

## 500 W 光纤耦合半导体激光模块

徐丹, 黄雪松, 姜梦华, 惠勇凌, 雷 旬, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘 要:** 针对半导体激光器在工业领域的应用和光纤耦合可以实现柔性传输的特点, 设计了光纤耦合半导体激光模块。采用光束整形技术、空间合束、偏振合束和光纤耦合等技术, 将两组共 10 个整形后的半导体标准阵列进行合束, 扩束后耦合入芯径 400  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的镀增透膜光纤。在工作电流 70 A 时, 光纤耦合前功率为 545 W, 光纤耦合后功率为 518 W, 光纤耦合效率高于 95%, 得到很高的光纤耦合效率, 电光转换效率为 43%, 为下一步千瓦级光纤耦合半导体激光器的制备奠定了基础。

**关键词:** 光纤耦合; 半导体激光器; 高耦合效率; 光束整形; 偏振合束

中图分类号: TN248.4; TN243 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0606003

## 500 W fiber-coupled semiconductor laser module

Xu Dan, Huang Xuesong, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The semiconductor laser is widely used in industrial fields, and fiber coupling enables flexible transmission. Accordingly, a 500 W high-efficiency fiber-coupled module was designed. The technologies of beam shaping, spatial multiplexing, polarization multiplexing and fiber coupling were used to couple ten bars into a laser beam. Ten bars were collimated by fast axis collimation lens. Then the beams were transformed, and collimated by slow axis collimation optics. And then the beam were combined. All the beam were focused into a multimode fiber (400  $\mu\text{m}$  core diameter,  $NA=0.22$ ) after expanding. Experimental results show that the laser output from the module can reach to 545 W in the current of 70 A, corresponding the laser output from fiber could reach to 518 W. High coupling efficiency as 95% was obtained, electro-optic conversion efficiency is 43%, which makes a foundation for kilowatt fiber-coupling semiconductor laser.

**Key words:** fiber-coupled; semiconductor laser; high coupling-efficiency; beam shaping; polarization multiplexing

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-08

基金项目: 北京市科技计划(Z131110000613063)

作者简介: 徐丹(1989-), 女, 硕士生, 主要从事大功率半导体激光器光纤耦合方面的研究。Email: llm8984@163.com

导师简介: 李强(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。Email: ncltlq@bjut.edu.cn

## 0 引言

在激光加工应用中,激光器的电光转换效率高、单位能耗低,可降低加工成本,半导体激光器可以满足这方面的要求<sup>[1]</sup>。光纤耦合半导体激光器具有很多优点,光纤耦合可以实现激光的柔性传输,利用光纤的均化作用可以将半导体激光转化为圆形均匀分布的光场<sup>[2]</sup>。但由于半导体激光器自身结构原因导致光场分布不均匀、光束质量差、功率密度低等原因,限制了半导体激光器的应用。

近年来,针对线阵半导体激光器光纤耦合的研究有了很大的发展,德国 Dilas 采用 28 个激光器线阵,实现了芯径 200  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤的 775 W 功率单波长激光输出<sup>[3]</sup>。德国 Trumf 采用低填充因子的激光器线阵,制成芯径 100  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.12 的光纤的 100 W 线阵合束模块,然后以 19 个模块经过光纤捆绑方式实现空间合束,再通过波长合束方式实现芯径 600  $\mu\text{m}$  数值孔径 0.12 的光纤的 3 000 W 连续功率输出<sup>[4]</sup>。国内的研究机构也有相应的研究,长春理工大学对 6 个阵列进行光束整形、空间合束,耦合进芯径 400  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤,获得功率 195 W、光纤耦合效率 65% 的激光输出<sup>[5]</sup>;长春光机所将 20 个阵列进行光束整形,再通过空间复用技术、偏振复用技术和波长合束进行合束,最终耦合入芯径 600  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤,出光功率为 907 W<sup>[6]</sup>。国内的研究机构较国外研究机构有一定的差距,耦合入 400  $\mu\text{m}$  芯径光纤的输出功率较低,限制了应用。

文中采用标准阵列,通过光束整形改善阵列的光束质量,通过空间合束和偏振合束技术,获得功率 545 W,水平、竖直两方向光束参数积分别为 29.2  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、28.1  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$  的偏振合束模块;将合束后的激光扩束,耦合入芯径 400  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤,光纤端面镀增透膜,获得光纤耦合半导体激光模块,其输出功率 518 W,光纤耦合效率 95%。

## 1 设计

### 1.1 整体方案

半导体光纤耦合方案示意图如图 1 所示,主要由 4 部分构成:光束整形、空间合束、偏振合束、光纤耦合。文中采用微光学元件光束旋转镜(FBT)进行光束

整形,提高光束质量,即先进行快轴准直,然后再对单个发光单元进行旋转。整形后的半导体阵列通过空间合束后,将 5 个光束在竖直方向进行空间叠加,获得近似方形的光场近场分布,作为一个模块。将两个空间合束后的模块经过偏振合束、扩束、聚焦耦合入芯径 400  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤,如图 1 所示。

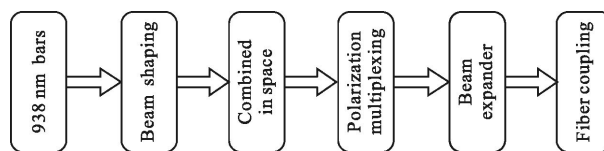
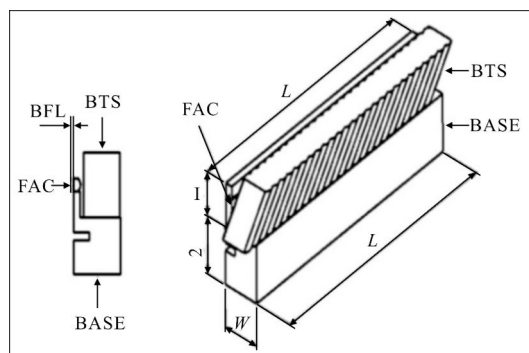


图 1 半导体模块光纤耦合方案示意图

Fig.1 Technical block diagram of the fiber coupled diode laser module

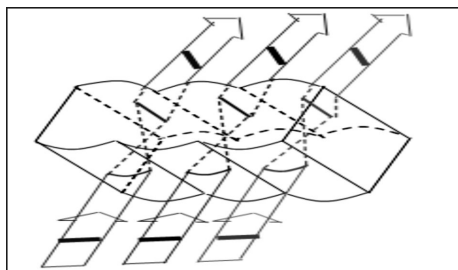
### 1.2 光束整形

由于单个发光单元的光束质量好,半导体激光阵列的光束质量差,利用单个发光单元的光束质量好这一特点,采用 FBT 对每个半导体阵列进行光束整形,将快轴准直后的光束旋转,如图 2 所示。为



(a) FBT 的结构图

(a) Structure of FBT



(b) 光束旋转示意图

(b) Process of rotating beams. FAC: fast axis collimating lens

图 2 FBT 结构图及光束旋转示意图

Fig.2 Structure of FBT and process of rotating beams

描述 FBT 光束整形后光束质量的变化,采用光束参数积(Beam Parameter Product,BPP)<sup>[7]</sup>来评价光束质量,光束参数积定义为光束束腰直径  $\omega$  与光束发散角全角  $\theta$  的乘积的 1/4,即:

$$BPP = \frac{1}{4} \omega \theta \quad (1)$$

根据公式(1)可以计算整形前后半导体阵列光束质量的变化,计算结果如表1所示。

表 1 光束质量对比

Tab.1 Comparison chart of beam shaping

	Before beam shaping	After beam shaping
BPP of horizontal direction/mm·mrad	262	20
BPP of vertical direction/mm·mrad	0.6	2.62

从表 1 可以看出:整形对阵列两方向的光束质量进行了均化,水平方向由 262 mm·mrad 变换为 20 mm·mrad,大大提高了水平方向的光束质量;竖直方向由 0.6 mm·mrad 变换为 2.62 mm·mrad,竖直方向的光束质量退化。

### 1.3 空间合束

根据整形结果,竖直方向的光束质量比水平方向的光束质量好 7 倍,为光纤耦合使两方向的光束质量均衡,采用空间合束在竖直方向上叠加,既提高合束功率,又均衡两方向光束质量。

由于阵列经准直后在一定范围内竖直方向的光宽接近 2 mm,所以在相邻两个阵列之间的高度差设计为 2 mm,若叠加 5 个阵列,此时阵列竖直方向宽度  $\omega_5$  为 10 mm,叠加后空间合束模块竖直方向的光束参数积  $BPP_{\perp 5}$  为:

$$BPP_{\perp 5} = \frac{1}{4} \omega_5 \theta_{\text{slow}} = \frac{1}{4} \times 10 \times 104.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad} = 26.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (2)$$

空间合束模块水平方向的光束参数积和阵列水平方向的光束参数积一致,仍为 20 mm·mrad,叠加 5 个线阵后两方向的光束质量相差不大。

空间合束方案如图 3 所示,将阶梯排布的 5 个阵列的光水平方向上对齐,竖直方向上排列,棱镜的放置刚好使得不挡上一层的光,也全部反射本层的光。考虑到每一个阵列的束腰位置不同会影响最终聚焦光斑的大小,需要先测量出每一个阵列的束腰位置,

将束腰位置较远的放置在图 3 所示的模块的左侧,束腰位置较近的放置在图 3 所示的模块的右侧,以减小由于束腰位置不同对聚焦光斑的大小的影响。

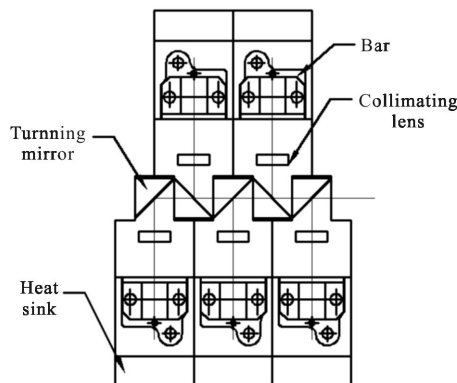


图 3 空间合束方案图

Fig.3 Diagram of beams combined in space

### 1.4 偏振合束

偏振合束是将两个偏振方向相互垂直的光束通过偏振耦合元件,耦合到同一个光路中,如图 4 所示。两个相同偏振方向半导体激光模块进行偏振合束时,需要将其中的一束光通过半波片将偏振方向旋转 90°,使两个激光模块的偏振方向相互垂直,p 光透射,s 光反射,满足偏振合束的要求<sup>[8]</sup>。

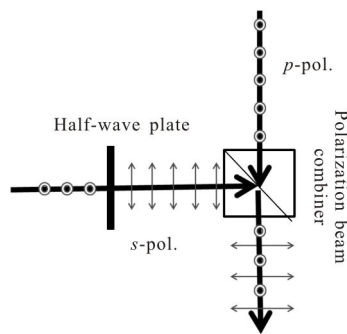


图 4 半导体激光器的偏振合束

Fig.4 Polarization beam combining

实现偏振合束的光学器件主要有两类:双折射晶体偏振合束器和介质膜偏振合束器。考虑到带宽和损伤阈值,采用介质膜偏振合束片。当半导体激光光束以 45°角入射到多层膜系上时,p 偏振光束的透射率 100%,s 偏振光束的反射率超过 95%,这样就可以使两束光分别透射和反射,实现偏振合束。

### 1.5 扩束镜和聚焦镜

要实现高效率光纤耦合必须满足两个条件<sup>[12]</sup>:一

是光斑的最大直径小于光纤芯径;二是光束的发散角小于光纤的数值孔径对应的角度。对于半导体激光阵列,高效率光纤耦合的条件为快慢轴的光束参数积都要小于光纤的光束参数积。对于芯径 $400\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤,满足耦合进光纤的条件是:水平方向和竖直方向的光束参数积最大为  $31.1\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。

在进行光纤耦合时,采用扩束后聚焦的结构。在光束聚焦之前,利用扩束镜进一步减少合束光束两个方向的发散角差异,采用非球面镜作为光纤耦合聚焦镜,减小聚焦光束的有效弥散斑,提高聚焦质量。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 系统组装

利用六维精密位移台调节和安装元件、组装系统,空间合束结构如图 3 所示。首先将每一个标准阵列(938 nm)安装 FBT 对其进行整形,再通过测量每一个阵列的束腰位置决定阵列的先后位置。将不在同一水平面上的 5 个阵列通过准直和转折后在竖直方向上进行排列,使得 5 个阵列的指向性一致,这样构成一个模块,同样的方式组装成两个模块,每个模块都满足耦合进芯径  $400\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤的条件。

根据图 5 所示的偏振合束结构,利用六维精密位移台调节和安装元件。其中一个模块的光经过半波片后经偏振合束镜反射,另一个模块的光通过一对反射镜的调节,再经过偏振合束片透射与另一束光重合。然后通过一对镜子进行扩束,经过非球面聚焦镜聚焦到芯径  $400\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤。

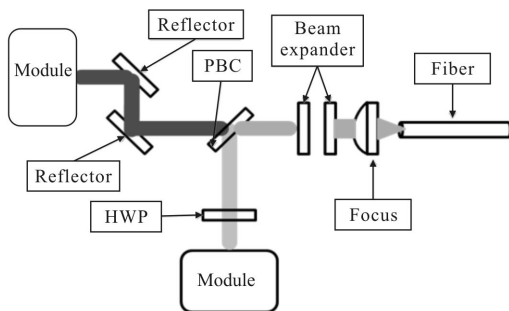


图 5 光学原理图

Fig.5 Optical schematics

为避免由于两个模块偏振合束后由于束腰位置的不同引起的光束质量的退化,根据两个模块的束

腰位置来放置模块,使得束腰位置到偏振合束镜的位置相同。为尽量减小偏振合束引起的光束质量的退化,两个模块出射的光斑在近处和远处都要重合,即指向性要一致。图 6 所示是偏振合束后经过扩束的光场的图片,可以看出两个模块的光经偏振合束片后很好地重合在一起。

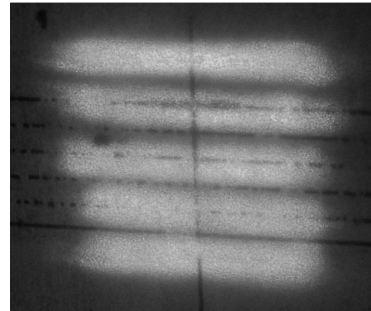


图 6 偏振合束后的光场图

Fig.6 Laser spots of polarization multiplexing

### 2.2 光束质量及光纤耦合效率的测量

偏振合束后的光斑经透镜聚焦后,利用刀口法及双曲线拟合的方法测量光束质量,测量电流为 70 A,采用 96 % 的功率,测量得出偏振合束模块水平方向光束参数积为  $29.2\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,偏振合束模块竖直方向光束参数积为  $28.1\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,都小于耦合进芯径  $400\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 光纤的最大光束参数积  $31.1\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,满足耦合进  $400\ \mu\text{m}$  光纤的条件。

同样采用刀口法,在相同条件下测量两个空间合束模块的光束质量,与偏振合束后的光束质量进行对比列表如表 2 所示。

表 2 偏振合束前后光束质量对比

Tab.2 Quality comparison before and after polarization multiplexing

	Module 1	Module 2	After polarization multiplexing
BPP of horizontal direction/mm·mrad	28.2	28.2	29.2
BPP of vertical direction/mm·mrad	27	28.1	28.1

根据之前对光束质量的理论计算,空间合束模块水平、竖直方向的光束参数积分别为  $20\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $26.2\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ ;实际测量值比理论值略有增大,原因主要如下:首先每一个阵列都具有差异性,水平、竖

直两方向的光束质量都会不同，所组成的模块两方向的光束质量也会出现差异。其次，空间合束后由于指向性的差异等因素，引起模块光束质量的退化。

由于偏振合束片工艺的原因，偏振合束片有一定功率的损耗，根据图 7 所示，在波段 930~945 nm 时，有最低的损耗，当波长越接近最佳位置时，损耗的功率越低。对于半导体阵列，电流的升高和热沉的温度都对波长有影响，把热沉的温度设为 25℃、电流设为 70 A，此时的损耗率达到最低 2.8%，损耗的功率为 15.8 W，如图 8 所示。

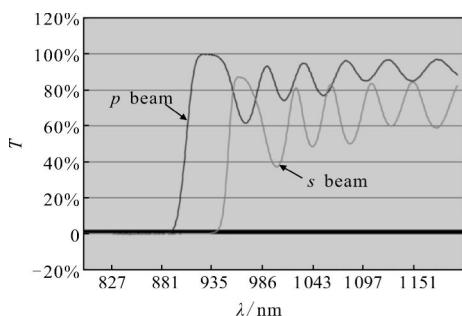


图 7 偏振合束镜的透过率和反射率曲线图

Fig.7 Transmission and reflection curves of polarization beam combiner

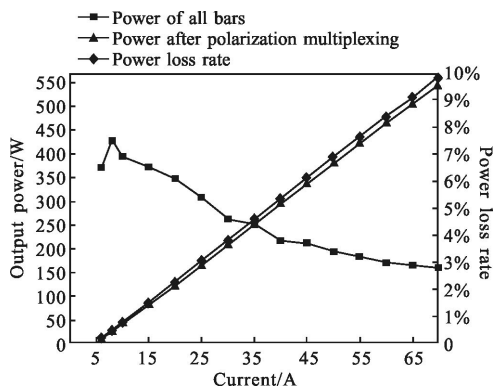


图 8 模块偏振合束功率损耗

Fig.8 Power loss after polarization multiplexing

采用焦距分别为 100 mm 和 125 mm 的透镜对偏振合束后的激光进行扩束，减小了光束的发散角，更有利于耦合入光纤。扩束后采用非球面聚焦，利用精密位移台调节光纤到激光束腰的位置，测出光纤的出光功率并与未耦合入光纤前的功率进行比较，得出图 9 所示的曲线图。光纤的芯径为 400 μm，数值孔径为 0.22，端面镀增透膜。在工作电流 70 A 时，耦合前功率为 545 W，耦合后功率为 518 W，光纤耦

合效率为 95%。

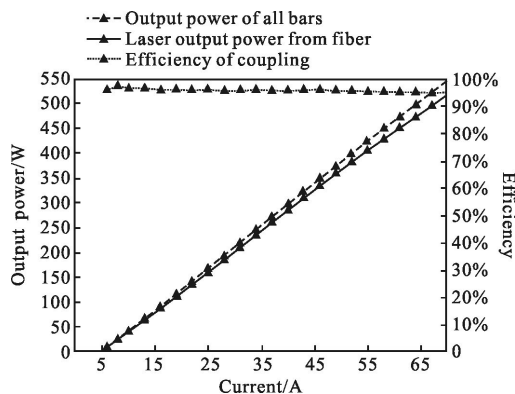


图 9 光纤耦合模块的激光功率输出特性

Fig.9 Power output from the fiber coupled module

### 3 结 论

文中研制了高效率高功率的光纤耦合模块，将 10 个标准阵列通过光束整形改善光束质量，通过空间合束提高功率，利用偏振合束提高功率密度，且没有引起光束质量的退化。扩束后利用单片非球面透镜将激光聚焦到芯径 400 μm、数值孔径 0.22 的镀膜光纤。最终的光纤耦合模块在工作电流 75 A 时，光纤出光功率为 518 W，光纤耦合效率为 95%，为进一步研制出千瓦级光纤耦合半导体激光光源奠定了基础。

### 参考文献：

- [1] 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[C]//SPIE, 2012, 8241: 8241102.
- [2] Gapontsev V, Moshegov N, Trubenko P, et al. High-brightness 9XX nm pumps with wavelength stabilization[C]// SPIE, 2010, 7853: 78531X.
- [3] Wolf P, Kohler B, Rotter K, et al. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device [C]//SPIE, 2011, 7918(1): 791800.
- [4] Stephan Strohmaier, Christoph Tillkorn, Peter Olschowsky. et al. High-power, high-brightness direct-diode lasers [J]. *OPN Opt Photon News*, 2010, 21(10): 25-29.
- [5] Gao Xin, Bo Baoxue, Qiao Zhongliang, et al. Single fiber coupling of multi-linear-diode-lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(7): 1229-1234. (in Chinese)  
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.

- [6] Zhang Jun, Peng Hangyu, Liu Yun, et al. Fiber-coupled diode laser flexible processing source for metal sheet welding [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(12): 1335–1341. (in Chinese)  
张俊, 彭航宇, 刘云, 等. 适用于金属薄板焊接的柔性光纤耦合半导体激光加工光源 [J]. 发光学报, 2012, 33(12): 1335–1341.
- [7] 左铁钊. 制造用激光光束质量、传输质量与聚焦质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 7–23.
- [8] Karlsen Scott R, Price R Kirk, Reynold Mitch, et al. 100-W, 105- $\mu\text{m}$ , 0.15NA Fiber Coupled Laser Diode Module [C]// SPIE, 2009, 7198: T-1-71980T-8.