

文章编号: 1000-7032(2011)11-1147-05

高效率半导体激光器光纤耦合模块

朱洪波^{1,2}, 刘 云^{1*}, 郝明明^{1,2},
单肖楠¹, 付喜宏¹, 张金龙¹, 王立军¹

(1. 中国科学院 激发态物理重点实验室 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: 随着半导体激光光源在激光加工领域的应用不断扩展, 以激光二极管阵列制成的光纤耦合模块由于存在耦合效率低的缺点, 已不能满足激光加工低成本的需求, 因此研制高耦合效率的半导体激光器光纤耦合模块变得十分重要。本文将 8 只波长为 808 nm、输出功率为 5 W 的单管半导体激光器通过合束技术耦合进光纤, 制备了一种高效率的半导体激光器光纤耦合模块。光纤芯径为 200 μm 、数值孔径(NA)为 0.22, 光纤输出功率为 33.2 W, 耦合效率超过 83%, 这种高效率半导体激光器光纤耦合模块, 可用于激光打标、塑料加工等领域。

关 键 词: 单管半导体激光器; 高效率; 光纤耦合; 合束

中图分类号: TN248.4

PACS: 85.30.De

PACC: 3250F; 7860

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20113211.1147

1 引 言

大功率半导体激光器近年来在激光加工领域的应用范围逐步拓宽, 广泛地应用于熔覆、焊接、切割、钻孔^[1-4]等方面。在这些应用中, 通常需要将激光光源和光纤高效地耦合起来。这主要有两方面的实际意义: 其一, 采用光纤耦合是实现激光柔性传输的重要手段, 在激光加工中需要对加工表面进行多维处理, 光纤传输可避免折-反射光路的限制, 使用更方便, 可以使激光加工点灵活移动; 其二, 光纤耦合不仅可以从根本上改善输出激光的光束质量, 而且采用多个半导体激光器合束还可以使输出功率得到相对于单个半导体激光器数十倍的提高。

以往的半导体激光阵列的光纤耦合技术通常存在以下缺点:

(1) 由于每个发光点之间的热串联影响, 使得 Bar 条的出光功率和可靠性下降。

(2) 半导体激光 Bar 条在封装过程中由于热

应力会出现 Smile 效应^[5], 使准直透镜的安装出现偏差和散焦^[6], 增加准直后的发散角, 光束质量变差, 从而降低光纤耦合效率。

(3) Bar 条的光束质量不理想, 需要使用复杂的光束整形元件。在此过程中经过分割重排, 激光功率会受到损失, 进一步降低了光纤耦合效率。

由于每个单管半导体激光器都是独立的发光单元, 所以散热性能好, 不受热串联的影响, 在焊接过程中不会产生 Smile 效应, 不需要复杂的光束整形装置, 寿命通常可以达到 10 万小时。这使得基于单管半导体激光器制成的高效率光纤耦合模块成为激光打标、塑料加工等方面的一个更好的选择。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^[7]进行单波长光纤耦合, 200 μm 光纤输出功率达 12.4 W, 效率达 74%。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到百余瓦。德国弗朗和菲研究所采用阶梯镜反射

收稿日期: 2011-05-13; 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 国家“863”计划(0069AA032705); 吉林省科技厅重大项目(10ZDGG001); 广东省院地合作项目(2009A091100021) 资助项目

作者简介: 朱洪波(1984-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事半导体激光器单管合束及光纤耦合等方面的研究。

E-mail: zhbcjomp@163.com

*: 通讯联系人; E-mail: hx5252@sohu.com

法^[8]将两种偏振态、波长为 975 nm 的单管半导体激光器合束制成光纤耦合模块, 105 μm 光纤输出功率达 100 W, 耦合效率达 80%。瑞士 Oclaro 公司也采用偏振合束技术将波长为 980 nm 的单管半导体激光器制成光纤耦合模块^[9], 105 μm 光纤输出功率为 100 W, 耦合效率为 73%。通过光纤合束器将多个光纤耦合模块进行合束, 功率可达上千瓦^[10-11]。

本文采用单偏振态、连续输出功率 5 W、转换效率 45% 的 808 nm 单管半导体激光器进行合束, 通过自行设计的光学系统实现光纤耦合, 输出功率为 33.2 W, 耦合效率超过 83%。

2 实验原理

实验中采用一种阶梯排列结构进行单管合束, 就是将多个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。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 为利用阶梯排列结构进行合束的光路原理示意图, $\text{LD}_1 \sim \text{LD}_N$ 为 N 只单管半导体激光器。由于半导体激光器快慢轴方向发散角过大而且不对称, 快轴发散角比较大达到 $30^\circ \sim 40^\circ$ (FWHM), 慢轴发散角相对较小达到 $8^\circ \sim 12^\circ$ (FWHM), 所以 LD 发出的光束首先应经过快轴准直镜 (FAC) 和慢轴准直镜 (SAC) 对其快慢轴分别进行准直。LD 发出的光束经过 FAC 准直后快轴发散角减小, 可认为是在 y 轴方向上有一定发散角的线光源, 其理想光斑图形如图 1 中的 ①所示; 快轴准直后的 $\text{LD}_1 \sim \text{LD}_N$ 的发出光束分别通过各自对应的 SAC 进行准直, 准直后光束的传播方向不变, 慢轴发散角减小, 并在 z 轴上形成了一组快轴方向叠加的光束, 其截面光斑图按如图 1 中的 ②所示, 此时每个线光源在 x, y 方向上都有很小的发散角。我们使用自行设计的柱面镜对叠

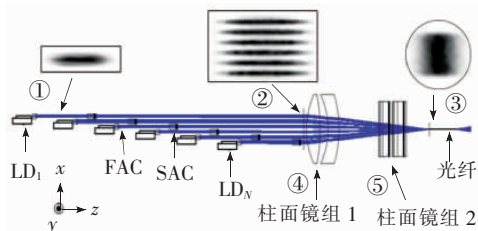


图 1 阶梯排列结构原理图

Fig. 1 Scheme of step arranging structure

加后的光束进行聚焦, 使光束在光纤端面聚焦进而耦合进光纤, 聚焦光斑如图 1 中的 ③所示。由于聚焦后光斑的存在像差, 单片透镜无法消除像差, 因此我们在快慢轴方向分别采用由两片聚焦柱面镜组成的透镜组来分别对快慢轴进行聚焦以消除像差, 快轴聚焦柱面镜组如图 1 图中的 ④所示, 慢轴聚焦柱面镜组如图 1 中的 ⑤所示。

由于半导体激光合束后的光斑呈方形, 且远场分布也呈方形, 而光纤的芯径和 NA 均为轴对称分布, 所以聚焦后的光斑和发散角必须满足 (1)、(2) 这两个条件^[12]:

$$d_{\text{laser}} = d_{\text{fiber}} \sqrt{2}, \quad (1)$$

$$NA_{\text{laser}} = NA_{\text{fiber}} \sqrt{2}, \quad (2)$$

其中, d_{laser} 为光斑的尺寸, d_{fiber} 为光纤的直径, NA_{laser} 为光束的数值孔径, NA_{fiber} 为光纤的数值孔径。

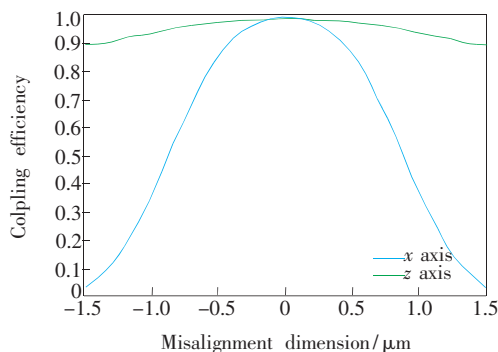


图 2 FAC 的 x 轴和 z 轴的误差分析

Fig. 2 Tolerance analysis in y and z direction of the FAC

通常 FAC 的装调会在 x, z 轴方向产生位置误差, 影响光束准直效果。FAC 在 x 轴方向产生的位置误差会使准直后的光束在 x 轴方向出现指向性误差, 并且会增大发散角; FAC 在 z 轴方向产生的位置误差不会产生指向性误差, 但是会产生离焦, 使准直光束的发散角增大。图 2 表示了耦合效率和 FAC 在 x 轴和 z 轴产生位置误差的关系。可以看出 FAC 在 z 轴的位置误差没有在 x 轴方向的位置误差影响耦合效率那么灵敏。 z 轴方向产生 1 μm 的位置误差, 耦合效率降低 6.3%; x 轴方向产生 1 μm 的位置误差, 可使耦合效率降低 60%。这就要求光学透镜安装调试的时候需要有一套非常精密的安装调试系统, 能使透镜的位置误差控制在亚微米范围内。我们使用精密的 6 轴调整架和自行设计的独特的 FAC 透镜夹持

器,通过精密调试可以将指向性误差控制在快轴小于 0.5 mrad 、慢轴小于 0.2 mrad 的范围内。

通过软件模拟计算,在阶梯热沉上排列 8 只单管半导体激光器进行合束,聚焦后得到的光斑图和快慢轴的发散角图如图 3 所示。通过图中的能量分布可以看出,聚焦光斑尺寸约为 $140 \mu\text{m}$ (95% 的能量分布),聚焦光斑的数值孔径 (NA) 约为 0.15 (95% 的能量分布)。这说明将 8 只单管半导体激光器进行合束可以高效率地耦合进 $200 \mu\text{m}$ 的光纤。

$$d_{\text{fiber}} = 140 \mu\text{m} < d_{\text{fiber}}/\sqrt{2}, \quad (3)$$

$$NA_{\text{laswr}} = 0.15 < NA_{\text{fiber}}/\sqrt{2}, \quad (4)$$

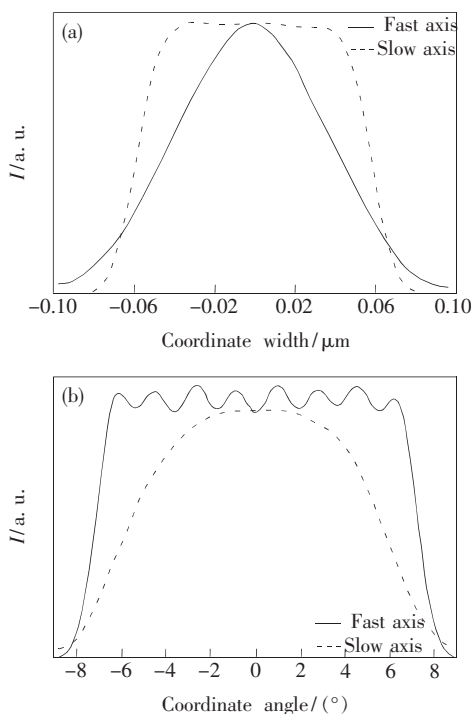


图 3 聚焦后的光斑和发散角分布图, (a) 光斑; (b) 发散角。
Fig. 3 Scheme of spot and angle distribution after focus.
(a) spot; (b) divergence angle.

3 结果与讨论

实验中采用波长为 808 nm 的单管半导体激光器,在注入电流 5.8 A 时,工作电压为 1.9 V ,输出功率达到 5 W ,斜率效率为 1.05 W/A 。经过精密调试,我们最终将 8 只单管半导体激光器合束并耦合进光纤,实现了光纤耦合输出,光纤芯径为 $200 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22 ,整个模块如图 4 所示。如果光纤的两个端面没有镀增透膜,当光束经过端面时会产生菲涅尔反射,通常光束每经过一个面大概会损失掉 4% 的能量。我们将光纤的

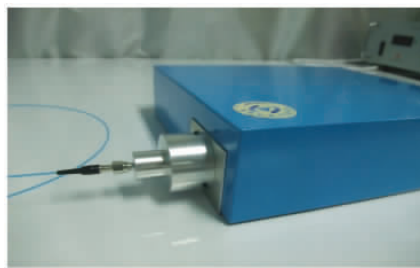


图 4 单管半导体激光器光纤耦合模块

Fig. 4 Modular of fiber coupled single emitter diode laser

两个端面都进行研磨抛光,并镀有透过率大于 99% 的增透膜用来消除菲涅尔反射。

通过实验,我们在室温下选取不同工作电流测得光纤耦合模块的输出功率,根据测试数据与激光器原始功率比较得到模块的 $P-I$ 特性曲线、耦合效率及电光转换效率。如图 5 所示,当模块工作电流为 5.8 A 时,光纤输出功率为 33.2 W ,耦合效率达到 83%。

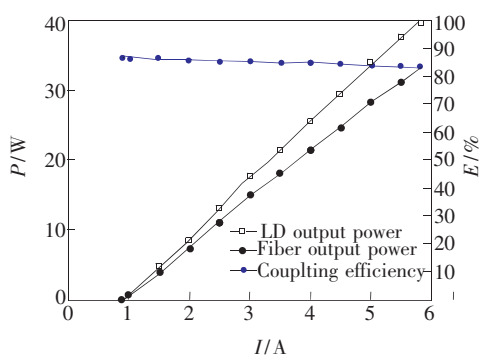


图 5 根据测量数据绘制的模块 $P-I$ 曲线和 $E-I$ 曲线

Fig. 5 $P-I$ and $E-I$ curve basing on the measure value

我们使用 Matlab 软件对光纤出射的光斑轮廓图进行处理。图 6 是一只单管半导体激光器耦合进光纤输出的光斑轮廓图,图 7 是 8 只单管半导体激光器合束后耦合进光纤输出的光斑轮廓图。通过比较可以看出,采用光纤将多只单管半导体激光器耦合后,输出的光束能量分布是多个

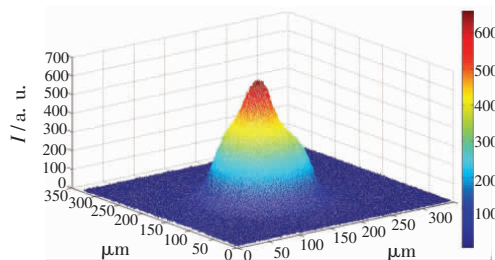


图 6 单只 LD 光纤耦合输出光斑图

Fig. 6 Intensity profile of fiber coupled module with one LD

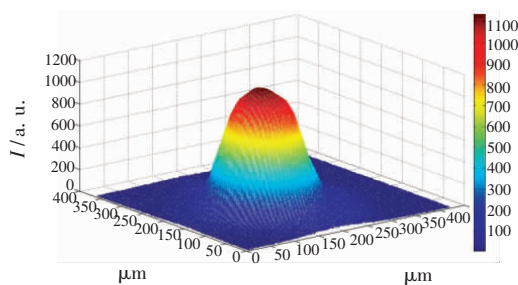


图 7 多只 LD 光纤耦合输出光斑图

Fig. 7 Intensity profile of fiber coupled multi-LDs module

单管半导体激光器能量在空间的叠加,而且光束通过在光纤内传输使得出射能量分布更均匀。上

述结果表明,采用单管合束光纤耦合技术可以大幅改善半导体激光空间能量的分布。

4 结 论

采用单管合束技术,将 8 只 808 nm 的单管半导体激光器进行合束,通过自行设计的光学系统将光束耦合进芯径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中,输出功率为 33.2 W,耦合效率达到 83%。通过光纤输出激光的光斑均匀,可直接应用于激光塑料加工、激光打标等领域。下一步将通过偏振耦合技术提高输出功率,最终提高激光功率密度,进一步拓展应用领域。

参 考 文 献:

- [1] Gu Yuanyuan, Feng Guangzhi, Deng Xinli, *et al.* 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2009, **17**(1): 8-13 (in Chinese).
- [2] Friedheim Dorsch, Franz X Daiminger, Petra Hennig, *et al.* 2 kW cw fiber-coupled diode laser system [J]. *SPIE*, 2000, **3889**: 45-53.
- [3] Yang Ye, Liu Yun, Qin Li, *et al.* Electro-optic properties of 850 nm high-brightness tapered lasers [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, **32**(6): 593-597 (in Chinese).
- [4] Feng Guangzhi, Gu Yuanyuan, San Xiaonan, *et al.* 808 nm high power diode laser stack with polarization coupling [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **29**(4): 695-700 (in Chinese).
- [5] Wang Xiangpeng, Li Zaijin, Wang Lijun, *et al.* Smile effect and package technique for diode laser arrays [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2010, **18**(1): 553-557 (in Chinese).
- [6] 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 μm fiber bundles [J]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687614-1-11.
- [7] Liu Guojun, Bo Baoxue, Ma Xiaohui, *et al.* Study on high power semiconductor laser arrays and output beam shaping [J]. *SPIE*, 2009, **7382**: 738207-1-11.
- [8] Schroder D, Werner E, Franke A, *et al.* Roadmap to low cost, high brightness diode laser power out of the fiber [J]. *SPIE*, 2010, **7583**: 758309-1-7.
- [9] Pierer J, Grossmann S, Spinola Durante G, *et al.* Automated assembly processes of high power single emitter diode lasers for 100 W in 105 μm /NA 0.15 fiber module [J]. *SPIE*, 2011, **7918**: 791801-1-8.
- [10] Kirk Price, Frank Pfeffer, Paul Leisher, *et al.* KW-class industrial diode lasers comprised of single emitters [J]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830E-1-9.
- [11] David Havrilla, Marco Holzer, Dr Rüdiger Brockmann, *et al.* Dramatic advances in direct diode lasers [J]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830B-1-6.
- [12] Marcel Werner, Christian Wessling, Stefan Hengesbach, *et al.* 100 W/100 μm passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100 μm single emitters [J]. *SPIE*, 2009, **7198**: 71980P-1-7.

High Efficiency Module of Fiber Coupled Diode Laser

ZHU Hong-bo^{1,2}, LIU Yun¹, HAO Ming-ming^{1,2}, SAN Xiao-nan¹,

FU Xi-hong¹, ZHANG Jin-long¹, WANG Li-jun¹

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

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

Abstract: With the increase of LD application in the field of laser processing, the efficiency of the fiber coupled modular based on diode laser arrays is rather low, which can not meet the need of low costing for laser processing, so it is very important to develop a higher efficiency modular of fiber coupled diode lasers. In this paper, we achieved a higher efficiency fiber coupled module based on 8 single emitter diode lasers providing more than 32.4 W output power from a 200 microns fiber core with an numerical aperture(NA) of 0.22 at 808 nm. Power of each LD can reach to 5 Watts at operation current. More than 83% coupling efficiency of the modular has been realized. This high power LD module can be used in laser plastics processing and laser medical treatment fields.

Key words: single emitter diode laser; high efficiency; fiber coupling; beam combination

CLC number: TN248.4

PACS: 85.30.De

PACC: 3250F; 7860

Document code: A

DOI: 10.3788/fgxb20113211.1147