

## 高亮度半导体激光器泵浦光纤耦合模块

胡黎明<sup>1</sup>, 朱洪波<sup>2</sup>, 王立军<sup>2</sup>

(1. 中国航天科工集团第九总体设计部, 湖北 武汉 430040;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 采用一种阶梯排列结构的单管激光器合束技术制成了高亮度半导体激光器光纤耦合模块, 可用于泵浦掺 Yb<sup>3+</sup>大模场双包层光纤激光器。利用微透镜组对各单管半导体激光器进行快慢轴准直, 在快轴方向实现光束叠加, 然后通过两组消球差设计的柱面透镜组分别对合成光束快慢轴方向进行聚焦, 耦合进入光纤。实验中将 6 只输出功率为 6 W 的 976 nm 单管半导体激光器输出光束耦合进芯径为 105 μm、数值孔径为 0.15 的光纤中, 当工作电流为 6.2 A 时, 光纤输出功率达 29.0 W, 光纤耦合效率达到 80.1%, 亮度超过 4.74 MW/cm<sup>2</sup>-str。

**关键词:** 光纤激光器泵浦源; 光纤耦合模块; 高亮度; 半导体激光器

**中图分类号:** TN248.4; TN245 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0361-05

## High-brightness pumping module of fiber coupled diode laser

Hu Liming<sup>1</sup>, Zhu Hongbo<sup>2</sup>, Wang Lijun<sup>2</sup>

(1. Ninth Overall Design Departments of China Aerospace Science and Industry Group, Wuhan 430040, China;

2. Key Laboratory of Excited State Physics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The development of a high brightness fiber coupled laser diode module for pumping Ytterbium-doped large-core double cladding fiber lasers was reported. This module was based on high power broad area single emitters which were free space combined in a step arrange manner. The fast axis and slow axis of each diode laser were collimated by micro-lens, and the output beam of diode lasers was combined in the fast axis direction. Then the combined beam was focused using two groups of cylinder lens in the fast and slow axis direction respectively in order to eliminate the spherical aberration. Finally, the combined beam was coupled into an optical fiber. In this experiment, six 976 nm LDs with power of 6 Watts per diode were coupled in a 105 μm, 0.15 NA optical fiber. The output power of the fiber coupled module was 29.0 W at operating current of 6.2 A. The coupling efficiency reached 80.1%, and the brightness exceeded 4.74 MW/cm<sup>2</sup>-str.

**Key words:** fiber laser pump; fiber coupled module; high brightness; diode laser

收稿日期: 2012-06-17; 修订日期: 2012-07-15

基金项目: 吉林省科技厅重大项目(10ZDGG001)

作者简介: 胡黎明(1984-), 男, 博士, 主要从事高功率激光技术方面的研究。Email: henryhulm2003@163.com

## 0 引言

光纤激光器因其具有输出功率高、光束质量好、体积小、散热简单等特点而广泛应用于工业加工和国防军事领域,成为国内外激光技术研究热点。随着光纤激光器输出功率的不断提升,对高亮度半导体泵浦光纤耦合模块的需求也越来越迫切。半导体泵浦模块的亮度越高,就能够有效地将更多数量的泵浦光耦合进双包层光纤中,在减少光纤激光器非线性效益的前提下提升输出功率,满足实际需求<sup>[1]</sup>。

传统的半导体激光器光纤耦合模块主要有两种类型,一种是基于阵列的光纤耦合模块,另一种是基于单管的光纤耦合模块。半导体激光阵列光纤耦合模块由于快慢轴方向的光束质量不对称,需要复杂、昂贵的光学系统进行光束整形,增大激光功率损失,加上半导体激光阵列各发光单元之间的热串联以及“smile”效应,将导致光纤耦合效率和激光亮度的降低。单管激光器光纤耦合模块不受热串联和“smile”效应影响,可以在高功率密度条件下工作,且不需要复杂的光束整形装置,光纤耦合效率高、寿命长<sup>[1-3]</sup>。然而,传统的单管激光器光纤耦合模块只将单个激光器输出光束耦合进多模光纤中,激光功率有限并且在快轴方向的光束填充因子很低,导致光纤耦合模块亮度的整体下降。虽然可以采用锥形光纤合束器耦合的方式来实现功率的提升,但由于散射损耗以及光纤间的空隙将使得激光亮度降低、光束质量变差、泵浦效率下降<sup>[4]</sup>。

单管合束技术是利用光学折反射原理将多只单管半导体激光器发出的光束进行空间合束,根据光束质量不变原理对快慢轴光斑和发散角进行处理,最后聚焦耦合进一根光纤。这种方法具有很高的耦合效率,可以极大地提高光纤耦合模块的亮度。目前国内单管半导体激光器合束技术还不成熟,长春理工大学采用二级反射镜法进行单波长光纤耦合,200  $\mu\text{m}$  光纤输出功率达 12.4 W,效率达 74%<sup>[5]</sup>。国外单管半导体激光器合束的输出功率达到几十瓦,最大输出功率可以达百余瓦。例如,德国 JENOPTIK 公司采用慢轴整体准直法实现 105  $\mu\text{m}$  光纤输出 65 W 的光纤耦合模块,波长为 976 nm,亮度可以达到 9  $\text{MW}/\text{cm}^2\text{-str}$ <sup>[6]</sup>;德国弗朗和菲研究所采用锥形单管半

导体激光器制成光纤耦合模块,50  $\mu\text{m}$  光纤输出功率达 50 W,波长为 975 nm,亮度达 16.8  $\text{MW}/\text{cm}^2\text{-str}$ <sup>[7]</sup>。

文中将 6 只连续输出 5 W 的 976 nm 单管半导体激光器耦合进芯径为 105  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.15 的光纤,在 6.2 A 驱动电流下,模块光纤输出功率达 29.0 W,光纤耦合效率达 80.1%,亮度达 4.74  $\text{MW}/\text{cm}^2\text{-str}$ ,适用于泵浦掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器,实现高功率输出。

## 1 基本原理

在半导体激光器光纤耦合中,通常使用光参数积(BPP)<sup>[8]</sup>这个概念来评价光束质量,定义为:

$$\text{BPP} = d_0 / 2\theta_0 \quad (1)$$

式中: $d_0$  为光斑束腰直径; $\theta_0$  为远场发散半角。为了提高泵浦效率、提高光纤激光器输出功率,要求半导体激光器光纤耦合模块不仅要有很高的功率,而且还要具有很高的亮度。为了获得更高的亮度,所选取的光纤芯径为 105  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.15,即  $d_f = 105 \mu\text{m}$ , $\theta_f = 0.15$ ,则耦合光纤的 BPP 为:

$$\text{BPP}_F = d_f / 2\theta_f = 7.875 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (2)$$

由于半导体激光合束后的光斑和远场分布都呈矩形,而光纤的芯径和发散角均为轴对称分布,所以聚焦后半导体激光束的快慢轴 BPP 需满足以下条件<sup>[1,9]</sup>:

$$\text{BPP}_{\text{FA,SA}} = \frac{d_f/2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\theta_f}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

式中: $\text{BPP}_{\text{FA}}$  和  $\text{BPP}_{\text{SA}}$  分别为快慢轴光参数积。公式(3)给出了光纤耦合最佳耦合效率的边界条件,可以看出,如果想让多单管激光器输出光束通过空间合束后的光束能够高效耦合进纤芯 105  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.15 的光纤,合束聚焦后的光束快慢轴的 BPP 必须小于 3.94  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

文中在半导体激光光纤耦合模块的设计中采用一种阶梯排列结构进行单管合束,将 6 个 980 nm 单管半导体激光器安装固定在一个阶梯型的热沉上,使它们发出的光束在快轴叠加进行合束,其原理如图 1 所示(图 1(a)为侧视图,图 1(b)为俯视图)。其中,在光束聚焦设计中为了消除球差,利用正负柱面透镜组分别对快慢轴两个方向进行聚焦耦合。这种方法结构简单,所用光学元件少,调试方便,有利于获

得高的耦合效率。

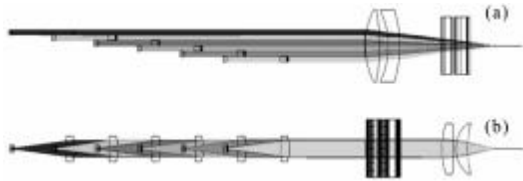


图 1 单管合束原理图

Fig.1 Scheme of beam combination of multi emitters

单管激光器在快慢轴方向的发光尺寸分别为  $1.5\ \mu\text{m}$  和  $100\ \mu\text{m}$ , 相应的发散角为  $54^\circ \times 10^\circ$  (95%能量)。为了有效地实现单管激光器输出光束在快轴方向叠加, 用等效焦距  $\text{EFL}_{\text{FAC}}=0.85\ \text{mm}$ 、圆锥常数  $cc=-0.8$  非球面快轴准直镜(FAC)对各单管激光器的快轴方向发散角进行压缩, 采用等效焦距  $\text{EFL}_{\text{SAC}}=20\ \text{mm}$  的慢轴准直镜(SAC)对各单管激光器的慢轴发散角进行压缩, 相邻各单管激光器之间的垂直高度差为  $1.5\ \text{mm}$ 。

利用软件模拟得到准直后的光束发散角如图 2 所示, 快慢轴发散角分别为  $0.9\ \text{mrad} \times 4.4\ \text{mrad}$  (95%能量), 考虑到在 FAC 和 SAC 的装调时会产生指向性误差, 通常分别控制在  $\pm 0.5\ \text{mrad}$  和  $\pm 0.2\ \text{mrad}$  范围内<sup>[1]</sup>, 则准直完后合成光束的快慢轴发散角分别为  $1.9\ \text{mrad} \times 4.8\ \text{mrad}$  (95%能量)。准直叠加后光束快慢轴尺寸为  $8.2\ \text{mm} \times 2.6\ \text{mm}$ , 则快慢轴的光束质量为  $3.85\ \text{mm} \cdot \text{mrad} \times 3.12\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 满足小于  $3.94\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$  的条件。

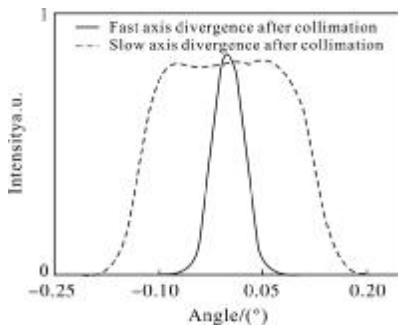


图 2 准直后合成光束远场发散角

Fig.2 Divergence angle of combined beam after collimation

聚焦后的远场功率密度分布如图 3 所示, 聚焦光斑呈矩形, 快慢轴方向的光斑尺寸为  $40\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ , 都小于  $74.25\ \mu\text{m}$  (光纤纤芯的  $1/\sqrt{2}$ )。经过耦合镜

聚焦后快慢轴方向发散角变为  $11.8^\circ \times 11.1^\circ$ , 如图 4 所示, 都小于  $12.16^\circ$  (光纤发散全角的  $1/\sqrt{2}$ )。由此可见, 6 只单管半导体激光器采用空间耦合方式可以高效率地耦合进纤芯为  $105\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.15 的光纤。

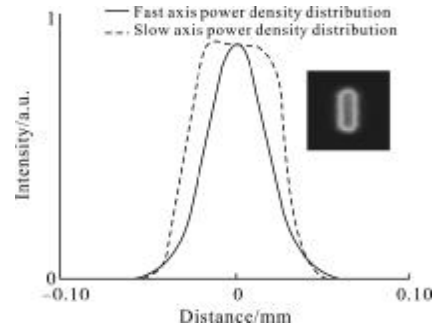


图 3 聚焦光斑远场分布图

Fig.3 Power density distribution of focused spot

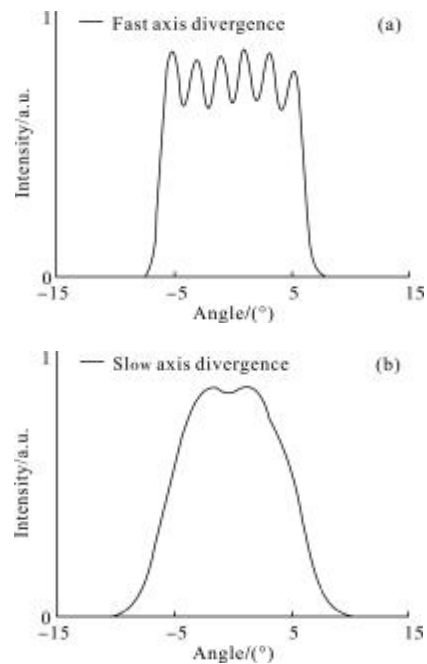


图 4 聚焦光束远场发散角

Fig.4 Divergence angle of focusing beam

## 2 实验结果

实验中所用的  $976\ \text{nm}$  单管半导体激光器的阈值电流为  $0.5\ \text{A}$ , 在注入电流为  $6.2\ \text{A}$  时, 激光输出功率为  $6.0\ \text{W}$ , 斜率效率约为  $1.06\ \text{W/A}$ , 电光转换效率达 50%。经精密装调将 6 只单管激光器安置在阶梯热沉上, 分别采用快慢轴准直镜进行光束准直后实现

空间耦合,由芯径为  $105\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.15 的光纤输出。同时,为了消除光纤端面的菲涅尔反射,在光纤端面镀有透射率大于 99% 的增透膜。单管激光器之间串联连接,在室温下选取不同工作电流测得光纤模块输出功率,根据测试数据与激光器原始功率的比较得到模块的 P-I 特性曲线和耦合效率,如图 5 所示。

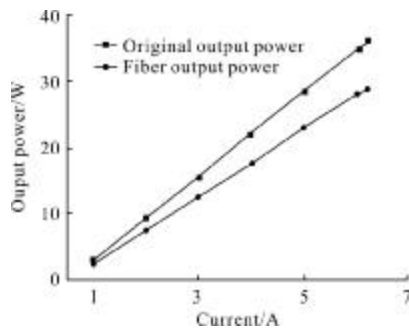


图5 光纤模块 P-I 曲线

Fig.5 P-I curves of fiber coupled module

可以看出,当驱动电流为 6.2 A 时,光纤耦合前 6 只单管激光器总功率为 36.2 W,模块的光纤输出功率达 29.0 W,光纤耦合效率达 80.1%。同时,在驱动电流 6.2 A 时测得模块的光谱特性曲线,如图 6 所示。可以看出,激光中心波长为 977.4 nm,半高波长宽度为 2.8 nm。

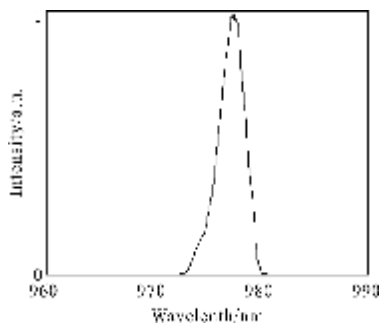


图6 光纤模块光谱曲线

Fig.6 Spectrum curve of fiber coupled module

利用 Matlab 处理激光束,经聚焦耦合镜组汇聚后在束腰位置的光斑轮廓以及光纤耦合输出光斑光强分布分别如图 7 和图 8 所示。可以看出,在入纤位置处的聚焦光斑呈平顶分布,通过光纤传输匀化后,光强分布发生变化,由平顶分布变成高斯分布,光强分布更均匀。

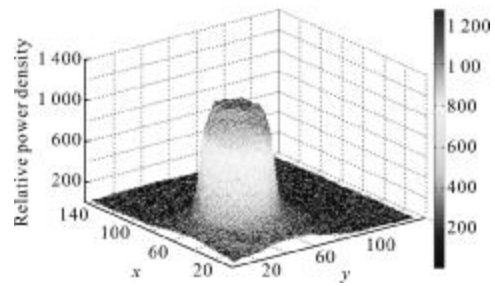


图7 聚焦后获得的光斑轮廓图

Fig.7 Profile of spot size after focusing

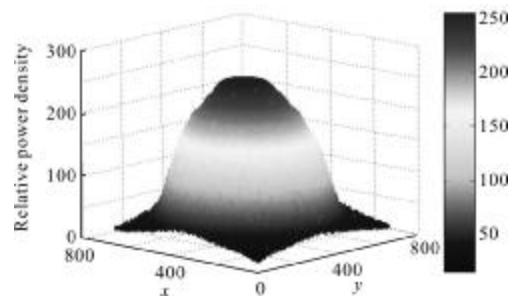


图8 光纤输出后获得的光斑轮廓图

Fig.8 Profile of spot size after fiber output

对于泵浦激光源,激光亮度是一个非常重要的参数,其表达式如下<sup>[8,10]</sup>:

$$B = \frac{P}{\pi^2 BPP^2} \quad (4)$$

式中:  $B$  为亮度;  $P$  为输出功率;  $BPP$  为光参积。对于实验中的光纤耦合模块,光纤纤芯为  $105\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.15,当光纤耦合连续输出达 29.0 W 时,模块亮度可以达到  $4.74\ \text{MW}/\text{cm}^2\text{-str}$ 。相对于常用的 JDSU 公司的 10 W 单管光纤耦合模块 ( $105\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.15),激光亮度增大了近 3 倍,有效提升了泵浦效率,提高了光纤激光器的输出功率。

### 3 结 论

文中通过采用一种阶梯排列结构进行单管合束,实现了 6 只串联连接的单管激光器输出光束耦合进纤芯  $105\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.15 的光纤输出,在 6.2 A 工作电流驱动下,光纤耦合模块连续输出功率达 29.0 W,效率达 80.1%,亮度达到  $4.74\ \text{MW}/\text{cm}^2\text{-str}$ 。文中的光纤耦合模块亮度较目前常用的泵浦模块亮度增大近 3 倍,能够满足大功率光纤激光器泵浦需求。

后期一方面将针对文中单管合束方法中光束准

直叠加后快慢轴发散角不相等的不足进行优化设计,使聚焦后在光纤端面光斑呈方形,从而提升光纤耦合效率;另一方面将提升单管激光器合束路数,以便在单管激光器功率获得提高后增大光纤耦合模块的输出功率,进一步提升模块亮度。

#### 参考文献:

- [1] Karlsen S R, Price R K, Reynolds M, et al. 100 W, 105  $\mu\text{m}$ , 0.15 NA fiber coupled laser diode module [C]//SPIE, 2009, 7198: 71980T-1-71980T-8.
- [2] Wang X P, Li Z J, Liu Y, et al. Smile effect and package technique for diode laser arrays [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 552-557. (in Chinese)  
王祥鹏, 李再金, 刘云, 等. 半导体激光器阵列的 smile 效应与封装技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 552-557.
- [3] Häusler K, Zeimer U, Sumpf B, et al. Reliability of diode lasers for space applications [C]//SPIE, 2009, 7198: 719816-1-719816-12.
- [4] Wessling C, Hengesbach S, Geiger J, et al. 50 W passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm for pumping fiber lasers using 100  $\mu\text{m}$  fiber bundles [C]//SPIE, 2008, 6876: 687614-1-687614-11.
- [5] Liu Guojun, Bo Baoxue, Ma Xiaohui, et al. Study on high power semiconductor laser arrays and output beam shaping [C]//SPIE, 2009, 7382: 738207-1-738207-11. (in Chinese)
- [6] Schröder D, Werner E, Franke A, et al. Roadmap to low cost, high brightness diode laser power out of the fiber[C]//SPIE, 2010, 7583: 758309-1-7.
- [7] Gerd Kochem, Martin Traub, Stefan Hengesbach, et al. High power fiber coupled modules based on tapered diode-lasers at 975 nm[C]//SPIE, 2009, 7198: 71980R-1-71980R-11.
- [8] Zuo Tiechuan. Beam Quality, Transmission Quality and Focus Quality of Manufacturing Laser Beam [M]. Beijing: Science Press, 2008: 13-15. (in Chinese)  
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: 13-15.
- [9] Marcel Werner, Christian Wessling, Stefan Hengesbach, et al. 100 W/100  $\mu\text{m}$  passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100  $\mu\text{m}$  single emitters[C]//SPIE, 2009, 7198: 71980P-1-71980P-7.
- [10] Gu Yuanyuan, Peng Hangyu, Wang Xiangpeng, et al. High power and high brightness diode laser device [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 481-484. (in Chinese)  
顾媛媛, 彭航宇, 王祥鹏, 等. 高功率高亮度半导体激光器器件[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 481-484.

#### 下期预览

## 自适应连续多级分区与初始阈值估计的快速模板匹配方法

汪鲁才<sup>1</sup>, 易锡年<sup>1,3</sup>, 陈小天<sup>2</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>

(1. 湖南师范大学工学院, 湖南长沙 410081; 2. 国防科学技术大学 ATR 国防重点实验室, 湖南长沙 410081; 3. 湖南英孚瑞德信息技术有限公司, 湖南长沙 410081)

**摘要:** 归一化互相关测度在光照改变时,比采用绝对差之和测度(SAD)要稳定,但是归一化互相关测度的缺陷在于它的计算量非常大。为此,提出了一种结合自适应连续多级分区和初始阈值估计的基于归一化互相关(NCC)的快速模板匹配算法。根据模板图像中不同模块的梯度值,将模板图像进行逐级分区,通过分区顺序将互相关之和分为不同的层,得到各层互相关的上界,运用柯西-施瓦兹不等式得到上界间的关系,形成自适应连续多级分区淘汰方法。同时,为了加快匹配速度,利用初始阈值估计产生一个较大的边界阈值,以淘汰初始搜索时的大量非匹配点,减少搜索点数目。实验结果表明,所提出的算法具有较好的鲁棒性,且算法的执行速度优于传统算法。