

文章编号: 1000-7032(2012)06-0651-09

## 百瓦级高亮度光纤耦合半导体激光模块的研制

郝明明<sup>1,2</sup>, 朱洪波<sup>1,2</sup>, 秦 莉<sup>1</sup>, 宁永强<sup>1</sup>, 刘 云<sup>1</sup>, 张志军<sup>1,2</sup>, 王立军<sup>1\*</sup>

(1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 用3只976 nm 半导体激光短列阵作为子模块, 研制出连续工作的百瓦级高亮度光纤耦合模块。首先, 利用光束转换器将每个半导体激光短列阵进行光束整形; 然后采用空间复用技术将3个半导体激光短列阵在光参数积小的方向上叠加, 并利用倒置伽利略望远镜作为扩束器进一步压缩发散角; 最后利用优化结构的透镜组将激光聚焦到芯径200  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为0.22的光纤中。测量结果显示: 聚焦后激光的发散角为24.8°, 焦平面的光斑尺寸为175.2  $\mu\text{m}$ ; 耦合后测量光纤出光功率可达107 W, 对应亮度为2.23  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ , 达到了国内利用列阵进行光纤耦合的领先水平; 在工作电流为52.5 A时, 电光转换效率为43.1%, 远高于全固态等激光器; 最后测量本模块在不同驱动电流时的光谱, 并以此计算出模块的热阻为1.29 K/W, 说明它的散热性能良好。结果表明, 本光纤耦合模块适合应用于泵浦光纤激光器、医疗和激光加工等领域。

**关键词:** 半导体激光短列阵; 光纤耦合; 高亮度; 光线追迹

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20123306.0651

## Research on High Brightness Fiber Coupled Diode Laser Module with Hundred Watts Class Output Power

HAO Ming-ming<sup>1,2</sup>, ZHU Hong-bo<sup>1,2</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, NING Yong-qiang<sup>1</sup>,  
LIU Yun<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-jun<sup>1,2</sup>, WANG Li-jun<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding Author, E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

**Abstract:** Three 976 nm diode laser short bars were used as submodule to manufacture high brightness fiber coupled module with CW hundred watts class output power. First, beam transform systems were employed to shape beams emitted from each submodlue; Second, the three beams were stacked in direction of lower beam parameter product by means of spatial multiplexing technology; Finally, the laser was focused into a multimode fiber with 200  $\mu\text{m}$  core diameter and  $NA=0.22$  by optimized lens. Experiment result showed that divergence angle of the focused laser beam was 24.8° and its beam waist diameter was 175.2  $\mu\text{m}$ ; laser output from fiber could reach to 107 W, equalizing brightness of 2.23  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ , which is a higher level in China. Furthermore, the wall plug efficiency is 43.1% when driving current is 52.5 A, which is far higher than that of solid state laser. Finally the thermal resistance was computed by means of measuring spectrum with different current and the result is 1.29 K/W which indicates favorable heat dissipation of the module. All of the

收稿日期: 2012-03-23; 修订日期: 2012-04-06

基金项目: 吉林省科技厅项目(10ZDGG001, 20112106, 20116011); 长吉图项目(2011CJT0003)资助项目

作者简介: 郝明明(1984-), 男, 内蒙古包头人, 主要从事大功率半导体激光列阵光纤耦合及应用的研究。

E-mail: ciomp2007@163.com, Tel: (0431)86176335

result showed that the module can be used in the field of pumping fiber lasers, medical, material processing and so on.

**Key words:** diode laser short bars; fiber coupling; high brightness; ray tracing

## 1 引 言

半导体激光器具有结构紧凑、电光转换效率高及寿命长等优点<sup>[1-2]</sup>,在泵浦固体激光器/光纤激光器、材料加工、军事防御和生物医疗等方面得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。然而,和其他激光器相比,半导体激光器最大的缺点就是光束质量差。首先,半导体激光器的发散角很大,一般快轴方向(垂直于 pn 结)的发散角约为  $70^\circ$  (FWHM);其次,半导体激光器的光束质量在快慢轴方向也极不平衡,一般快轴方向接近衍射极限,而慢轴方向(平行于 pn 结)的光束质量极差<sup>[5]</sup>。以上缺点限制了半导体激光器在很多方面的应用。为了使半导体激光器能够更方便有效地应用,常需要将它耦合进光纤。光纤耦合是实现激光柔性传输的重要手段,还可以使输出功率相对于单个半导体激光器提高数十倍<sup>[6]</sup>,而且利用光纤的均化作用可将半导体激光转化为圆形均匀分布的光场。

随着制造业的发展,对半导体激光的亮度要求越来越高。亮度和光功率成正比,和光参数积的平方成反比。高亮度的激光可以聚焦成超高功率密度的光斑,提高材料加工的质量和泵浦光纤激光器的效率。很多国内外机构都致力于高亮度的半导体激光光纤耦合的研究。美国 TeraDiode 公司利用光栅-外腔波长合束技术(Wavelength beam combining, SBC)将 2 030 W 的半导体激光阵列耦合到芯径为  $50\ \mu\text{m}$ 、 $NA = 0.15$  的光纤中,其亮度可达  $1\ 468\ \text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ,为目前光纤输出半导体激光亮度最高值<sup>[7]</sup>。德国 Laserline 公司利用光束整形、波分复用和偏振复用技术将 2 000 W 的半导体激光耦合到芯径  $400\ \mu\text{m}$ 、 $NA = 0.1$  的光纤中,亮度为  $50.7\ \text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。这些激光模块都可以应用于金属材料的切割、焊接和打孔等以前只能使用固体或气体激光器的领域,拓展了半导体激光应用范围。国内一些研究单位也开展了半导体激光阵列光纤耦合的研究。北京工业大学利用光束整形、波分复用和偏振复

用技术将半导体激光阵列出射的激光耦合到光纤,光纤出光的亮度为  $1.54\ \text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ <sup>[8]</sup>。长春理工大学也将半导体激光阵列出射的激光耦合到光纤,其亮度达到了  $1.0\ \text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ <sup>[9]</sup>。国内其他的单位也在进行相关研究,但亮度均不足  $1.0\ \text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ <sup>[5-6,10]</sup>。可以看出与国际研究水平相比,国内对光纤耦合半导体激光的研究还比较落后。

利用光栅-外腔合束技术可使半导体激光阵列的亮度超过固体激光器,但这不仅需要特殊的腔面膜镀技术,还需要超高损伤阈值的光栅,技术上难以实现。半导体激光单管的光纤耦合也可得到高的亮度,但是相同出光功率情况下所需器件数目非常多,导致装调困难和成本增加。本文利用传导冷却的半导体激光短阵列(Diode laser short bars, DLSBs)作为子模块研制出连续工作的百瓦级高亮度光纤耦合模块,与微通道冷却的激光阵列相比,具有可靠性高的特点。

## 2 结构设计

### 2.1 耦合总体结构设计

图 1 是该光纤耦合模块的原理图,由于 DLSBs

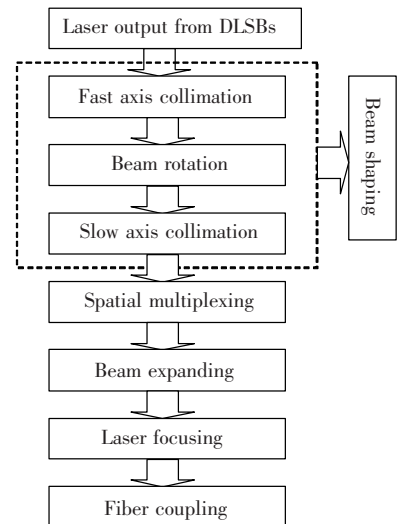


图 1 光纤耦合模块的原理图

Fig. 1 Block diagram of fiber coupling module

直接出光的特点是发散角大,光参数积 (Beam parameter product, BPP) 在快慢轴方向上极不平衡,所以需要光束整形。光束整形系统由光束转换器 (Beam transform system) 和慢轴准直镜组成。光束整形 (Beam shaping) 后,激光的发散角在快慢轴方向上均为 8 mrad,并且这两个方向的 BPP 值相差不多。为增加功率,采用空间复用 (Spatial multiplexing) 技术将 3 个光束整形后的 DLSBs 在 BPP 小的方向上叠加起来。为了进一步减小小聚焦后光斑的尺寸,利用扩束器 (Beam expander) 来进一步减小光束的发散角。

### 2.2 半导体激光短阵列的结构特点及工作特性

本文所采用的 DLSBs 芯片是单量子阱结构,通过分子束外延 (MBE) 技术在 GaAs 衬底上生长得到。表 1 所示为该激光器的主要参数,它是由 10 个发光单元组成的,每个发光单元宽度为 90 μm,周期为 500 μm。器件的腔长为 3.6 mm,增加了散热面积,从而提高了出光功率并将慢轴方向的发散角 θ<sub>∥</sub> 减小至 6° (90% 功率)。

表 1 DLSBs 的主要参数

Table 1 Typical values of DLSBs

Parameter	Values
Bar width	5.4 mm
Number of emitters	10
Cavity length	3.6 mm
Emitter spacing	500 μm
Emission width	90 μm
Fill factor	20%
θ <sub>∥</sub> (90% power content)	6°
θ <sub>⊥</sub> (90% power content)	45°

如图 2 所示, DLSBs 均利用 AuSn 硬焊料封装技术烧结在铜材料的 CS 热沉上, 相比软焊料 (In)

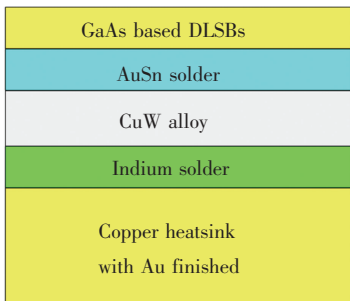


图 2 传导冷却 DLSBs 的硬焊料封装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of conduction cooled DLSBs with hard solder packaging process

烧结技术,它具有长寿命和高可靠性等优点。由于 GaAs 和铜有非常大的热膨胀系数 (Coefficient of thermal expansion, CTE) 差,所以在激光芯片和铜热沉之间加入铜钨合金次热沉来消除烧结过程中产生的应力 and Smile 效应,不仅提高了激光器的使用寿命,还提高了光束质量。

### 2.3 光束整形

在激光光纤耦合的研究中,常通过计算光参数积 (BPP) 来进行光学设计。光参数积定义为束腰直径 ω 的 1/2 与远场发散角 θ 的 1/2 的乘积:

$$K_{BPP} = \frac{1}{2}\omega \times \frac{1}{2}\theta, \tag{1}$$

其物理意义在于:不考虑像差的影响,激光束在通过透镜及反射镜等光学元件时 BPP 的大小不变<sup>[11]</sup>。DLSBs 有源区厚度为 1 μm,根据公式 (1) 可以分别计算出它在快轴方向和慢轴方向的光参数积 K<sub>FA</sub> 和 K<sub>SA</sub> 的大小:

$$K_{FA} = 0.26 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \tag{2}$$

$$K_{SA} = 130 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

从式 (2) 可以看出, DLSBs 在快轴方向光束质量很好,达到了衍射极限;但是慢轴方向的光束质量很差,必须减小慢轴方向的 BPP。根据光学原理,这个过程要增加快轴方向的 BPP,一般采用阶梯镜、棱镜组等光束分割重排的方法来达到这一目的<sup>[10,12]</sup>。本文采用 LIMO 公司生产的光束转换器 (Beam transform system, BTS) 和自行设计的慢轴准直镜 (SAC) 进行光束整形。

如图 3 所示, BTS 由快轴准直镜 (Fast axis collimator, FAC) 和 45° 倾斜柱透镜阵列组成。

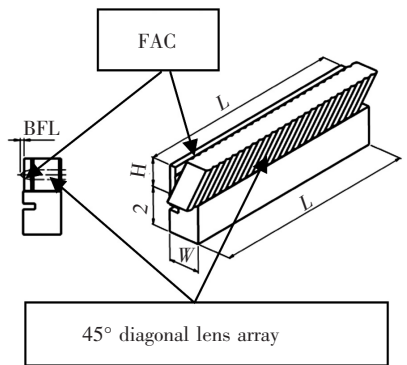


图 3 BTS 外形图

Fig. 3 Configuration of BTS

FAC 用来压缩 DLSBs 快轴方向的发散角。由于 DLSBs 快轴方向发散角达到了 45° (90% 功

率),所以 FAC 的面型需要是非球面以消除球差<sup>[13]</sup>。45°倾斜柱透镜阵列可以将每个发光单元出射的激光旋转 90°,从而减小了慢轴方向的 BPP 值。理论上激光通过 FAC 后发散角可压缩到 3.45 mrad,但是由于 45°倾斜柱透镜像差、加工精度以及装调等因素,通过 BTS 后,快轴方向的发散角  $\theta'_{FA}$  压缩为 8 mrad。

采用普通的柱面镜就可以压缩较小的慢轴方向发散角,其焦距  $f'_{SA}$  由式(3)确定:

$$f'_{SA} = \frac{\omega_{SA}}{2 \tan(\theta'_{SA}/2)}, \quad (3)$$

式中  $\omega_{SA} = 90 \mu\text{m}$ ,为发光单元宽度; $\theta'_{SA}$ 为准直后的慢轴发散角。为了使聚焦后的光斑对称,需要使准直后的慢轴发散角和准直后的快轴发散角  $\theta'_{FA}$  相同,最后计算得  $f'_{SA} = 11.25 \text{ mm}$ 。准直后慢轴方向的光斑尺寸  $\omega'_{SA}$  由式(4)决定:

$$\omega'_{SA} = 2f'_{SA} \tan(\theta_{SA}/2) = 1.18 \text{ mm}. \quad (4)$$

图 4 是单个 DLSBs 光束整形的原理图,其中图 4(a)是光束整形的俯视图,图 4(b)是侧视图。光束整形后,Y 轴方向发散角和 X 轴方向相同,均为 8 mrad。经计算单个 DLSB 的光参数积为:

$$k_{BPP,Y} = \frac{\omega'_{FA}}{2} \times \frac{\theta'_{FA}}{2} = 10 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (5)$$

$$k_{BPP,X} = \frac{\omega'_{SA}}{2} \times \frac{\theta'_{SA}}{2} = 2.36 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

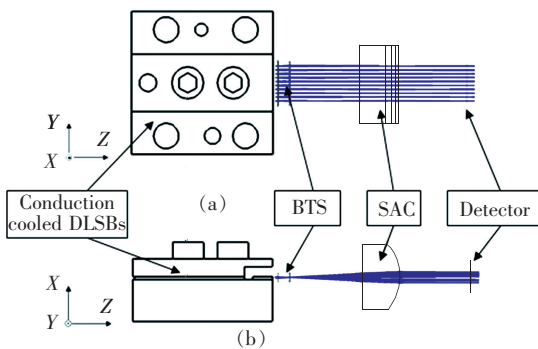


图 4 光束整形原理图

Fig. 4 Optical setup of beam shaping

## 2.4 三个 DLSBs 的空间复用及扩束

从式(5)可以看出,单个 DLSBs 在 X 轴方向的 BPP 值较小,为了增加激光功率,可以在这个方向把光束叠加起来使 BPP 值在两个方向上更加接近,该过程称为空间复用。图 5 所示为空间复用技术的原理图,空间复用的关键在于各光束的传播方向相同。为了增加光路调节的误差容限

和减小遮挡效应,将 DLSBs 在 X 方向的间隔设置为 2 mm,此时这个方向的光束质量为:

$$K_X = \omega_X \times \theta'_{SA} = 12.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (6)$$

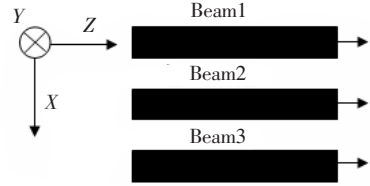


图 5 空间合束示意图

Fig. 5 Schematic diagram of spatial multiplexing

根据公式

$$K_{RMS} = \sqrt{k_{BPP,X}^2 + k_{BPP,Y}^2} \quad [11], \quad (7)$$

合束后光束的均方根光参数积为 15.6 mm · mrad。

为了进一步压缩激光束的发散角,采用了激光扩束器,它本质上是一个倒置的望远系统,在减小发散角的同时会增加激光的光斑尺寸。不考虑像差的影响,在扩束过程中 BPP 值保持不变。图 6 是激光扩束器的原理图,它由焦距为负的物镜和焦距为正的目镜组成,根据光学原理,只有物镜的像方焦点和目镜的物方焦点重合时扩束效果才能达到最好。

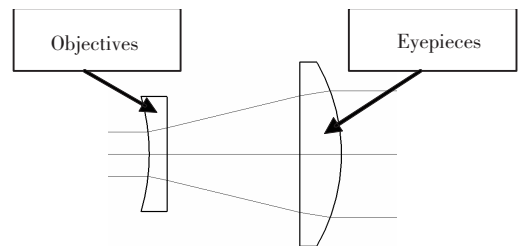


图 6 激光扩束器示意图

Fig. 6 Schematic diagram of laser beam expander

## 2.5 聚焦镜的设计及比较

聚焦镜应该和光纤的数值孔径相匹配,对于数值孔径为 0.22 的光纤,聚焦镜的 F 数应该为 2.2,是一个比较小的数值,所以球差和正弦差会影响它的聚焦效果,需要利用正负透镜组合来矫正。透镜数目越多矫正质量越好,但是多片镜子会导致加工成本增加和装调难度加大。为此利用 Zemax 软件设计了两片式、三片式和非球面聚焦镜的结构。为求出两片式和三片式聚焦透镜结构,首先利用 PW 法计算它们的初始结构,然后利用 Zemax 的优化功能求出最佳参数;非球面聚焦

镜则是直接利用 Zemax 优化功能求出来。图 7 (a) 从左至右、从上至下分别是平凸、两片式、三片式和非球面聚焦镜, 两片式聚焦镜组是由双凸透镜和负弯月透镜组成的, 而三片式聚焦镜组则是由双凸、负弯月和正弯月透镜组成的。为了研究它们的成像质量, 利用 Zemax 绘制了它们在 0° 视场时的点列图, 如图 7(b) 所示(位置和图 7(a) 相对应)。从图上可以看出非球面的聚焦质量最好, 其有效弥散斑半径(RMS radius)为 0.01 μm, 远小于艾里斑半径(Airy radius); 其次是三片式透镜, 它的弥散斑半径也小于艾里斑; 两片式聚焦镜聚焦质量较差, 其有效弥散斑半径为 8.596 μm, 大于艾里斑半径的值 2.918 μm; 平凸聚焦镜的聚焦质量最差, 其弥散斑半径为 63.6 μm, 远大于艾里斑半径。这说明非球面聚焦镜和三片式聚焦镜可达到衍射极限, 而两片式和平凸聚焦镜没有达到衍射极限。但是非球面透镜价格昂贵, 所以本文选用三片式聚焦镜。

图 8 是根据上述设计利用 Zemax 绘制的总体光学结构图, 利用该光路图进行光线追迹, 得到了图 9 所示的光纤端面光场分布图。从图 9 可以看出, 光纤的光斑尺寸为 108 μm × 88 μm, 对角线光斑尺寸为 140 μm。通过光线追迹可计算出耦合到 200 μm 光纤的效率为 98.5%。

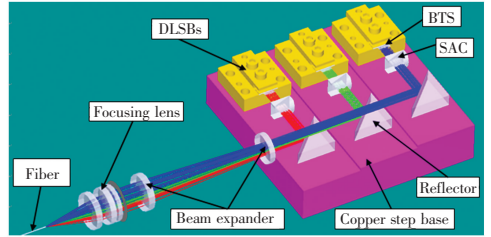


图 8 模块的总体光学结构图

Fig. 8 Overall optical setup of the module

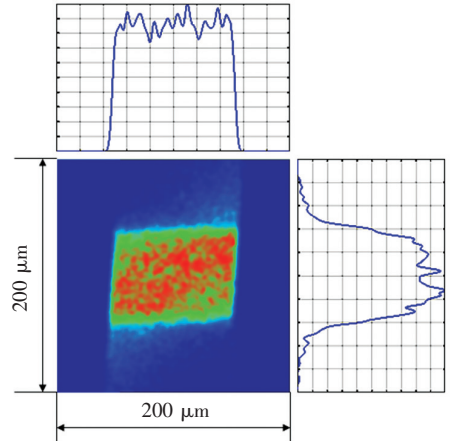


图 9 利用光线追迹得出的光场分布图

Fig. 9 Beam profile at fiber end drawn by ray tracing

### 2.6 模块的散热设计

半导体激光器在高功率连续工作时散热是非常重要的, 如果结温(Junction temperature)过高会导致器件寿命缩短, 严重时甚至会损坏器件。一般半导体激光器的结温要求控制在 75 °C 以下<sup>[14]</sup>。图 10(a) 是该模块的散热结构图。水冷板(Water cooled plate)是由高热导率的铝制成的, 在其内部利用搅拌摩擦焊技术制成 3 个水流通道的。为了使各个 DLSBs 之间串联, 使用高热导率的 AlN 陶瓷片插入到激光热沉和阶梯底座之间。为了减小接触热阻, 利用具有延展性的铜箔贴在各接触面上。实验中采用了 3 个 DLSBs, 并且每个激光器所处的铜阶梯底座(Copper step base)的高度不同, 为了计算速度快, 此处只研究位于台阶最高处的 DLSBs。

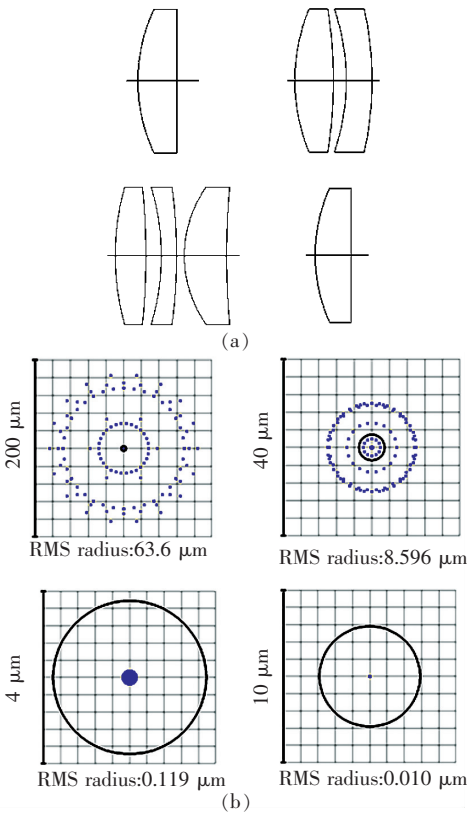


图 7 聚焦镜的比较。(a) 不同聚焦镜的结构图; (b) 不同聚焦镜点列图比较。

Fig. 7 Comparison of different focusing lens. (a) Configurations of different focusing lens; (b) spot diagrams of different focusing lens.

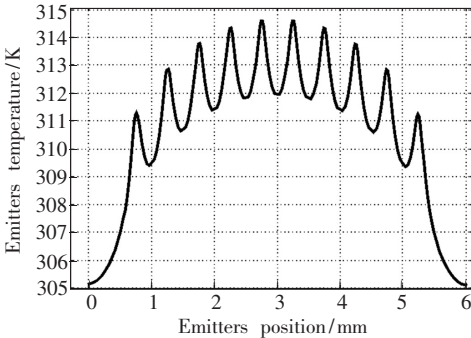
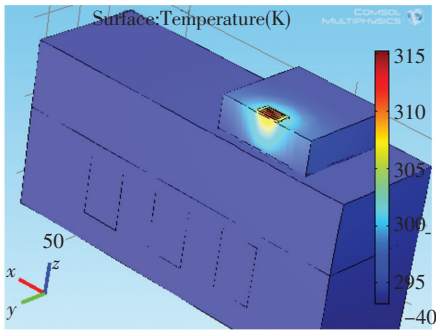
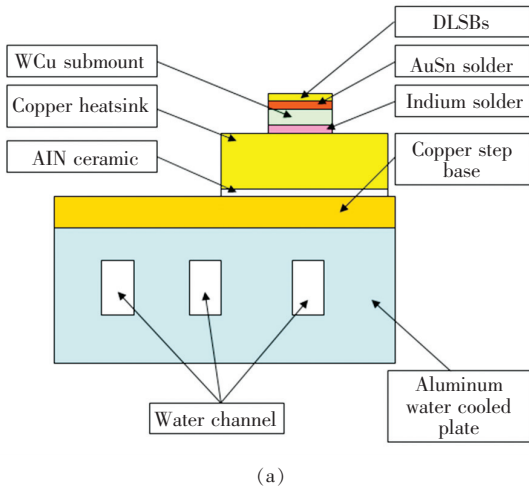


图 10 (a) 模块散热结构示意图; (b) CW 模式、电流为 52.5 A 时的稳态温度分布; (c) CW 模式、电流为 52.5 A 时阵列各发光单元的稳态温度。

Fig. 10 (a) Schematic diagram of heat dissipation for the module; (b) stationary temperature distribution of the module with CW mode at 52.5 A; (c) each emitter stationary temperature of the array with CW mode at 52.5 A.

根据傅里叶定律和能量守恒定律, 可得出笛卡尔坐标系下的三维非稳态导热微分方程<sup>[15]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \Phi, \quad (8)$$

其中  $\rho, c, k, \Phi, t$  和  $\tau$  分别为材料的密度、比热容、导热系数、单位体积生热率、温度及时间。半导体激光器为 CW 方式工作, 假设导热系数为常数, 则系统的导热可以看作是一个稳态问题, 式(8)可改写为:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\Phi}{k} = 0. \quad (9)$$

数学上, 式(9)又称之为泊松方程。在该问题中半导体激光芯片是热源, 假设激光芯片、焊料、次热沉、铜热沉、阶梯底座及冷水板这些相互接触的地方无接触热阻且满足界面连续条件, 即:

$$t_1 = t_2,$$

$$\left( k \frac{\partial t}{\partial n} \right)_1 = \left( k \frac{\partial t}{\partial n} \right)_2. \quad (10)$$

各材料和流体(空气, 水)相接触的面积是一个对流换热的问题, 根据牛顿冷却定律<sup>[16]</sup>:

$$-k \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f), \quad (11)$$

它表示热流量和对流换热系数  $h$  及材料表面温度  $t_w$  与流体温度  $t_f$  差成正比。对流换热系数的确定比较复杂, 它和流体的粘度和热物性有关。本问题中空气以自然对流方式流动, 可以根据经验设定为  $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。然而, 在水通道中, 水受迫对流, 对流换热系数  $h$  比较难确定。

可以看出这是一个流体-散热耦合的问题, 对该模块进行热分析比较复杂, 所以本文采用 COMSOL multiphysics 软件对这个问题进行了有限元分析。首先根据图 10(a) 的结构在软件中建模, 然后模拟水以  $13 \text{ L}/\text{min}$  流量流动时的速度场分布, 最后分析了半导体激光在  $52.5 \text{ A}$  工作时的热分布, 得到图 10(b)。然后, 绘制了如图 10(c) 所示的 DLSBs 各发光单元的温度分布曲线。从该图可以看出中间位置的发光单元温度为  $314.5 \text{ K}$ , 比边缘位置的发光单元温度高了  $3 \text{ K}$ , 所以 DLSBs 各发光单元的热串扰较小, 同时可得出该散热系统的热阻  $R_{th} = 0.70 \text{ K}/\text{W}$ , 其定义为:

$$R_{th} = \frac{dt}{dQ}, \quad (12)$$

式中  $t$  为发光单元的结温,  $Q$  为激光器在工作时产生的废热, 热阻的物理意义为废热每增加  $1 \text{ W}$  发光单元结温的增加量。

### 3 光纤激光模块的组装及性能测试

#### 3.1 BTS 的安装

利用六维精密位移台将 BTS 的位置和角度

调节到适当位置, 然后利用紫外胶将其固化在 DLSBs 的热沉上, 得到如图 11(a) 所示的实物图。然后拍摄得到图 11(b) 所示光斑图, 从图上可以看到光束在水平方向得到准直, 发散角大小为  $8 \text{ mrad}(1/e^2)$ ; 但在垂直方向仍然发散。

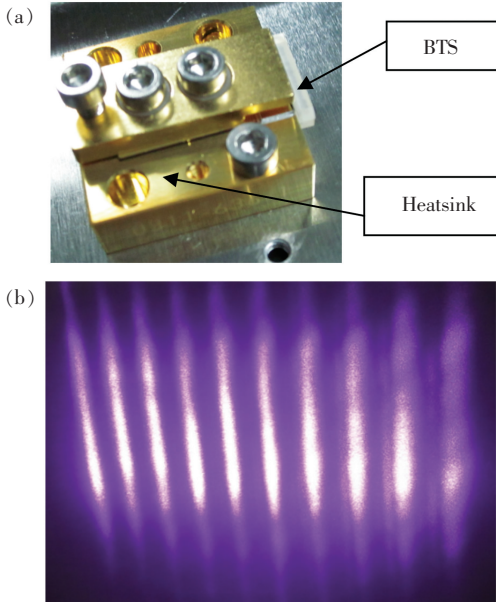


图 11 DLSBs 的光束转换。(a) 安装 BTS 的 DLSBs; (b) DLSBs 通过 BTS 后的光束形貌。

Fig. 11 Beam transform of DLSBs. (a) DLSBs mounted with BTS; (b) optical profile of the DLSBs.

### 3.2 系统组装及光束参数测量

根据图 8 所设计的光学原理图, 利用六维精密位移台调节和安装各光学元件, 得到图 12 所示的系统图。然后利用德国 PRIMES 公司生产的 FocusMonitor 来测量聚焦后光束的参数, 得到图 13 所示的结果。经计算可得出光束的束腰直径为  $175.2 \mu\text{m}$ , 发散角为  $12.4^\circ$ , 所以可将它耦合到芯径  $200 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的光纤。

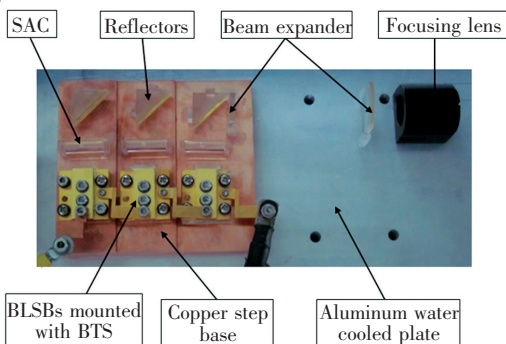


图 12 模块的实物图

Fig. 12 Photo of the module

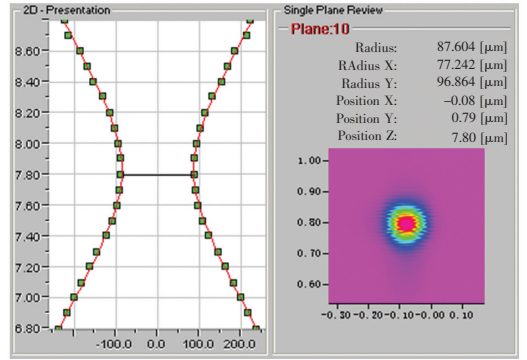


图 13 聚焦后激光参数的测量结果

Fig. 13 Measurement result of the focused beam parameter

### 3.3 光纤耦合

由于聚焦后激光功率密度高, 所以实验中采用了特殊的光纤, 它有很好的可靠性和耐高温性, 利用精密位移台调节光纤到激光束腰的位置。测出它的出光功率并把它和 DLSBs 直接出光、聚焦镜前光功率比较, 得到图 14 的曲线图。经测量, 在驱动电流为  $52.5 \text{ A}$  时, 所有 DLSBs 直接出光的总功率可达  $145.3 \text{ W}$ ; 在聚焦镜前测量功率为  $122.6 \text{ W}$ , 光纤出光功率为  $107 \text{ W}$ , 扩束后光纤耦合的效率为  $87.2\%$ 。考虑到使用的光纤端面没有镀膜透膜, 将会损失  $8\%$  的光功率, 所以若采用镀膜光纤耦合效率可增加至  $94.8\%$ 。考虑光束整形、镜面剩余反射和遮拦效应等影响因素, 总光纤耦合效率为  $73.6\%$ 。光纤出光的电光转换效率在驱动电流为  $52.5 \text{ A}$  时为  $43.1\%$ , 在  $30 \text{ A}$  时达到最大值  $47.3\%$ 。

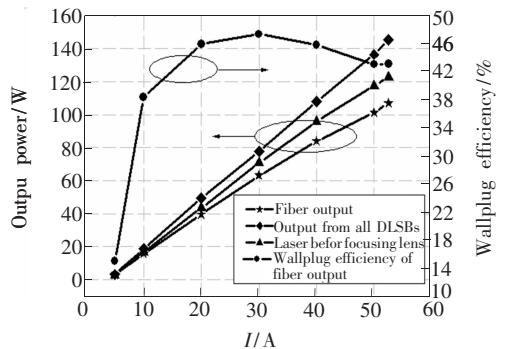


图 14 激光功率测量结果

Fig. 14 Optical power measurement result

为了研究光纤出光的光强分布, 首先拍摄下光斑图, 然后利用 Matlab 软件绘制出光强分布图 (图 15)。从图 15 中可以看出, 由于光纤具有匀光作用, 光纤出光为圆形的平顶分布, 所以它可以

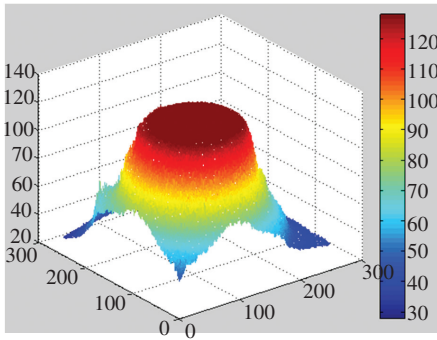


图 15 光纤出光的光强分布

Fig. 15 Optical intensity distribution of the laser output from fiber

方便地应用于激光医疗和塑料焊接等领域。

### 3.4 模块的散热分析

为了研究模块的散热特性,利用光谱仪测量了位于台阶最高处的 DLSBs 在不同电流时的光谱,电流为 10 ~ 50 A,每隔 10 A 测量一次光谱,绘制成图 16。

公式(12)可变换为:

$$R_{th} = \left(\frac{d\lambda}{dt}\right)^{-1} \left(\frac{d\lambda}{dQ}\right), \quad (13)$$

其中  $\lambda$  为激光器的出射波长; $\gamma = \frac{d\lambda}{dt}$ ,为波长-温度漂移系数,对于 976 nm 的半导体激光器它接近常数,一般为 0.32 nm/K<sup>[17]</sup>。对式(13)求解可得到:

$$R_{th} = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{\lambda(I_2) - \lambda(I_1)}{Q(I_2) - Q(I_1)} \right], \quad (14)$$

式中  $I$  为工作电流,废热可由下式计算得出:

$$Q(I) = U(I) \times I - P_{op}(I), \quad (15)$$

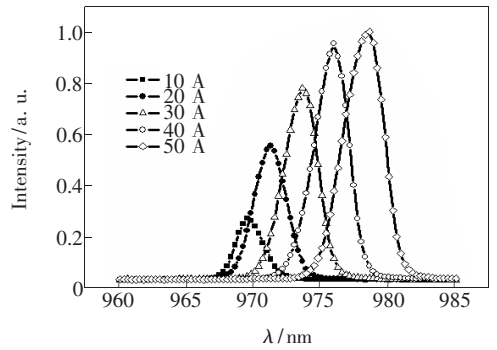


图 16 最高台阶的 DLSBs 在不同驱动电流下的光谱曲线

Fig. 16 Spectra of DLSBs at highest step with different driving current

式中  $U(I)$  为激光器工作时的电压。通过图 13 的光谱曲线和测量出对应电流的光功率及工作电压,利用上述公式可求出 4 个热阻的值并取平均值,得到热阻的实验值为 1.29 K/W。该值大于 COSMOL multiphysics 计算值,其原因是有限元分析时没有考虑到接触热阻。

## 4 结 论

利用 3 只 976 nm 半导体激光短阵列为子模块,通过光束整形、空间合束、激光扩束和光纤耦合最终得到高亮度的光纤耦合模块。耦合后光纤的出光功率达到了 107 W,对应亮度为 2.23 MW/(cm<sup>2</sup> · sr),为国内利用列阵进行光纤耦合的领先水平。在工作电流为 52.5 A 时,光纤耦合模块的电光转换效率为 43.1%,远高于全固态激光器。模块的热阻为 1.29 K/W,具有良好的散热性能。

## 参 考 文 献:

- [1] Ding Xiaochen, Zhang Pu, Xiong Lingling, et al. Thermal reaction of high power semiconductor laser with voids in solder layer [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2011, 38(9):0902006-1-6 (in Chinese).
- [2] Dai Zhiyong, Zhang Xiaoxia, Peng Zengshou, et al. High power single-frequency narrow linewidth fiber laser with nonlinear two-wave mixing [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(2):159-163 (in Chinese).
- [3] Li Zaijin, Hu Liming, Wang Ye, et al. Facet coating for 808 nm Al-containing semiconductor laser diodes [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2010, 18(6):1258-1263 (in Chinese).
- [4] Peng Hangyu, Liu Yun, Shan Xiaonan, et al. 2 600 W high efficiency laser diode source with polarization coupling [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(10):1036-1040 (in Chinese).
- [5] Niu Gang, Fan Zhongwei, Wang Peifeng, et al. A single fiber coupling module with the output power of 50 W [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2008, 19(4):427-429 (in Chinese).
- [6] Zhu Hongbo, Liu Yun, Hao Mingming, et al. High efficiency module of fiber coupled diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(11):1147-1151 (in Chinese).



- [ 7 ] Huang R K, Chann B, Burgess J, *et al.* Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO<sub>2</sub>, and solid state lasers [J]. *SPIE*, 2012, 8241:8241021-1-6.
- [ 8 ] Liu Youqiang, Cao Yinhua, Gao Jing, *et al.* The research of fiber-coupled high power diode laser [J]. *SPIE*, 2011, 8192:81922X-1-10.
- [ 9 ] Gao Xin, Bo Baoxue, Qiao Zhongliang, *et al.* Single fiber coupling of multi-linear-array-diode-lasers [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2010, 39(7):1229-1234 (in Chinese).
- [10] Wang Xiangpeng, Liang Xuemei, Li Zaijin, *et al.* 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2010, 18(5):1021-1027 (in Chinese).
- [11] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. *High Power Diode Lasers and Their Applications* [M]. New York: Springer Series in Optical Sciences, 2007:121.
- [12] Yang Ye, Liu Yun, Qin Li, *et al.* Near diffraction limit high-brightness taper 850 nm laser diodes [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(10):1064-1068 (in Chinese).
- [13] Ruebenach O, Hambuecker S, Sinhoff V R. Micro parts for macro power: Efficient beam shaping optics for high-power diode lasers [J]. *SPIE*, 2005, 5711:177-184.
- [14] Hodges A, Wang J, de Franza M, *et al.* A CTE matched, hard solder, passively cooled laser diode package combined with nXLT™ facet passivation enables high power, high reliability operation [J]. *SPIE*, 2007, 6552:65521E-1-9.
- [15] Yang Shiming, Tao Wenquan. *Heat Transfer Theory* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:42-45 (in Chinese).
- [16] Feeler R, Coleman S, Levy J, *et al.* Elimination of deionized cooling water requirement for microchannel-cooled laser diode arrays [J]. *SPIE*, 2007, 6456:645617-1-8.
- [17] Leers M, Boucke K. Cooling approaches for high power diode laser bars [C]//Electronic Components and Technology Conference, Florida, USA: IEEE, 2008:1011-1016.