

文章编号 1004-924X(2013)04-0895-09

基于半导体激光短阵列的 976 nm 高功率光纤耦合模块

郝明明^{1,2}, 秦 莉¹, 朱洪波^{1,2}, 刘 云¹, 张志军^{1,2}, 王立军^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:采用 12 只出射波长为 976 nm 的传导冷却半导体激光短阵列为发光单元, 研制出了百瓦级高功率光纤耦合模块。首先, 利用光束转换器(BTS)和柱透镜对每只半导体激光短阵列进行光束整形, 使得快慢轴方向光束质量接近并且发散角相同; 然后, 应用空间合束技术将每 6 只半导体激光短阵列在垂直方向上叠加, 形成一个激光组, 并利用偏振分束器(PBS)将两个激光组偏振合束; 最后利用优化设计的三片式聚焦镜将激光耦合到光纤中。实验结果表明: 该光纤模块的连续输出激光功率可达 418.9 W, 光纤芯径仅为 400 μm , 数值孔径(NA)为 0.22, 由此可得到激光亮度为 2.19 MW/($\text{cm}^2 \cdot \text{str}$)。利用 Matlab 软件分析光纤出射的光束形貌为平顶分布, 显示其适合用于金属材料的硬化和焊接等领域。最后测量了模块的光谱, 电流从 20 A 增加到 50 A 时, 激光的峰值波长漂移了 6.8 nm, 并且在 50 A 时光谱宽度为 4.12 nm, 表明该光纤耦合模块散热良好。同其它类型激光器相比, 本激光模块电光转换效率和出光功率高, 适用于材料加工和泵浦光纤激光器等领域。

关键词: 半导体激光短阵列; 光纤耦合; 高功率激光; 光学设计; 空间合束; 偏振合束

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0895

High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars

HAO Ming-ming^{1,2}, Qin Li¹, ZHU Hong-bo^{1,2}, LIU Yun¹, ZHANG Zhi-jun^{1,2}, WANG Li-jun^{1*}

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

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

Abstract: By taking twelve 976 nm diode laser short bars as emitting units, a high power fiber coupled diode laser module with several hundred watts was developed. Firstly, the laser beam emitting from each diode laser short bar was shaped by a Beam Transform System (BTS) and a cylindrical lens, by which fast and slow axis beam parameter products could be symmetrized and the divergence was similar in the two directions. Then, every six diode laser short bars made up a laser stack by spatial multiplexing technology in the perpendicular direction and the laser beams from the two laser stacks were combined by polarization multiplexing. Finally, optimized triplet lens focused laser beams into a single

收稿日期: 2012-12-08; 修订日期: 2013-01-05.

基金项目: 吉林省科技厅项目(No. 10ZDGG001, No. 20112106); 长吉图专项资金资助项目(No. 2011CJT0003)

multimode fiber. Experimental results indicate that the continuous wave optical power of the coupled diode laser module can reach to 418 W from the multimode fiber with a core diameter of 400 μm and numerical aperture of 0.22, and its brightness is 2.19 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$. Matlab software was also applied to research of the near field intensity distribution of the laser spot output from the fiber and the result shows that the intensity distribution is a top hat, which proves that the module can be used in numerous applications like the welding and hardening of metal. The optical spectrum was also measured to determine the heat dissipation of the device and the result shows that the center wavelength of the device has shifted 6.8 nm with the driving current increasing from 20 A to 50 A, and the spectral width is just 4.12 nm (Full Width at Half Maximum, FWHM) for the diode laser short bar at the current of 50 A, which indicates that the device is favorable to the heat dissipation and could reliably work for long time. As compared with other candidates, the designed module has higher conversion efficiency and fiber output powers, and is suitable for the fields of material process and laser pumping.

Key words: diode laser short bar; fiber coupling; high power laser; optical design; spatial multiplexing; polarization multiplexing

1 引言

半导体激光阵列(Laser Diode Array, LDA)具有光电转换效率高、可靠性能好、金属材料对它的吸收率高和维修成本低等优势,已经广泛应用于工业加工、生物医疗、军事防御和泵浦固体/光纤激光器等领域,是目前国际上的研究热点之一^[1-6]。

但由于特殊的波导结构,LDA的光束质量比较差,不能直接应用于上述领域,为方便使用常需要将半导体激光耦合到单根光纤。首先,光纤具有光束匀化的功能,能将不对称椭圆激光转换为均匀、圆形的光束,有利于 LDA 用于金属材料的切割和硬化等;其次,光纤柔软且可弯曲,可将激光能量导向任意方向,极大地方便了工程应用;最后,当 LDA 应用于端泵固体激光器时,利用光纤传输不仅可以克服 LDA 的数目限制,还可以改善泵浦光的光束质量和提高二极管泵浦固体激光器的稳定性^[7]。

由于以上原因,目前国际上很多研究机构针对高性能光纤耦合半导体激光模块进行了大量的研究。德国 Laserline 公司利用微通道冷却器散热的 cm-bar 作为光纤耦合的发光单元,得到了最大出光功率达 15 000 W 的激光模块输出,光纤芯径为 1 000 μm , $\text{NA}=0.22$;对于高亮度的激光模块,芯径为 400 μm ,数值孔径 $\text{NA}=0.1$ 的光纤可输出激光 2 000 W。美国 Apollo Instruments 利

用传导冷却的 cm-bar 作为发光单元,得到了 10 kW 的光纤输出。国内也开展了高功率光纤耦合模块的研制:北京工业大学利用光束整形、波长合束和偏振合束等技术将 664 W 的半导体激光耦合到 600 μm , $\text{NA}=0.22$ 的光纤中^[8];长春理工大学利用阶梯镜对准直的半导体激光叠阵光束整形,并将 195 W 的激光耦合到 400 μm , $\text{NA}=0.22$ 的光纤中^[9];本课题组则利用半导体激光单管研制成了芯径为 200 μm , $\text{NA}=0.22$ 的 33.2 W 光纤耦合模块^[10]。

然而,对于泵浦光纤激光器和金属材料的切割等应用,市场对激光亮度提出了更高要求,为此德国联邦教育和研究部(BMBF)推出的 HEMIL-AS 计划中一个目标就是研制出 5 000 W,光束质量为 20 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的激光模块,其实现的途径就是研制高亮度的芯片—半导体激光短阵列(Diode Laser Short Bars, DLSBs)。在该项目支持下德国很多公司开展了 DLSBs 的研制,目前已取得了一定的研究成果。m2k-laser 报道了在微通道散热的条件下,由 5 个发光单元组成的 DLSBs 在连续输出模式下出光功率可达 50 W,并且每个发光单元条宽仅为 90 μm ^[11];OSRAM 和 DILAS 等单位联合研制的填充因子(fill factor)为 50% 的 DLSBs,其出光功率可达 90 W,它是由 9 个条宽为 200 μm 的发光单元组成的,周期为 400 μm ^[12]。为了方便应用,这些研究单位已经利用 DLSBs 进行了光纤耦合,DILAS 利用 DLSBs 作为发光单元研制成功了光纤出光功率为 775 W

的模块,该模块的光纤芯径仅为 200 μm , $\text{NA}=0.22$;该模块仅使用了偏振合束,如果再结合波长合束可以更进一步提高出光功率^[13]。文献[12]还报道了利用他们研制的高填充因子 DLSBs 进行光纤耦合,利用偏振合束和波长合束技术最终得到了 2 400 W 的光纤输出,光纤芯径为 600 μm , $\text{NA}=0.1$ 。

DLSBs 是一种新型的芯片结构。与 cm-bar 相比,其谐振腔长度大于 3 mm,这种结构不仅有利于散热还可以有效地减小慢轴方向发散角;由于芯片腔面的光功率密度更高,容易造成灾变性光学镜面损伤,所以还需要先进的腔面膜制备技术。

目前国内还没有利用 DLSBs 进行光纤耦合研究的报道,本文利用亮度较高的 DLSBs 进行光纤耦合研究来得到高亮度的光纤输出,使半导体激光更加方便地应用于泵浦固体/光纤激光器和金属材料加工等方面。

2 光学设计

2.1 半导体激光短阵列的结构特点及工作特性

所采用的 DLSBs 芯片为单量子阱结构,是通过分子束外延(MBE)技术在 GaAs 衬底上生长得到的。表 1 所示为该激光器的主要参数,它由 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 。由于器件的腔长为 3.6 mm,增加了散热面积,从而提高了单元出光功率,减小了慢轴方向的分散角 θ_{SA} 至 6°(90% 功率)。

表 1 DLSBs 的主要参数
Tab. 1 Typical values of DLSBs

参量	数值
阵列宽度/mm	5.4
发光单元个数	10
腔长/mm	3.6
发光单元周期/ μm	500
发光单元宽度 $\omega_{\text{SA}}/\mu\text{m}$	90
填充因子/%	18
慢轴发散角 θ_{SA} (90% 功率)/°	6
快轴方向发散角 θ_{FA} (90% 功率)/°	45

DLSBs 均利用 AuSn 硬焊料烧结在标准的

传导热沉上,相比软焊料烧结技术,可使激光芯片工作更加可靠;在激光芯片和铜热沉之间加入铜钨合金次热沉,消除了封装过程产生的热应力和 Smile 效应,不仅增加了激光器的使用寿命还提高了光束质量。

2.2 光纤耦合原理

光参数积(Beam Parameter Product, BPP)的计算是光纤耦合中常用的分析方法。根据 ISO 标准^[14]它的定义为激光束腰直径 ω 的一半与远场发散角 θ 的一半的乘积:

$$\text{BPP} = \frac{1}{2} \omega \times \frac{1}{2} \theta. \quad (1)$$

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 不变^[15]。DLSBs 有源区厚度为 1 μm ,则根据式(1)可以分别计算出它在快轴方向和慢轴方向的光参数积 BPP_{FA} 和 BPP_{SA} ,如公式 2 所示

$$\left. \begin{aligned} \text{BPP}_{\text{FA}} &= 0.26 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \\ \text{BPP}_{\text{SA}} &= 130 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

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,必须对其进行光束整形以减小慢轴方向光参数积。图 1 所示为该光纤耦合模块的技术流程图,下面对每部分详细说明。

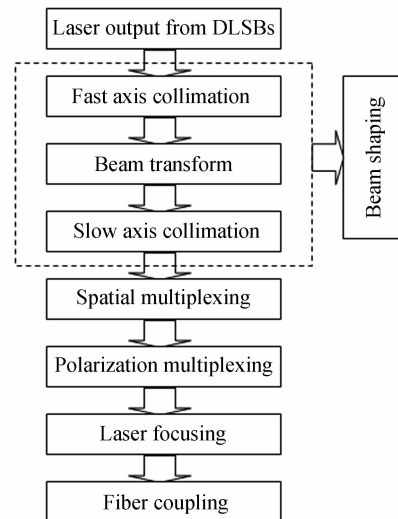


图 1 光纤耦合模块的原理图

Fig. 1 Block diagram of fiber coupling module

2.2.1 DLSBs 的光束整形

采用 LIMO 公司的光束转换器(Beam Transform System, BTS)进行光束整形。如图 2

所示, BTS 是由快轴准直镜 (Fast Axis Collimation, FAC) 和 45° 倾斜柱透镜阵列组成的。

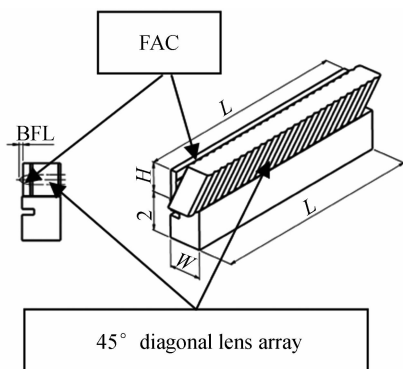


图 2 BTS 的外形图
Fig. 2 Configuration of BTS

由于 DLSBs 的快轴发散角为 45° (90% 功率), 需要数值孔径为 0.38 的准直镜, 所以该光学元件是一个非球面的柱透镜, 它可以矫正大数值孔径产生的球差。为了能使准直后的光斑尺寸小于发光单元周期, 其焦距为 0.29 mm。45° 倾斜柱透镜阵列每个单元口径和发光单元周期相同, 并且焦距为无穷大。每个发光单元出射的激光通过 BTS 后旋转 90°, 使得旋转后水平方向的光参数积变为原快轴方向的 10 倍, 而旋转后垂直方向光参数积和原慢轴方向相同, 从而达到了光束整形的目的。理想情况下激光通过快轴准直镜 (FAC) 后发散角可压缩到 3.45 mrad, 但是由于像差、加工误差及装调等因素, 激光通过 BTS 后发散角为 8 mrad。

压缩慢轴方向发散角时, 考虑 θ_{SA} 较小, 采用普通柱面镜就可以满足准直要求, 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, θ_{SA}' 为准直后慢轴发散角, 为了使聚焦后光斑对称, 需要使准直后快慢轴方向 BPP 和发散角相同, 所以取 $\theta_{SA}' = 8 \text{ mrad}$, 最后计算得 $f_{SA}' = 11.25 \text{ mm}$ 。准直后慢轴方向光斑尺寸 ω_{SA}' 由式(4)决定:

$$\omega_{SA}' = 2 f_{SA}' \tan(\theta_{SA}'/2) = 1.18 \text{ mm}. \quad (4)$$

图 3 是光束整形的原理图, 其中图 3(a) 是光束整形的俯视图; 图 3(b) 是它的侧视图; 图 3(c) 是利用 Zemax 软件进行光线追迹后的光斑, 此时 Y 轴方向发散角和 X 轴方向相同, 经计算单个

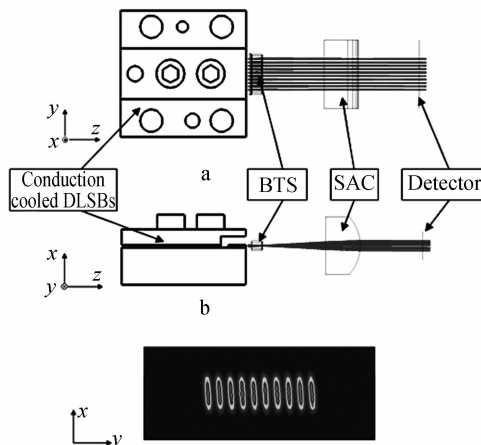


图 3 光束整形的原理图
Fig. 3 Schematic diagram of beam shaping

DLSB 的光参数积为:

$$\begin{cases} BPP_Y = \frac{\omega_{FA}'}{2} \times \frac{\theta_{FA}'}{2} = \frac{5 \text{ mm}}{2} \times \frac{8 \text{ mrad}}{2} = 10 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \\ BPP_X = \frac{\omega_{SA}'}{2} \times \frac{\theta_{SA}'}{2} = \frac{1.18 \text{ mm}}{2} \times \frac{8 \text{ mrad}}{2} = 2.36 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 6 个 DLSBs 的空间合束形成激光组

为了得到高功率的激光输出, 需要将 6 个光束整形后的 DLSBs 进行空间合束。根据式(5)可以看出沿 Y 轴方向光参数积较大, 达到了 $10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 而沿 X 轴方向光参数积较小, 所以空间合束时需要将激光束沿 X 轴方向叠加起来。为了达到这个目的, 将 6 个整形后的 DLSBs 固定在利用高热导率材料 (紫铜) 做成的阶梯底座上, 如图 4 所示。为了减小遮拦效应对效率的影响, 阶

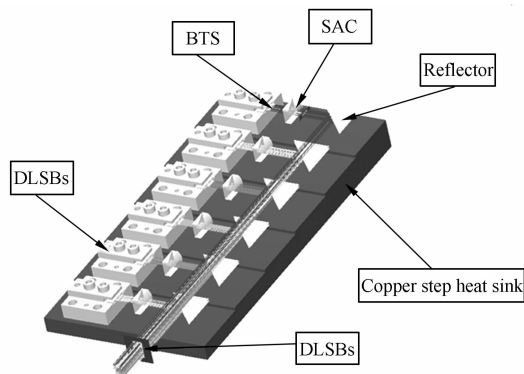


图 4 空间合束的光路图
Fig. 4 Optical layout of spatial multiplexing for laser stacks

梯底座的高度应大于 ω_{SA}' , 此处选择为 1.5 mm。然后用反射镜将光束反射 90°, 最终将 6 束激光叠加为矩形光束, 此时 X 轴方向光斑尺寸 ω_{FA}' 为 9 mm, 这个方向的光参数积为:

$$BPP_X' = \frac{\omega_X}{2} \times \frac{\theta_{SA}'}{2} = 18.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad} . \quad (6)$$

2.2.3 偏振合束(Polarization Multiplexing)

为了提高光纤的出光功率而不增加激光的 BPP 值, 采用了偏振合束技术。

半导体激光的偏振特性同有源区的应变有关系, 本文的 DLSBs 为压应变量子阱结构, 故出光为 TE 偏振态。所以采用了图 5 所示的光路图进行偏振合束。

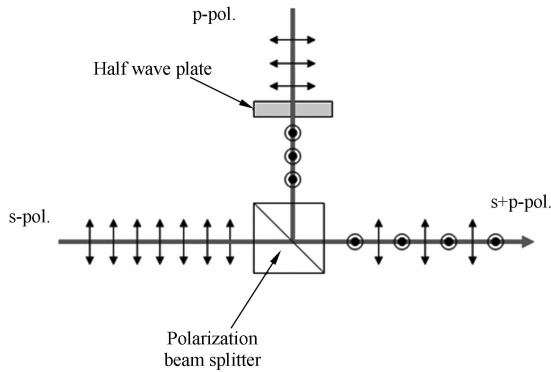


图 5 偏振合束光学原理图

Fig. 5 Schematic layout of polarization multiplexing

其原理是将其中一个激光组通过半波片使得其偏振态变为 s, 然后利用 PBS 将 2 束偏振态垂直的激光合为 1 束。偏振合束后激光功率为每组的 2 倍, 而光参数积 BPP 和每组相同。

2.2.4 激光聚焦镜的设计

准直后的激光束形状为矩形, 所以光束在对角线方向的光斑尺寸 ω_0 和远场发散角 θ_0 由式 (7) 决定, 激光聚焦镜的口径 D 和焦距 f' 可由式 (8) 和 (9) 计算:

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\omega_X'^2 + \omega_{FA}'^2} , \\ \theta_0 = \sqrt{2} \theta_{FA}' \end{cases} \quad (7)$$

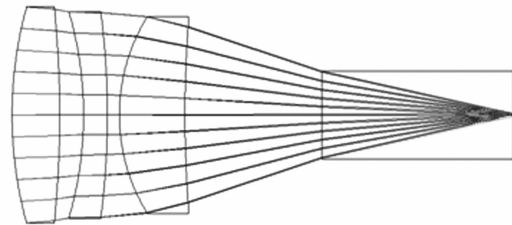
$$D > \omega_0 , \quad (8)$$

$$\frac{\omega_0}{2NA} \leq f' \leq \frac{D_{\text{fiber}}}{2 \tan(\theta_0/2)} . \quad (9)$$

式(8)表明聚焦镜的通光口径应大于激光光斑尺寸, 式(9)表明聚焦镜的焦距不仅应使聚焦后的光束发散角小于光纤对应数值孔径 NA, 还应该使聚焦后的焦平面光斑尺寸小于光纤芯径 D_{fiber} 。

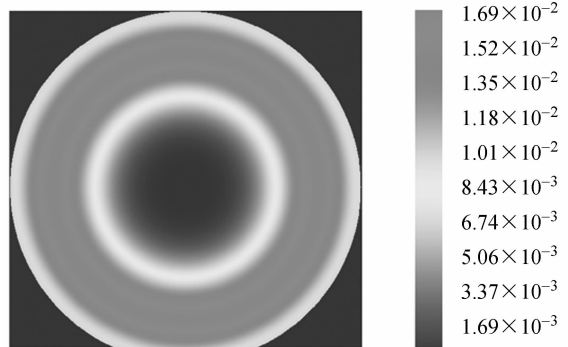
本文采用的光纤芯径为 400 μm , 数值孔径 $NA=0.22$, 计算得 $23.4 \text{ mm} \leq f' \leq 35.3 \text{ mm}$, 最终确定 $f'=29.1 \text{ mm}$ 。

偏振合束后激光束的特点是单波长和小视场, 而光纤的数值孔径则要求聚焦镜的 F 数较小, 所以设计聚焦镜时应矫正球差和正弦差。图 6 所示为利用 Zemax 优化设计聚焦镜的光学结构图和波前图, 从图 6(a) 上可以看出该聚焦镜是由 3 片球面透镜组成的, 平行平板是因为光纤采用了玻璃棒作为模式剥离器, 在设计聚焦镜时需要考虑。图 6(b) 是该聚焦镜的波前图, 从图上可以看出 (Peak To Valley, PTV) 的波前差为 0.0169λ , 所以很好地矫正了像差, 相比单片球面镜可显著减小焦平面光斑。



(a) 三片式激光聚焦镜的结构

(a) Optical layout of triplet focusing lens



(b) 聚焦镜波前图

(b) Wavefront map of focusing lens

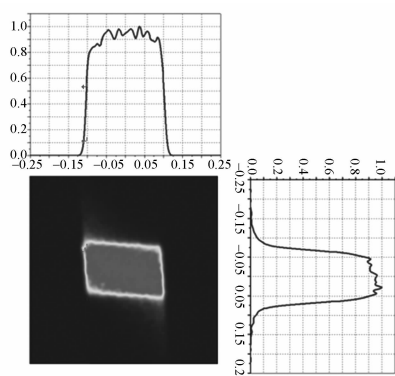
图 6 三片式激光聚焦镜

Fig. 6 Triplet laser focusing lens

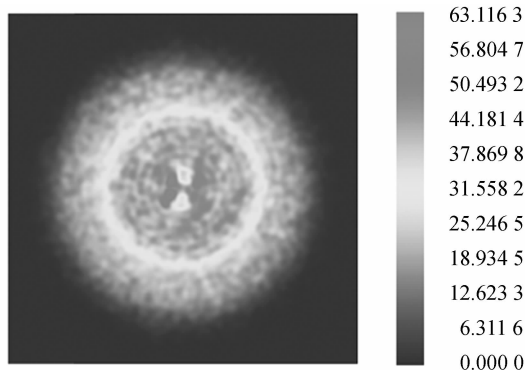
2.3 总体设计结果

综合以上设计思路, 在 Zemax 的 Non-Sequential 模式下对该光纤耦合模块光路进行了模拟, 在该光路图中设定了芯径为 400 μm , $NA=0.22$ 的光纤, 并在光纤光的入射端设置了孔径和光纤芯径相同的光阑来过滤杂散光, 在模拟图中未发现有光线泄露到光纤的覆层中, 说明聚焦后

发散角小于光纤数值孔径。利用该软件的光线追迹功能对光纤入射端和光纤出光的光场进行了分析,如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,在光纤入射端光斑形状为平行四边形,这是由于采用 45° 倾斜柱透镜阵列对半导体激光阵列光束整形后造成一定的光束拖尾;从图 7(b)可以看出光纤出射的激光分布比较均匀,追迹功率可达 595.5 W,耦合效率为 99.3%。



(a) 光纤入射端光强分布
(a) Beam profiles of fiber input



(b) 光纤出射光强分布
(b) Beam profile of fiber output

图 7 光纤入射和出射光强分布

Fig. 7 Beam profiles of fiber input and output

3 实验及结果

根据上述光学设计,进行了相应的光学加工和装配。

首先利用光学调节装置将 BTS 利用紫外胶固化在 DLSBs 的热沉上,得到图 8 所示的光斑照片。可以看出它和图 3(c)的光场分布非常接近。然后将 12 个 DLSBs 固定在铜阶梯底座上,装调

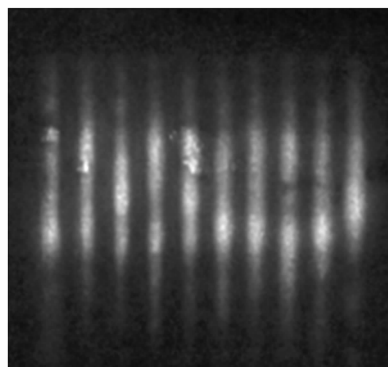


图 8 DLSBs 光束整形后的光斑图

Fig. 8 Photo of laser spot after DLSBs beam shaping

每个子模块的慢轴准直镜和反射镜进行空间合束,在装调时要保证每束光的传播方向相同。空间合束后调节半波片和 PBS,使其高效偏振合束,最后安装聚焦镜。

利用 PRIMES 公司的 FocusMonitor 激光焦点分析仪对聚焦后的光束进行分析。图 9 是焦平面处的激光光强分布图,可以看出和图 7(a)的分布相同,计算得出激光的束腰直径为 324 μm (95% 功率)。

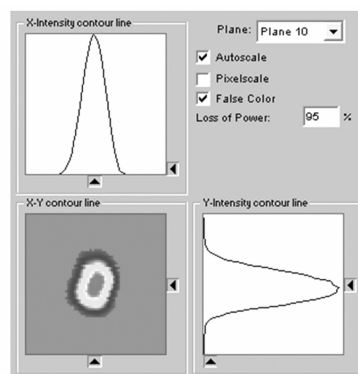


图 9 聚焦后激光束腰的光强分布

Fig. 9 Beam profile of beam waist at focus plane

以聚焦镜的焦平面为中心,在 6 倍瑞利长度上均分为 21 个平面,对每个平面的光斑尺寸进行了分析和计算,并进行了高斯光束的拟合。由于激光在 X 和 Y 轴方向光束质量不同,所以分别对它们进行分析,得到的结果如图 10 所示。测量得出两个方向的光参数积为:

$$\begin{cases} BPP_x' = 21.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \\ BPP_y' = 18.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \end{cases} \quad (10)$$

实验测量结果大于式(5)和(6)的计算结果,这主要是由于装调误差引起的。该设备可测量总的光参数积 21.9 mm · mrad,可高效地耦合到芯径为 400 μm,NA=0.2 的光纤中。

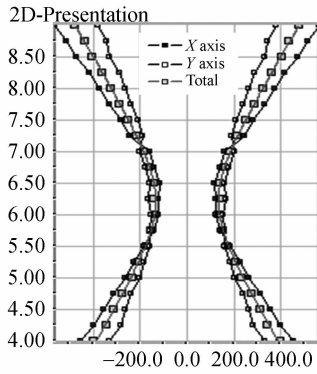


图 10 高斯光束拟合测量光参数积

Fig. 10 Measurement BPP by Gaussian fitting of laser beam

利用光学调整架精密调节光纤位置到耦合效率最高时将其固定,测出光纤的出光功率,并把它和每个步骤的功率相比较。最终绘制出图 11,从该图中可以看出所有 DLSBs 连续出光功率的总和在驱动电流 52.2 A 时为 606.1 W,而在偏振合束后出光功率为 450.3 W,在光纤出光处功率为 418.9 W,此时电光转换效率可达 42.0%。在电流为 30 A 时,电光转换效率最高为 45.4%。

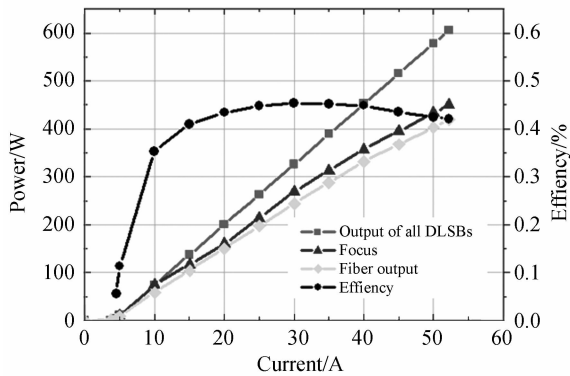
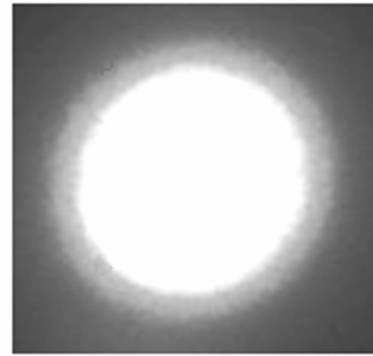


图 11 DLSBs 光纤耦合模块出光功率曲线图

Fig. 11 Experiment result of output power of fiber coupled DLSBs module

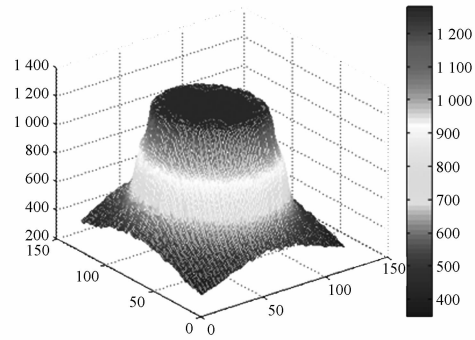
图 12(a)是利用相机拍摄的光纤出光的光斑,利用 Matlab 软件绘制了它的光场分布如图 12(b)。从这两个图可以看出光纤近场为一个平顶分布,适用于激光加工。

为研究该光纤耦合模块的散热性能,测量了它



(a) 光纤出光光斑图

(a) Photo of beam spot output from fiber



(b) 光纤出射光强分布

(b) Intensity distribution output from fiber

图 12 光纤出射激光的分布

Fig. 12 Laser intensity distribution output from fiber

在不同驱动电流下的光谱,如图 13 所示。可以看出,当电流从 20 A 增加到 50 A 时,光纤出光的峰值波长从 969.2 nm 漂移到了 976.0 nm,共漂移了 6.8 nm。

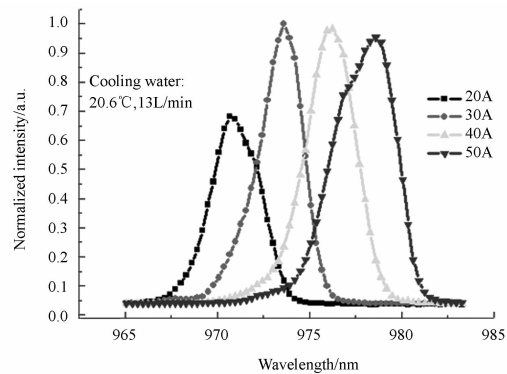


图 13 光纤耦合半导体激光模块的光谱

Fig. 13 Spectrum of fiber coupled diode laser module

在 50 A 时的光谱宽度为 4.12 nm(FWHM),而单个半导体激光短阵列在该驱动电流下的光谱宽度为 3.81 nm(FWHM),表明该模块采用传导冷却结合大通道水冷的方法有很好的散热性能,没有出现因散热不均而导致的光谱明显变宽。

4 结 论

根据几何光学基本原理并利用光学设计软件 Zemax 设计并研制了一套高功率的光纤耦合模块。首先利用 LIMO 公司的 BTS 对每个 DLSBs 进行光束转换,同时用平凸柱透镜压缩慢轴发散角,从而使得快慢轴方向光参数积均衡,两个方向发散角均为 8 mrad;然后将所有经光束整形后的 DLSBs 固定在高热导率的阶梯底座上,并利用反射镜将它们空间合束,利用偏振合束技术来增加模块的功率并保证光参数积不变;最后利用优化的三片式聚焦镜将激光耦合到光纤中。

最终光纤耦合模块连续出光功率为 418.9 W,光纤芯径为 400 μm ,NA=0.22。在工作电流 52.2 A 时,电光转换效率为 42.0%,当驱动电流

为 30 A 时,电光转换效率最大,可达 45.4%。偏振合束后的出光功率是总功率的 74.3%,其原因是空间合束使光功率损耗较多,而这是由阶梯底座高度值太小导致的,以后的研究拟提高台阶高度;而光纤出光功率是偏振合束后的 93.0%,有较高的光纤耦合效率,可见聚焦后的光束质量很好地符合了光纤耦合的要求。测量发现 DLSBs 的出光功率总和随着电流增加呈线性增加,但是偏振合束后和光纤出光功率随着电流增加偏离线性,向下有一定的弯曲,这是因为随着电流的增加,DLSBs 慢轴方向发散角增加,遮拦效应导致空间合束时的效率降低。

对光纤出光的光束形貌研究表明其为平顶分布,有较好的均匀性,说明该模块可用于激光熔覆、硬化等领域。

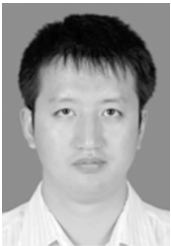
最后研究了光纤出光的光谱,驱动电流从 20 增加到 50 A 时,峰值波长漂移了 6.8 nm,所以有源区温度增加了 22.7 $^{\circ}\text{C}$,在 50 A 时光谱宽度为 4.12 nm(FWHM),而单个半导体激光短阵列在 50 A 时光谱宽度为 3.81 nm(FWHM),可见该模块的散热性能良好,可以可靠地、长寿命的工作。

参考文献:

- [1] 田振华,孙成林,曹军胜,等. 准连续输出大功率半导体激光器的结温测试[J]. 光学 精密工程,2011,19(6): 1243-1249.
TIAN ZH H, SUN CH L, CAO J S, *et al.*. Junction temperature measurement of high power diode lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1243-1249. (in Chinese)
- [2] 李再金,胡黎明,王焯,等. 808 nm 含铝半导体激光器的腔面镀膜[J]. 光学 精密工程,2010,18(6): 1258-1263.
LI Z j, HU L M, WANG Y, *et al.*. Facet coating for 808 nm Al-containing semiconductor laser diodes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1258-1263. (in Chinese)
- [3] 马祥柱,霍晋,曲轶,等. C-mount 封装不同激光器芯片尺寸的热阻分析[J]. 发光学报,2011,32(2): 184-187.
MA X ZH, HUO J, QU Y, *et al.*. Thermal-resistor Analysis of The Laser Chips with Different Size in C-mount Package[J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2011,32(2): 184-187. (in Chinese)
- [4] 王立军,彭航宇,顾媛媛,等. 半导体激光在加工中的应用[J]. 红外与激光工程,2006,35(10): 310-313.
WANG L J, PENG H Y, GU Y Y, *et al.*. Applications of laser diode in processing [J]. *Infrared and Laser Engineering.*, 2006, 35(10): 310-313. (in Chinese)
- [5] 刘玉梅,王立军,刘云,等. 半导体激光器列阵与光纤的连接[J]. 发光学报,1998,19(3): 283-285.
LIU Y M, WANG L J, LIU Y, *et al.*. The connection of semiconductor laser diode array and fiber [J]. *Acta Photonica Sinica.*, 1998, 19(3): 283-285. (in Chinese)
- [6] VIDAL E, QUINTANA I, AZKORBEBEITIA U, *et al.*. Fiber coupling of high-power diode laser stack for direct polycarbonate processing [J]. *SPIE*, 2010,7583: 75830G1-12.
- [7] 王祥鹏,梁雪梅,李再金,等. 880nm 半导体激光器列阵及光纤耦合模块[J]. 光学 精密工程,2010,18(5): 1021-1027.
WANG X P, LIANG X M, LI Z J, *et al.*. 880nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):

- 1021-1027. (in Chinese)
- [8] LIU Y Q, CAO Y H, GAO J, *et al.*. The research of fiber-coupled high power diode laser [J]. *SPIE*, 2011, 8192:81922X1-10.
- [9] 高欣,薄报学,乔忠良,等. 多线阵半导体激光器的单光纤耦合输出[J]. *光子学报*, 2010, 39(7):1229-1234.
GAO X, BO B X, QIAO ZH L, *et al.*. Single fiber coupling of multi-linear-array-diode-lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(7):1229-1234. (in Chinese)
- [10] 朱洪波,刘云,郝明明,等. 高效率半导体激光器光纤耦合模块[J]. *发光学报*, 2011, 32(11):1147-1151.
ZHU H B, LIU Y, HAO M M, *et al.*. High Efficiency Module of Fiber Coupled Diode Laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 32(11):1147-1151. (in Chinese)
- [11] GILLY J, FRIEDMANN P, KISSEL H, *et al.*. Comparison of concepts for high-brightness diode lasers at 976nm [J]. *SPIE*, 2010, 7583:75830S1-10.
- [12] HARALD K, GÜNTHER G, CHRISTIAN L, *et al.*. Scaling brilliance of high power laser diodes [J]. *SPIE*, 2010, 7583:75830T1-8.
- [13] PAUL W, BERND K, KARSTEN R, *et al.*. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180O1-8.
- [14] ISO/DIS-Standard 11 146, International Organization for Standardization.
- [15] FRIEDRICH B, PETER L, REINHART P. *High Power Diode Lasers and Their Applications* [M]. New York: Springer Series in Optical Sciences, 2007,121.

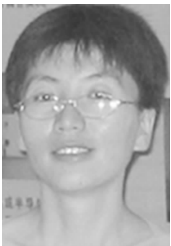
作者简介:



郝明明(1984—),男,内蒙古包头人,博士研究生,2006年于内蒙古大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光阵列的光纤耦合及应用的研究。E-mail: ciomp2007@163.com



刘云(1960—),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,1982年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器封装、散热等方面的研究。E-mail: hs5252@sohu.com



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,1999年于吉林大学获得博士学位,2000年~2002年在中科院长春光机所做博士后,主要从事大功率垂直腔面发射激光器及应用方面的研究。E-mail: qinl@ciomp.ac.cn



张志军(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2008年于哈尔滨师范大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器封装及光纤耦合研究。E-mail: zzhciomp@163.com



朱洪波(1984—),男,吉林长春人,博士,2003年于长春理工大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器光纤耦合的研究。E-mail: zhbciomp@163.com



导师简介:

王立军(1946—),男,吉林省舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn