arrays. The output power of the diode laser stack fabricated by multiple laser bars can reach several thousand watts in CW mode and tens of thousands watts in QCW mode. Based on the technologies discussed above, a variety of high power diode laser arrays are fabricated and tested. The results indicate that the devices have the advantages of high power, narrow spectrum, high electro-optical efficiency and high reliability, which are suitable for solid state laser pumping.

PACKAGING TECHNOLOGIES FOR HIGH POWER DIODE LASER

The basic packaging structure of a diode laser device consists of laser chip, bonding layer and mounting substrate. The packaging is to bond the diode laser bar on a mounting substrate or a submount with metallization deposited on it to provide mechanical support, thermal management and functional connections. The quality of the packaging critically influences major characteristics of the diode laser, such as thermal behavior, achievable output power, wavelength, spectrum, lifetime, and even the polarization properties etc. [10–12]. The thermal management, structure design and materials selection are very important in heat dissipation, stress reduction and performance improvement. The metallization is critical in achieving high quality packaging and long term stability. The suitable solder layer and mounting substrate should be selected and optimized to meet the requirement of the application.

Structure design

Package structure of a diode laser influences the major characteristics, such as thermal behavior, output power and polarization [13]. Mounting material, metallization, bonding layer and bonding process should be taken into account in designing package structure. A typical package structure of single-bar diode laser, in which a diode laser bar is mounted on a heat-sink, is shown in Figure 1. The heatsink could be a conduction cooled material such as copper or a liquid cooled structure such as a micro-channel cooled cooler. The laser bar is epi-down mounted on the heat sink. For indium bar bonding, the laser diode bar is commonly directly bonded to the mounting heat sink with indium solder, as shown in Figure 1 (a). To improve the reliability and lifetime, hard solder bonding technology has been developed in recent years. In this package structure,

ного лазера, такие как температурное поведение, достигаемая выходная мощность, длина волны, спектр, срок службы и даже поляризационные свойства и т.д. [10–12]. Контроль температуры, конструкция и выбор материалов очень важны для рассеивания тепла, снижения напряжения и повышения производительности. Металлизация имеет решающее значение для достижения высококачественной компоновки и долгосрочной стабильности. Подходящий слой припоя и монтажная основа выбираются и оптимизируются в соответствии с требованиями конфигурации.

Проектирование структуры

Структура компоновки диодного лазера влияет на основные характеристики, такие как температурное поведение, выходная мощность и поляризация [13]. При проектировании структуры компоновки следует учитывать монтажный материал, металлизацию, связывающий слой и процесс соединения. Примерная структура компоновки одностержневого диодного лазера, в которой стержень диодного лазера установлен на теплоотводе, показан на рис.1. Теплоотвод может представлять собой материал с охлаждением за счет теплопроводности, например медь, или конструкцию с жидкостным охлаждением, а также охладитель с микроканальным охлаждением. Лазерный стержень установлен на теплоотводе. Для соединения со стержнем из индия, диодный лазерный стержень обычно непосредственно соединен с монтажным теплоотводом припоеем из индия, как показано на рис.1 (а). Чтобы повысить надеж-

high power diode laser bars can be bonded on a CTE-matched submount such as Copper-Tungsten (CuW) or ceramic. Subsequently, the resulting subassembly is soldered to a high thermal conductive heatsink using other solders, such as SnAgCu or AuSn, as shown in Figure 1 (b). Single-bar diode laser is the basic structure to extend to different categories of diode laser arrays, such as horizontal arrays and vertical stacks. Horizontal array is packaged with the single-bar diode laser horizontally arranged along the cooling plated, while the vertical stack is assembled with the single-bar diode laser vertically stacked by clamping fixture.

Package structure of the conduction cooled diode laser stack (G-Stack) is designed in different concept as show in Figure 2 [14]. Diode laser bar is sandwiched in the CTE-matched submount (e.g. CuW) with hard solder layer (AuSn) to achieve the performances of anti-thermal fatigue, higher reliability and longer lifetime. The diode laser bars are isolated from the cooling plate (or heatsink) with the insulator. The ceramic material with high thermal conductivity is chosen as the insulator. Compared with the conventional indium bonding process, the application of hard solder for bonding the diode laser stack will significantly increase the reliability and lifetime of the devices. In this configuration, double side cooling is achieved as the heat can be dissipated through both the anode and cathode of the mounting submount. G-Stack structure can be directly used as the single diode laser device, or it can be applied as the basic unit for packaging the horizontal arrays and area arrays.

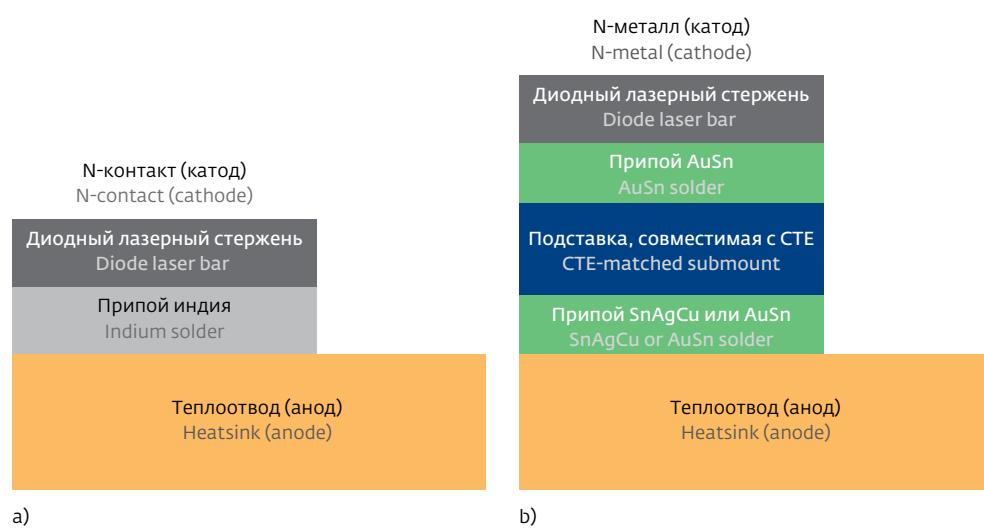


Рис.1. Структурная схема одиночного высокомощного диодного лазерного стержня, скомпонованного с использованием различных технологий пайки, (а) припой индия; (б) припой AuSn.
Fig. 1. Structure schematic of single high power diode laser bar packaged using different bonding technology, (a) indium solder; (b) AuSn solder

ность и срок службы, в последние годы была разработана технология твердосплавной пайки. В этой структуре компоновки высокомощные диодные лазерные стержни могут быть припаяны к подставке, совместимой по коэффициенту теплового расширения (Coefficient of Thermal Expansion – СТЕ), например из медно-вольфрамового сплава (CuW) или керамики. Затем полученный узел припавается к теплоотводу с использованием других припоев, таких как SnAgCu или AuSn, как показано на рис.1 (b). Одностержневой диодный лазер является базовой структурой, которую можно расширить до различных категорий решеток диодных лазеров, таких как горизонтальные решетки и вертикальные стеки. Горизонтальная решетка компонуется с одностержневым диодным лазером, горизонтально расположенным вдоль охлаждаемой пластины, а вертикальный стек с одностержневым диодным лазером крепится вертикально зажимным приспособлением.

Структура компоновки диодного лазерного стека (G-стек) с охлаждением за счет теплопроводности выполнена иначе, как показано на рис.2 [14]. Стержень диодного лазера зажат в подставке, совместимой по СТЕ (например, CuW) с твердым припоем (AuSn) для достижения характеристик антитермической усталости, повышенной надежности и более длительного срока службы. Стержни диодного лазера изолируются от охлаждающей пластины (или теплоотвода) изолятором. В качестве изолятора выбирается керамический материал с высокой теплопроводностью. По сравнению с обычным процессом пайки индием, применение твердого припоя для пайки стека диодного лазера значительно повышает надежность и срок службы устройств. В этой конфигурации достигается двухстороннее охлаждение, так как тепло может рассеиваться как через анод, так и через катод монтажной подставки. Структура G-стек может непосредственно использоваться в качестве устройства с одним диодным лазером или может применяться в качестве основного устройства для компоновки как горизонтальных решеток, так и поверхностных решеток.

Контроль температуры

Для проектирования и оптимизации структуры компоновки температурный проект высокомощных лазеров имеет решающее значение, поскольку повышение температуры перехода, возникающее из-за больших тепловых потоков,

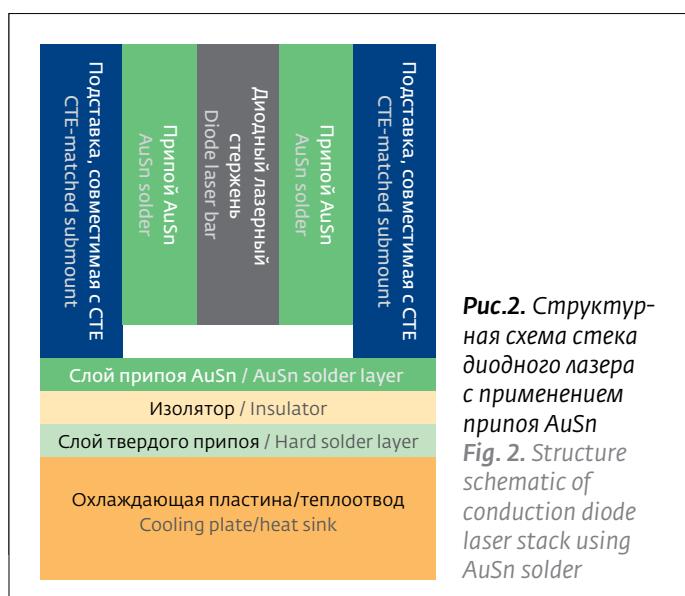


Рис.2. Структурная схема стека диодного лазера с применением припоя AuSn
Fig. 2. Structure schematic of conduction diode laser stack using AuSn solder

Thermal management

To design and optimize the package structure, thermal design of high power lasers is critical since the junction temperature rise originating from large heat fluxes strongly affects the device characteristics such as wavelength, power, threshold current, efficiency, and reliability [15]. Thermal performances are closely related to the device package structure and solder materials. The ability to design and employ high-quality solder interfaces in high power laser device packages, to understand the physics of the behavior of these packages and interfaces, and to prevent possible functional (optical) and mechanical ("physical") failures is of obvious practical importance. If the accumulated heat cannot be easily dissipated, the raised temperatures at the location of the p-n junction adversely affect the output power, the slope efficiency, the threshold current and the device lifetime. Excessive heat could also cause spectral broadening and wavelength shift. Thermal management of high power diode laser devices becomes a major challenge in laser design, manufacturing and application. In general, the electro-optical conversion efficiency of diode laser is about 55%, and, therefore, 45% of electric energy is converted to heat by non-radiative recombination, Joule heating, optical absorption, etc. In order to decrease the temperature rise in the region of active source, the thermal behaviors of conduction-cooled diode lasers and liquid cooling diode lasers need to be analyzed and the structures of different diode laser can be optimized.

Liquid-cooled single-bar diode lasers: Micro-channel cooler (MCC) has high efficiency of heat dissipation for high power diode lasers, which can



сильно влияет на характеристики устройства, такие как длина волны, мощность, пороговый ток, эффективность и надежность [15]. Температурные характеристики тесно связаны с компоновкой устройства и материалами припоя. Возможность разработки и использования высококачественных интерфейсов пайки при компоновке лазерных устройств высокой мощности для понимания физики поведения компоновки и интерфейсов и для предотвращения возможных функциональных (оптических) и механических ("физических") отказов имеет очевидное практическое значение. Если накопленное тепло не рассеивается легко, повышенные температуры в месте расположения р-п-соединения отрицательно влияют на выходную мощность, эффективность наклона, пороговый ток и срок службы устройства. Чрезмерное тепло может также вызвать спектральное расширение и сдвиг длины волны. Контроль температуры высокомощными диодными лазерными устройствами становится серьезной проблемой при проектировании, изготовлении и применении лазеров. В общем случае эффективность электрооптического преобразования диодного лазера составляет около 55%, и поэтому 45% электрической энергии преобразуется в тепло вследствие неизлучательной рекомбинации, превращения в джоулево тепло, оптического поглощения и т.д. Чтобы уменьшить повышение температуры в области активного источника, необходимо проанализировать тепловое поведение диодных лазеров с охлаждением за счет теплопроводности и диодных лазеров с жидкостным охлаждением, а также оптимизировать конструкции различных диодных лазеров.

Одностержневые диодные лазеры с жидкостным охлаждением: микроканальный охладитель (МКО) обладает высокой эффективностью рассеивания тепла для высокомощных диодных лазеров, которые могут работать в непрерывном и импульсном режиме с интенсивным рабочим циклом. МКО изготавливается из очень тонкой медной фольги с вырезанными микроканалами, а размер микроканала составляет около сотни микрометров [5, 16]. Структура микроканала может быть оптимизирована для обеспечения эффективного охлаждения и более равномерного распределения температуры. На рис.3 показано распределение температуры, перепад давления и скорость потока высокоэффективного микроканального охладителя.

Температурное поведение одного бара мощностью 80 Вт, составленного из диодных

operate under CW mode and QCW mode with high duty cycle. MCC is fabricated by very thin copper foils with micro-channel cut outs, and the dimension of micro-channel is about hundreds micrometer width [5][16]. The structure of micro-channel can be optimized to achieve efficient cooling and more uniform temperature distribution. Figure 3 shows the temperature distribution, pressure drop and flow rate of a high efficiency micro-channel cooler.

Thermal behavior of a single bar 80W hard solder MCC-packaged high power diode laser array in continuous wave (CW) mode is illustrated in Figure 4. The thermal power of simulated device is 80W with the flow of 0.3 l/m. Simulation results shows that the maximum temperature of hard solder MCC packaged high power diode laser array is 45.3 °C.

Figure 5 illustrates the correlation of junction temperature and output power of high power diode lasers at certain thermal resistance. For 808nm diode lasers, a wall plug efficiency of 52% was assumed. The lifetime of high power diode lasers is strongly related to the junction temperature. Small designed thermal resistance and low junction temperature are required for long lifetime of the semiconductor device. If the junction temperature of a diode laser is limited to 40 °C, the reliable output power from a hard soldered CS (HCS) package is 60W and it can reach 140W for a micro-channel cooled device. Because the thermal resistances of HCS is about 0.7 K/W and that of a MCC is normally below 0.3K/W.

Liquid cooled vertical stacks: Figure 6 shows the simulation of the thermal behavior characteristics of a 20bar micro-channel cooled vertical stack for CW applications [13]. The maximum temperature on the cooler of the 20bar MCC stack is about 37 °C at CW 2000W in steady state. It is contributed to the good ability of heat dissipation from the MCC package structure.

Conduction cooled diode laser stack (G-Stack): Conduction-cooled diode laser stacks are mainly operated at low duty cycle. The transient thermal behavior of a G-Stack is important in achieving high performance and reliability. Temperature distribution and heat flux of a 5000W 12bar G-Stack diode laser are shown in Figure 7 (a) and (b) [17], respectively. The operation parameters, such as pulse width, duty cycle and frequency, have great influences on the performances of high power diode laser. When the pulse duration is less than 300μs, the temperature influence between two neighboring bars is very small and there is no "thermal crosstalk" behavior between neighboring laser diode bars; On the other hand, when the operation time is greater than 300μs, the

лазеров, излучающих в непрерывном режиме и упакованных с МКО с помощью твердого припоя, показано на рис.4. Температурная мощность моделируемого устройства составляет 80 Вт с потоком 0,3 л/м. Результаты моделирования показывают, что максимальная температура решетки диодного лазера с МКО, припаянным твердым припоеем, составляет 45,3 °C.

На рис.5 показана корреляция температуры перехода и выходной мощности высокомощных диодных лазеров при определенном температурном сопротивлении. Для 808-нм диодных лазеров предполагалась степень преобразования электрической энергии в оптическую 52%.

Срок службы высокомощных диодных лазеров в значительной степени зависит от температуры перехода. Для длительного срока службы полупроводникового прибора требуется малая расчетная термостойкость и низкая температура перехода. Если температура перехода диодного лазера ограничена до 40 °C, надежная выходная мощность от компоновки CS (HCS), спаянной твердой пайкой, составляет 60 Вт и может достигать 140 Вт для устройства с микроканальным охлаждением. Поскольку температурное сопротивление HCS



Рис.3. Распределение температуры, перепад давления и скорость потока примерного микроканального охладителя

Fig. 3. The temperature distribution, pressure drop and flow rate of a typical micro-channel cooler

temperature influence between two neighboring laser bars is significantly increased.

Metallization

Metallization is required on mounting substrates, heatsink and other parts when soldering process is necessary. Metallization serves as a diffusion barrier and wetting layer between the solder material and the substrate material. It also prevents oxidation or moisture from the atmosphere, decreases the contact resistance, increases the soldering strength and enhances the device reliability [5]. For a mounting substrate on which the diode laser bar is directly bonded, the metallization is generally more sophisticated. Metallic layer coated on the surface of mounting substrate consists of an adhesion layer, a

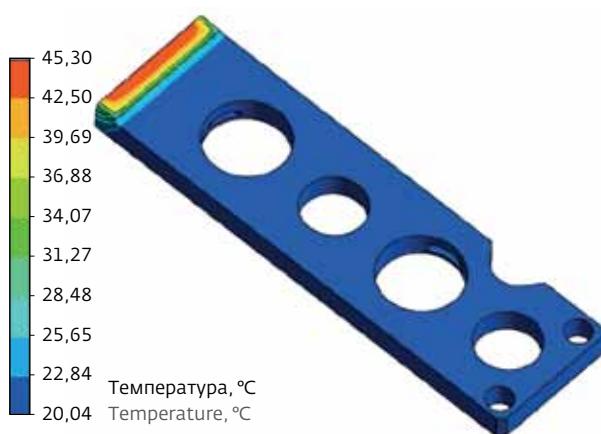


Рис.4. Температурное поведение одностержневого диодного лазера с жидкостным охлаждением с МКО, припаянным твердым припоеем, мощностью 80 Вт

Fig. 4. Thermal behavior of a liquid cooled single bar diode laser with 80W hard solder MCC package

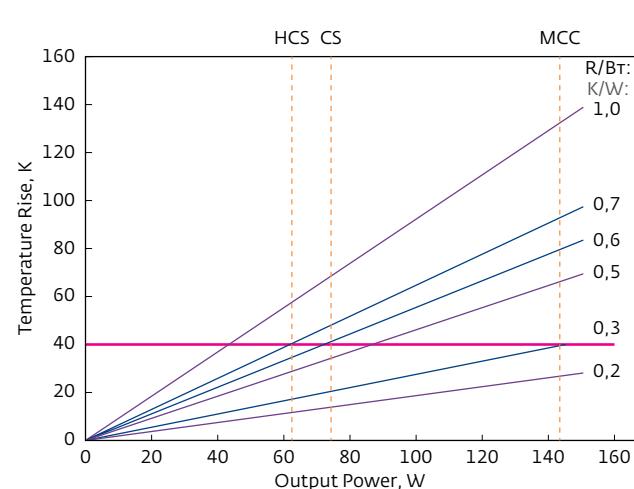


Рис.5. Корреляция температуры перехода и выходной мощности высокомощных диодных лазеров при определенном температурном сопротивлении

Fig. 5. Correlation of junction temperature and output power of high power diode lasers at certain thermal resistance

составляет около 0,7 К/Вт, а температурное сопротивление МКО обычно ниже 0,3 К/Вт.

Вертикальные стеки с жидкостным охлаждением: на рис.6 показано моделирование характеристик температурного поведения 20-стержневого вертикального стека с микроканальным охлаждением для непрерывного режима [13]. Максимальная температура на охладителе 20-стержневого стека МКО составляет около 37 °C при непрерывном режиме 2000 Вт в устойчивом состоянии. Это способствует хорошей способности рассеивать тепло от структуры компоновки МКО.

Стек диодного лазера с охлаждением за счет теплопроводности (G-стек): стеки диодного лазера с охлаждением за счет теплопроводности в основном работают с низкоинтенсивным рабочим циклом. Переходное температурное поведение G-стека важно для достижения высокой производительности и надежности. Распределение температуры и тепловой поток G-стека диодного лазера мощностью 5000 Вт с 12 стержнями представлены на рис.7 (а) и (б) [17], соответственно. Параметры работы, такие как ширина импульса, рабочий цикл и частота, оказывают большое влияние на характеристики высокомощного диодного лазера. Когда длительность импульса меньше 300 мкс, влияние температуры между двумя соседними стержнями очень мало и не наблюдается "температурных перекрестных помех" между соседними стержнями диодного лазера; с другой стороны, когда время работы превышает 300 мкс, влияние температуры между двумя соседними лазерными стержнями значительно увеличивается.

Металлизация

Металлизация требуется для монтажа подложек, теплоотвода и других деталей при необходимости пайки. Металлизация служит диффузионным барьером и смачивающим слоем между материалом припоя и материалом подложки. Она также предотвращает окисление или воздействие влаги из атмосферы, уменьшает контактное сопротивление, увеличивает прочность пайки и повышает надежность устройства [5]. Для монтажной подложки, к которой непосредственно припаивается диодный лазерный стержень, металлизация обычно более сложная. Металлический слой, нанесенный на поверхность монтажной подложки, состоит из адгезионного слоя, диффузионного барьераного слоя, а также слоя предотвращения смачивания и окисления. Функция адгезионного слоя заключается в обеспечении хорошей адгезии к монтажной подложке

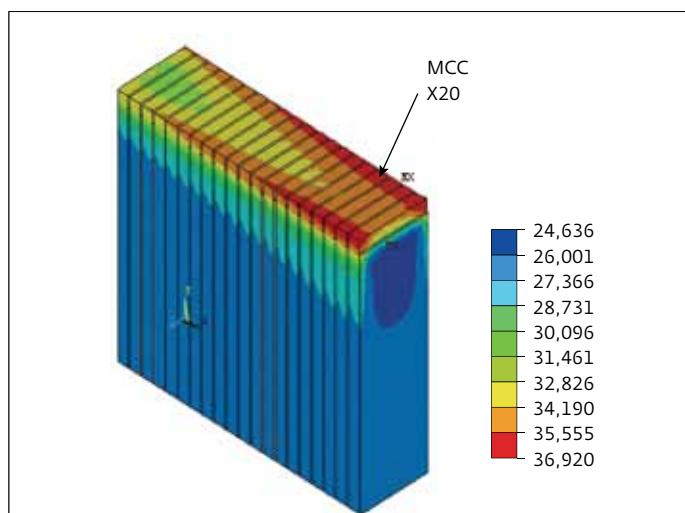


Рис.6. Распределение температуры вертикальных штабелей микроканального диодного лазера с жидкостным охлаждением

Fig. 6. The temperature distribution of liquid cooled micro-channel diode laser vertical stacks

diffusion barrier layer and a wetting and oxidation prevention layer. The function of the adhesion layer is to provide good adhesion to the mounting substrate and to the barrier layer that can withstand high temperatures, low temperatures and temperature cycling.

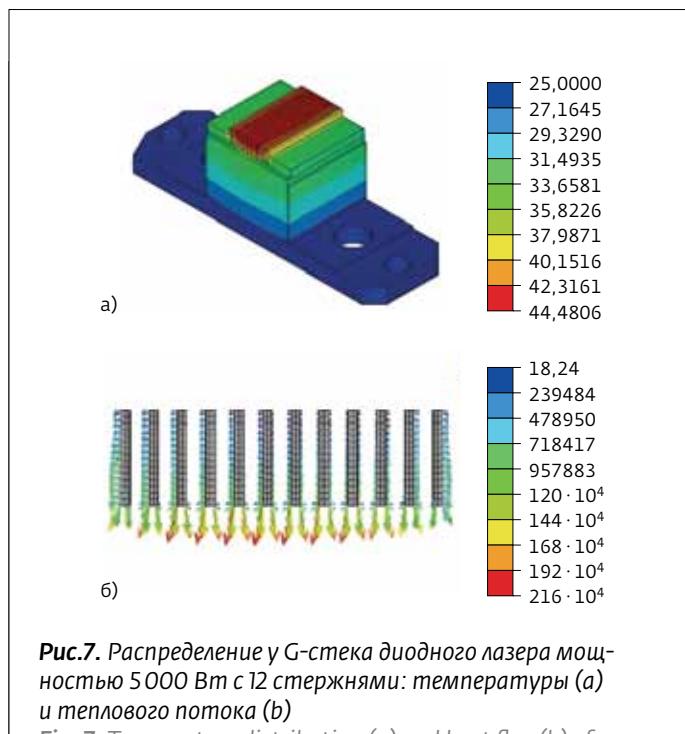


Рис.7. Распределение у G-стека диодного лазера мощностью 5000 Вт с 12 стержнями: температуры (а) и теплового потока (б)

Fig. 7. Temperature distribution (a) and heat flux (b) of a 5000W 12bar G-Stack diode laser source

и к барьерному слою, который может выдерживать высокие температуры, низкие температуры и цикличность температуры.

Существуют две общие структуры металлизации, используемые при изготовлении высокомощных диодных лазеров, как показано на рис.8. Одна из них – структура Ni/Au, а другая – структура Ti/Pt/Au. Слои металлизации Ni/Au наносятся на части, используемые в компоновке высокомощного диодного лазера, например на монтажную подложку, охладитель, теплоотвод, изолятор и электрод (см.рис.8а). Для последней структуры металлизации титан (Ti) широко используется в качестве адгезионного слоя, поскольку он обладает хорошей адгезией со многими видами металлических материалов, таких как медь, пластина и керамика. Диффузионный барьерный слой осаждается на адгезионный слой для предотвращения или замедления диффузии между материалом припоя и связующей подложкой. Хороший барьер предотвращает интерметаллическое образование материала припоя и материалов монтажной подложки. Pt, Ni, W и Cr являются типичным диффузионным барьерным слоем в компоновке диодного лазера. Слой предотвращения смачивания и окисления представляет собой защитный слой, который обеспечивает хорошее смачивание материала припоя и предотвращает воздействие воздуха и окисления на барьерный слой. Слой предотвращения смачивания и окисления обычно расходуется или частично потребляется во время процесса пайки. Au является наиболее распространенным слоем предотвращения смачивания и окисления в компоновке диодного лазера. На рис.8б показана примерная трехслойная структура металлизации.

Связующие материалы

Слой припоя: различные припои, такие как припой из индия и золото-оловянный припой, являются обычно используемыми связующими материалами. Выбор материала припоя обычно обусловлен ограничениями температурного напряжения и температурными механическими характеристиками компоновки или подложки. Если это не важно, то вступают в силу факторы стоимости и окружающей среды. Хотя припой индия обладает пластичной способностью, в последние годы результаты показали, что лазеры, спаянные припоеем индия, имеют более низкую надежность, чем устройства, спаянные припоеем AuSn, из-за быстрой электромиграции, окисления и температурной усталости. Для неко-

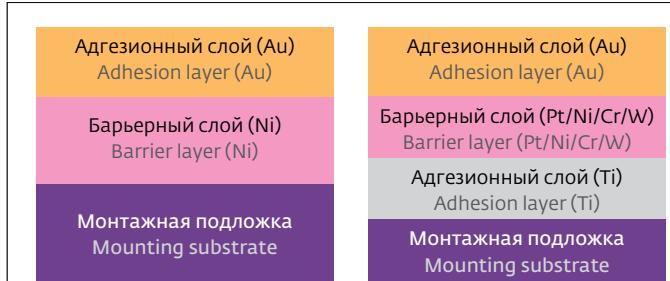


Рис.8. Структура metallизации примерной монтажной подложки: (а) структура Ni/Au; (б) структура Ti/Pt/Au

Fig. 8. Metallization structure of typical mounting substrate, (a) Ni/Au structure; (b) Ti/Pt/Au structure

There are two common metallization structures utilized in manufacturing the high power diode lasers, as shown in Figure 8. One is Ni/Au structure and the other is Ti/Pt/Au structure. Ni/Au metallization layer is deposited on the parts used in high power diode laser packaging, such as mounting substrate, cooler, heatsink, insulator and electrode, as shown in Figure 8 (a). For the latter metallization structure, Titanium (Ti) is widely used as adhesion layer as it has good adhesion to many kinds of metal materials, such as copper and platinum and ceramics. A diffusion barrier layer is deposited on the adhesion layer to prevent or slow down the diffusion between the solder material and the bonding substrate. Good barrier prevents intermetallic formation of the solder material and the mounting substrate materials. Pt, Ni, W and Cr are the typical diffusion barrier layer in diode laser packaging. The wetting and oxidation prevention layer is a sacrificial layer which provides good wetting to the solder material and prevent the barrier layer to be exposed to air and oxidized. The wetting and oxidation prevention layer is generally consumed or partially consumed during die bonding process. Au is the most common wetting and oxidation prevention layer in diode laser packaging. Figure 8 (b) shows the typical three layer metallization structure.

Bonding materials

Solder layer: Different solders, such as indium and gold-tin solder are the commonly used bonding layer materials. The selection of solder material is usually driven by the thermal stress limitations and thermal mechanical performance of the package or substrate. If this is not a factor, then cost and environmental factors come into play. Although indium solder has ductile ability, results in recent years showed indium solder bonded lasers

торых конфигураций требуются лазеры высокой мощности с высокой надежностью и более длительным сроком службы без снижения высокой выходной мощности [18]. Чтобы получить высокую оптическую выходную мощность и повысить надежность, технология пайки твердым припоеем становится тенденцией.

Припой AuSn успешно используется для высоконадежного крепления к матрице и беспоточной пайки в процессе компоновки высокомощных диодных лазеров. Припой AuSn обладает хорошей теплопроводностью и электропроводностью, высокой коррозионной стойкостью, отсутствием температурной усталости и возможностью беспоточной пайки. Как правило, рекомендуется использовать состав AuSn в точке эвтектики или вблизи нее с 80 мас.% Au и 20 мас.% Sn.

На рис.9 показаны напряженно-деформированные характеристики припоя индия и золота-олова. Припой AuSn не разрушается быстро от усталостного повреждения и, как правило, не демонстрирует усталости даже при температурном циклировании. Это делает AuSn предпочтительным выбором при использовании диодного лазера в сложных условиях окружающей среды или в импульсном режиме.

В последнее время были разработаны другие связывающие слои для пайки высокомощных диодных лазерных стержней. Паста Наносильвер (Nanosilver), новый материал крепления к матрице, использовалась при компоновке высокомощных диодных лазеров. Результаты испытаний показывают, что паста Наносильвер (Nanosilver) слыла многообещающим материалом крепления к кристаллам в компоновке высокомощного диодного лазера, хотя ее разработка еще находилась в начальной стадии.

Монтажные подложки: характеристики монтажной подложки отличаются в зависимости от разных материалов, и каждый материал имеет свои преимущества в некоторых аспектах. Выбор монтажной подложки обусловлен необходимостью совместимости с СТЭ чипа диодного лазера и обеспечения высокой теплопроводности для достижения высокоэффективной теплоотдачи и минимизации температуры перехода. В табл. 1 приведена серия широко используемых материалов для изготовления монтажных подложек [19–21].

Медь широко используется в качестве монтажной подложки из-за высокой теплопроводности и электропроводности. Однако из-за несоответствия СТЭ с GaAs применение меди по-прежнему

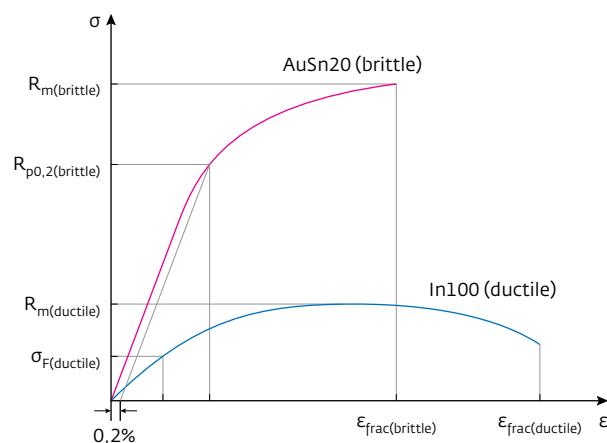


Рис.9. Характеристики напряжения и деформации припоя индия и AuSn

Fig. 9. The stress-strain characteristics of indium and AuSn solder

have a lower reliability than AuSn solder bonded devices due to the fast electromigration, oxidation and thermal fatigue. For certain applications, high power laser bars with higher reliability and longer lifetime without decreasing high output power are required [18]. In order to obtain the high

Таблица 1. Температурно-механические параметры обычно используемых материалов монтажной подложки

Table 1. Thermo-mechanical parameters of commonly used mounting substrate materials

Материал Material	Теплопроводность (Вт/(м·К)) Thermal conductivity (W/(m·K))	Коэффициент температурного расширения (ppm/K) Coefficient of thermal expansion (ppm/K)
Cu	393	17
CuW	180–240	5,6–10,2
CuMo	190–250	7,8–10,7
Си-алмаз Cu-diamond	470	6,7
Алмаз Diamond	900–2320	1–1,5
Si	83	7,5
AlN	170–200	4,3
Al ₂ O ₃	30	7,3
BeO	250	7

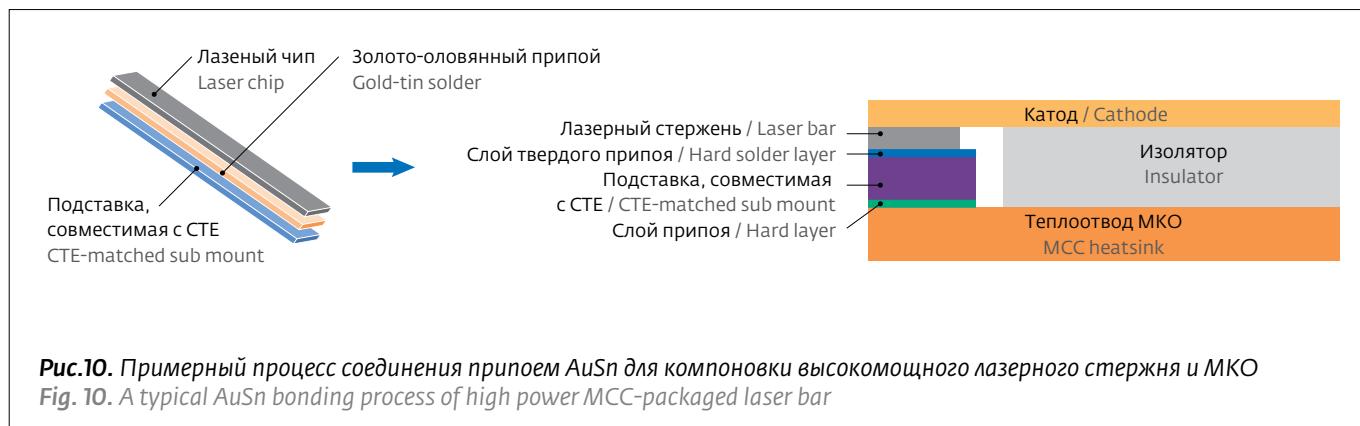


Рис.10. Примерный процесс соединения припоеем AuSn для компоновки высокомощного лазерного стержня и МКО
Fig. 10. A typical AuSn bonding process of high power MCC-packaged laser bar

ограничено в компоновке высокомощных диодных лазеров. CuW, который является металлическим композитом, также широко используется в качестве монтажной подложки благодаря тесной СТЕ-совместимости с диодной лазерной микросхемой на основе GaAs. Теплопроводность CuW значительно ниже, чем у меди. Для монтажа высокомощных лазерных стержней CuW обычно служит только как буферный слой для снятия напряжений, и он связан с высокой теплопроводностью меди, чтобы увеличить рассеивание тепла. Си-алмаз предлагает не только более высокую теплопроводность, но также совместим с СТЕ чипа диодного лазера на основе GaAs. Однако сложный и неотработанный процесс изготовления и высокая стоимость не позволяют сегодня широко использовать этот материал при компоновке высокомощных полупроводниковых лазеров. Нитрид алюминия (AlN) и BeO представляют собой керамические материалы. Их СТЕ более близки к характеристикам диодного лазера, а теплопроводность материалов достаточна для конфигураций с низкой и средней мощностью. Алмаз можно использовать в высокомощных конфигурациях из-за высокой теплопроводности и высокого электросопротивления. Эти материалы используются в качестве монтажной подложки для диодных лазеров, особенно когда требуется электроизоляция [22].

Процесс пайки

Для компоновки паянного твердым припоеем микроканального охладителя (МКО) и высокомощного лазерного стержня проводятся два этапа. Первым шагом является соединение лазерного стержня к подставке, совместимой с СТЕ, с использованием технологии пайки золотом и оловом. Далее следует второй этап – пайка завершенного лазерного стержня на теплоотвод

optical output power and to enhance the reliability, developing hard solder bonding technology becomes a trend.

AuSn solder has been successfully used for highly reliable die attach and fluxless soldering in the packaging process of high power diode lasers. AuSn solder has good thermal and electrical conductivity, high corrosion resistance, no thermal fatigue and the possibility of fluxless soldering. In general, a composition of AuSn at or close to the eutectic point with 80 wt% Au and 20 wt% Sn is commonly recommended.

Figure 9 illustrates the stress-strain characteristics of indium and gold-tin solder. AuSn solder does not quickly degrade from fatigue damage and generally has no fatigue problem even under thermal cycling. This makes AuSn solder the preferred choice when the diode laser is operated under harsh environmental conditions or pulsed mode.

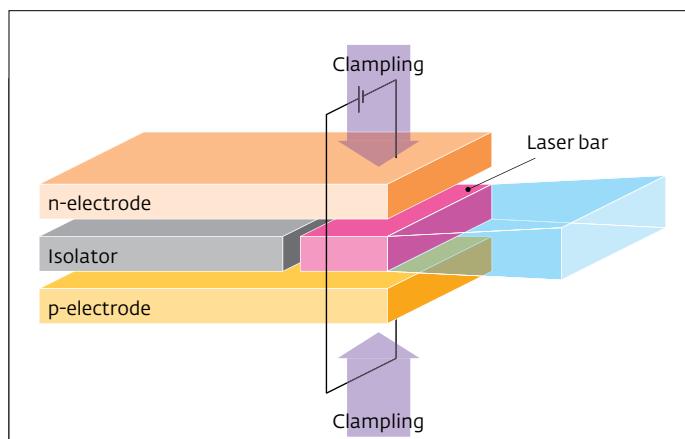
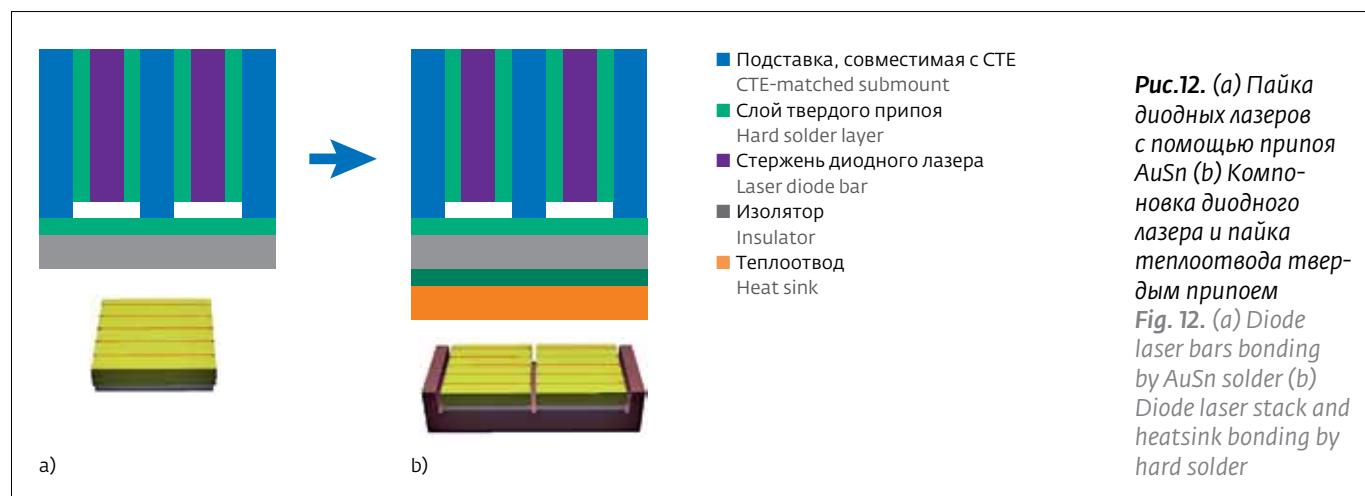


Рис.11. Схема новой конструкции диодного лазерного стержня с фиксированным зажимом без применения припоя
Fig. 11. Schematic of a new non-soldered clamp-mounted diode laser bar structure



МКО с использованием другого процесса пайки. Анод (металлизация р-стороны) электрически соединен с теплоотводом МКО, а катод (металлизация н-стороны) электрически соединен с медной N-фольгой. Изолятор впаивается между теплоотводом МКО и медной N-фольгой, как показано на рис.10. Узел требует точного позиционирования, превосходного теплового и электрического контакта и надежных контактных соединений между всеми задействованными компонентами.

Помимо технологии пайки припоеем AuSn и индия, новые материалы и процессы изучаются при компоновке высокомощных диодных лазерных стержней. Сообщалось о новой конструкции диодного лазерного стержня с фиксированным зажимом без применения припоя. Модуль включает, по меньшей мере, один зажим для лазерных чипов между электродами, как показано на рис.11 [23].

Процесс соединения стека диодного лазера с охлаждением за счет теплопроводности (G-стек) показан на рис.12. Первым шагом является соединение диодных лазеров и изолятора на подставке, совместимой с СТЕ, с использованием припоя AuSn. Сложный монтажный инструмент применяется для точного позиционирования всех компонентов при пайке диодных лазеров. Следующий шаг заключается в креплении стека диодного лазера на теплоотводе через второй процесс пайки твердым припоеем. Изолятор должен быть двухсторонним металлизированным как для крепления на подложку, так и крепления теплоотвода, с разным слоем припоя [14]. В этой конфигурации тепло может рассеиваться как через анод, так и на катод подставки.

Продолжение следует

There are other bonding layers developed recently in bonding high power diode laser bars. The nanosilver paste, a novel die-attached material, was used in packaging high power diode laser bars. The test results show that the nanosilver paste was a promising die-attached material in packaging high power diode laser although it was still in the infant stage.

Mounting substrates: The performances of mounting substrate are different for different materials, and each material has its advantages in certain aspects. The selection of the mounting substrate is driven both by the need of matching the CTE of diode laser chip and by providing high thermal conductivity in order to achieve the ability of highly effective heat dissipation and minimize the junction temperature. Table 1 lists a series of commonly used materials for making mounting substrates [19–21].

Copper is widely used as mounting substrate because of the high thermal conductivity and electric conduction. However, due to the CTE mismatch to GaAs, the application of the copper is still limited in packaging of the high power diode lasers. CuW, which is a metal composite, is also commonly used as mounting substrate due to its CTE closely matched with GaAs-based diode laser chip. The thermal conductivity of CuW is much lower than that of copper. For mounting high power laser bars, CuW is generally only served as a stress relief buffer layer and it is bonded with high thermal conductivity copper in order to increase the heat dissipation. Cu-diamond offers not only higher thermal conductivity but also matched CTE with GaAs-based diode laser chip. However, complex and immature fabrication process and high cost prevent it from being widely used today.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Uwe Brauch, Peter Loosen, Hans Opower.** High-Power Diode Lasers for Direct Applications. – Springer-Verlag (Berlin Heidelberg), p.1–2. (2000).
2. **Divoky M., Smrz M., Chyla M. et al.** Overview of the HiLASE project: high average power pulsed DPSSL systems for research and industry [J]. – High Power Laser Science and Engineering, 2014, 2: e14..
3. **Brian Faircloth.** High-brightness high-power fiber coupled diode laser system for material processing and laser pumping. – Proceedings of SPIE Vol. 4973, pp. 34–41 (2003).
4. **Lucianetti A., Pilar J., Pranovich A. et al.** Assessment of high-power kW-class single-diode bars for use in highly efficient pulsed solid state laser systems[C]//SPIE LASE. – International Society for Optics and Photonics, 2015, 934811-934811-7.
5. **Xingsheng Liu, Wei Zhao, Lingling Xiong, Hui Liu.** Packaging of high power diode lasers. – Springer Science+Business Media New York, ISBN978-1-4614-9262-7, 2014.
6. **Xiaoning Li, Yanxin Zhang, Jingwei Wang, Lingling Xiong, Pu Zhang, Zhiqiang Nie, Zhenfu Wang, Hui Liu, Xingsheng Liu.** Influence of Package Structure on the Performance of the Single Emitter Diode Laser. – IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, pp. 1592–1600, v 2, NO. 10, October 2012.
7. **Jingwei Wang, Lijun Kang, Pu Zhang, Yanxin Zhang, Xingsheng Liu.** High Power Semiconductor Laser Array Packaged on Micro-Channel Cooler using Gold-Tin soldering Technology. – Proceedings 82410H (2012).
8. **Xiaoning Li, Lijun Kang, Jingwei Wang, Pu Zhang, Lingling Xiong, Xingsheng Liu.** High Reliability 20KW QCW Area Array Diode Laser. – Proceedings 82410C (2012).
9. **Jingwei Wang, Pu Zhang, Lingling Xiong, Xiaoning Li, Chenhui Peng, Zhenbang Yuan, Lu Guo, Xingsheng Liu.** Packaging of High Power Density Double Quantum Well Semiconductor Laser Array using Double-side Cooling Technology. – Proceedings of 12th on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP).
10. **Y. Wang, L. Qin, Y. Zhang, Z. H. Tian, Y. Yang, Z. J. Li, C. Wang, D. Yao, H. H. Yin, Y. Liu, L. J. Wang.** Packaging-induced strain measurement based on the degree of polarization in GaAsP-GaInP high-power diode laser bars. – IEEE photonics technology letters, 2009, 21(14), pp963–965.
11. **K. Boucke.** Packaging of diode laser bars. – Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2007.
12. **S. A. Merritt, F. Seiferth, V. Vusirikala, M. Dagenais, Y. J. Chen, D. R. Stone.** rapid flip chip die bonding method for semiconductor laser diode arrays. – IEEE1997 Electronic Components and Technology Conference, 1997, pp775–779.
13. **Jingwei Wang, Xiaoning Li, Dong hou, Feifei Feng, Yalong Liu, Xingsheng Liu.** Advances in bonding technology for high power diode laser bars. – SPIE9346, Components and Packaging for Laser Systems, 934605 (February 20, 2015); doi: 10.1117/12.2079619.
14. **Dong Hou, Jingwei Wang, Lei Cai, Ye Dai, Yingjie Li, Xingsheng Liu.** High Power Diode Laser Stack Development using Gold-Tin Bonding Technology. – SPIE9346, 934604 (February 20, 2015); doi: 10.1117/12.2079610.

in packaging of high power semiconductor lasers. Aluminum Nitride (AlN) and BeO are ceramic materials. Their CTE are more closely matched to that of diode laser and the thermal conductivity of the materials is decent for low to medium power applications. The diamond can be used in the high power applications due to the high thermal conductivity and high electric resistivity. These materials are used as a mounting substrate for diode lasers especially when electrical insulation is needed [22].

Bonding process

There are two steps applied to packaging the hard solder microchannel cooled (MCC) high power laser bar. The first step is bonding the laser bar on a CTE-matched sub-mount using the gold-tin bonding technology. Subsequently, the second step is bonding the completed laser bar unit on MCC heatsink using other soldering process. The anode (p-side metallization) is electrically connected to the MCC heatsink, while the cathode (n-side metallization) is electrically connected to the copper N-foil. Insulator was soldered between the MCC heatsink and copper N-foil, as shown in the Figure 10. The assembly demands precise positioning, superior thermal and electrical contact, and reliable contact junctions among all involved parts.

Besides AuSn and indium bonding technology, new materials and process are being explored in packaging high power diode laser bars. A new non-soldered clamp-mounted diode laser bar structure was reported without applying any solder. The module comprises at least one laser chip clamp-mounting between electrodes as shown in Figure 11 [23].

The bonding process of the conduction cooled diode laser stack (G-stack) is illustrated in Figure 12. The first step is to bond the diode laser bars and the insulator on CTE-matched submounts using AuSn solder. Sophisticated mounting tool is applied for precisely positioning all components together when soldering the diode laser bars. The second step is to bond the diode laser stack on the heat sink through a second hard soldering process. The insulator should be double-side metalized for both bonding the submount and the heatsink with different solder layer [14]. In this configuration, the heat can be dissipated through both the anode and cathode of the submount.

To be continued