

文章编号: 1000-7032(2018)09-1280-05

基于曲面空间合束的多单管半导体激光光纤耦合

谢文君, 曹银花*, 许商瑞, 邱运涛,
刘友强, 李 景, 张晓宁, 赵 明, 王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 随着单管半导体激光器光纤耦合技术的不断发展,为了进一步提高多单管半导体激光器的输出功率,本文采用曲面空间排列方式对多个单管半导体激光器进行合束研究,使更多数量的单管半导体激光器耦合进入同一光纤中,获得更高的输出功率。文中利用 ZEMAX 光学设计软件进行仿真模拟,将 34 只波长为 975 nm、输出功率为 10 W 的单管半导体激光器合束聚焦后耦合进芯径 200 μm 、数值孔径 0.22 的光纤中,获得耦合效率 91.76%、输出功率 312.03 W 的激光系统。实验中,将 17 只单管半导体激光器耦合进芯径 200 μm 、数值孔径 0.22 的光纤中,在 10.5 A 的驱动电流下,输出功率为 100.5 W,系统耦合效率为 68.46%。

关键词: 单管半导体激光器; 曲面空间合束; ZEMAX; 光纤耦合

中图分类号: TN24; TN31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183909.1280

Fiber Coupling of Multi-single Emitters Diode Lasers Based on Curved Surface Spatial Combination

XIE Wen-jun, CAO Yin-hua*, XU Shang-rui, QIU Yun-tao, LIU You-qiang,
LI Jing, ZHANG Xiao-ning, ZHAO Ming, WANG Zhi-yong

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

* Corresponding Author, E-mail: caoyh@bjut.edu.cn

Abstract: With the development of single emitter diode laser fiber coupling technology, in order to improve the output power of the multi-single emitters diode laser, the curved surface spatial combination, as a special way, was introduced to coupling the multi-single diode laser emitters into the fiber, which can combine the most number of single emitters in same optical fiber for increasing the output power. In simulation, with ZEMAX optical design software, 34 single emitters diode lasers with a center wavelength of 975 nm and 10 W output power are coupled into a fiber with core diameter of 200 μm and NA of 0.22. The simulation results of the maximum output power of 312.03 W and the coupling efficiency of 91.76% were obtained. We assembled a multiple single emitter diode laser based on 17 single emitters and coupled the beam into the optical fiber of which the core diameter is 200 μm and the numerical aperture is 0.22. Under 10.5 A driving current, the output power is 100.5 W and the coupling efficiency to be 68.46%.

Key words: single emitter diode laser; curved surface spatial combination; ZEMAX; fiber coupling

1 引 言

半导体激光器具有体积小、亮度高、稳定性好等优点。但是,由于半导体激光器发散角大、光束质量差且快慢轴方向不一致,出射功率低等缺陷,在一定程度上限制了它的应用^[1]。目前,提高功率主要采用空间合束来提高输出功率,即将多束激光在空间位置相互叠加使光束紧密排列。半导体激光器空间合束时通常将光束在快轴方向进行叠加,利用阶梯热沉或反射镜等方式实现合束^[1]。而光纤耦合技术能够将半导体激光转化为圆形均匀分布的光场,并且是激光传输的重要手段^[2-4]。单管半导体激光器具有无“Smile”效应、不产生交叉热、不需要复杂的光束整形系统^[5]等优点,从而使单管半导体激光器合束灵活简单,并且可以使用更小芯径和数值孔径的光纤^[6-7]。目前主要应用的是非相干光束技术,包括空间合束、偏振合束和光谱合束。在该方面国内外取得了不少研究成果。2015 年美国康宁公司选用 4 个波长为 976 nm 的单管半导体激光器进行合束,利用在快慢轴两个方向分别与入射光束倾斜的熔融石英平行平板(EARS)对光束进行重排,聚焦耦合到芯径 105 μm、NA 0.15 的光纤中,得到 34.7 W 的输出功率,耦合效率大于 87%^[8]。2016 年,长春理工大学陈晴等选用 9 个波长为 915 nm 的单管半导体激光器,聚焦扩束后耦合进芯径 105 μm、NA 0.22 的光纤中,得到 60 W 的输出功率,耦合效率为 82%^[9]。2016 年北京凯普林公司选用 14 个波长为 976 nm 的单管半导体激光器,将合束后的光束耦合进芯径 105 μm、NA 0.15 的光纤中,理论耦合效率为 98.4%,封装后输出功率 100 W^[10]。从上述研究现状看出,多单管半导体激光器光纤耦合模块技术相对成熟,但受传统的空间排布和镜片孔径的影响,可排布的单管半导体激光器数量有限。本文针对新颖的空间排列方式进行研究,从而使得更多的单管半导体激光器耦合进入光纤。

本文利用 ZEMAX 软件对 34 路波长为 975 nm、输出功率 10 W 的单管半导体激光器进行模拟,采用曲面空间合束和偏振合束对多单管半导体激光器进行合束,然后基于合束后的光束对聚焦系统进行设计。最后结合实际情况,完成 17 只单管半导体光纤耦合实验,通过芯径 200 μm,数

值孔径 0.22 的光纤,获得了功率为 100.5 W 的激光输出。

2 曲面式空间合束

曲面式空间合束是将多个单管半导体激光器的光束在快轴方向以不同入射角度向一点出射,将所有光束汇聚于同一位置,使多束激光在快轴方向进行梯度叠加,从而实现空间合束。合束示意图见图 1,整个光路在快轴方向类似于以一定点为圆心、确定光程为半径画圆所得。

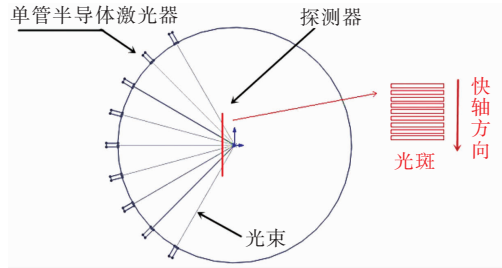


图 1 空间合束示意图

Fig. 1 Diagram of spatial combination

曲面式空间合束相对于常规空间合束技术主要有两点改进:

(1) 光束孔径角。常规的空间合束方式受光纤 NA 值限制,所能密排的单管半导体激光器数量有限,难以实现更高的输出功率。如图 2 所示(红色为曲面空间合束光线,绿色为常规空间合束光线),对于相同数量的单管半导体激光器,曲面空间合束的光束在快轴方向具有角度,与常规空间合束的近似平行光相比,焦点的位置会向前移动;而且快轴方向的光斑尺寸会随传播距离的增加而减小,聚焦后光束的角度也比较小有利于光纤耦合。因此,在相同空间范围内曲面空间合束方式可以排布更多单管半导体激光器,从而实现更高的输出功率。

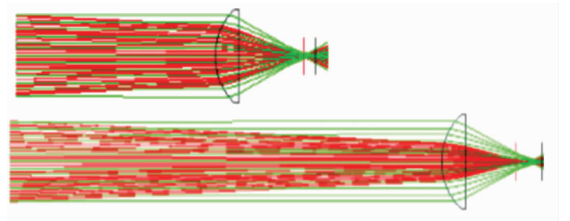


图 2 曲面空间合束不同传播距离对比图

Fig. 2 Comparison of different propagation distances of curved surface spatial combination

(2) 聚焦镜通光孔径。在使用相同口径的聚焦镜时, 曲面空间合束比直接空间合束能容纳更多的单管半导体激光器光源, 使聚焦镜的通光孔径得到更加充分的利用, 如图 3 所示。

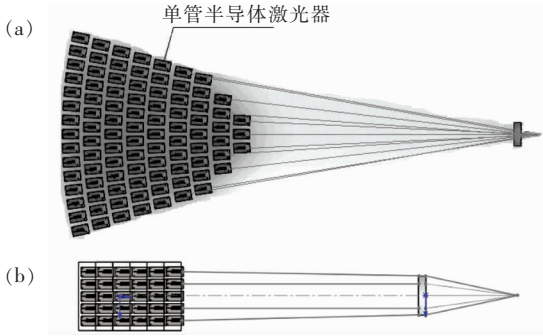


图 3 曲面空间合束与常规空间合束对比图。(a) 曲面空间合束; (b) 常规空间合束。

Fig. 3 Comparison between curved surface spatial combination and spatial combination. (a) Curved surface spatial combination. (b) Conventional spatial combination.

综上, 本文将采用曲面空间合束的方式对光束进行排列, 这种方式在相同空间范围和镜片口径的条件下更具有优势, 可以尽可能多地增加单管的排布数量, 以达到更高功率的输出。

3 光学系统模拟

本文采用波长为 975 nm 的芯片, 具体参数如表 1 所示。

表 1 975 nm COS 参数

Tab. 1 Parameters of 975 nm COS product

	d/mm	$\theta/(\text{°})$
慢轴方向	0.1	8 ~ 13
快轴方向	0.001	50 ~ 64

从表 1 参数可知, 快轴方向发散角较大, 为了达到更好的准直效果, 采用非球面柱面镜对单管

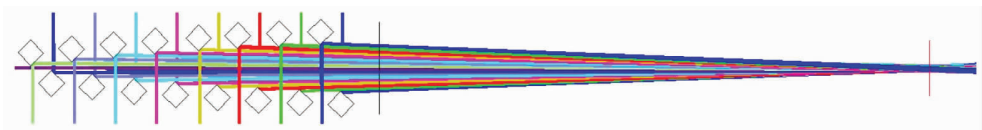


图 5 反射镜错位排列光源结构

Fig. 5 Light source structure of mirror arranged in a misaligned

采用两片柱面镜分别对快慢轴光束进行聚焦, 通过优化选用焦距为 7.7 mm 和 9.7 mm 的柱

进行准直。慢轴方向发散角相对较小, 采用普通柱面镜准直即可。

基于芯片和模拟参数分别计算准直前后快慢轴 BBP 值, 如表 2 所示。

表 2 单管半导体激光器准直前后参数

Tab. 2 Single-emitters diode laser collimation parameters

	d/mm	$\theta/(\text{°})$	BPP/(mm · mrad)
快轴准直前	0.001	57°	0.249
慢轴准直前	0.1	10.5°	4.58
快轴准直后	0.17	0.326°	0.242
慢轴准直后	3.1	0.528°	3.571

根据以上参数在 ZEMAX 光源文件建模时直接对快慢轴准直后的光束进行模拟, 单管快、慢轴光斑设置为 0.2 mm 和 2 mm, 发散角设置为 0.172° 和 0.287°, 并将每个单管的输出功率设置为 10 W。

设置光路为单管半导体激光器在快轴方向倾斜出射, 光束汇聚点位置选择在距离出光口 100 mm 处。选取角度 $-2.4^\circ \sim 2.4^\circ$ 作为快轴方向光束倾角区间。根据单管半导体激光器厚度将各光源间隔设为 4.5 mm, 即 $Z_1 = 4.5 \text{ mm}$, 如图 4 所示。为了增加模块的集成化, 减少模块占用的体积, 将 0° 位置以外的其他单管光程缩短, 使单管半导体激光器出光口处于同一水平位置, ZEMAX 建模如图 5 所示。

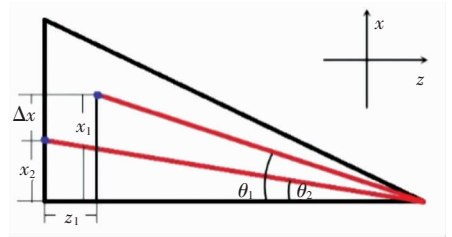


图 4 光源间隔计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of light source interval calculation

面镜作为聚焦系统, 34 只单管半导体激光器组成模块的合束光斑及耦合输出光斑如图 6 所示。该

系统经偏振合束后得到最大输出功率为 312.03 W, 耦合效率 91.76%。通过模拟结果可知该系统满足设计要求, 可以将光束高效地耦合进光纤。

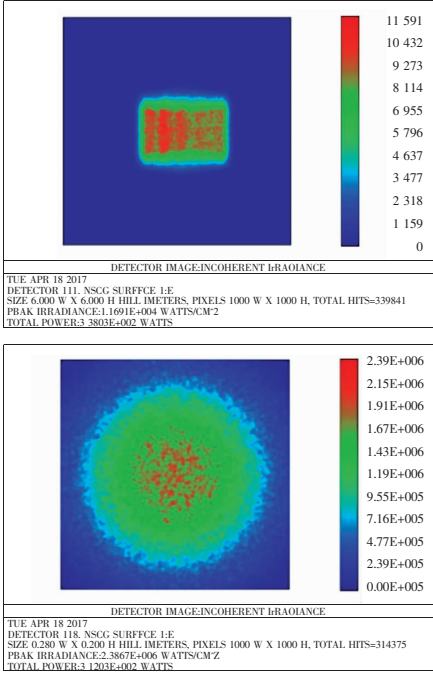


图 6 合束光斑及光纤端面输出光斑

Fig. 6 Light spot after collimation and fiber coupling

4 实验结果与讨论

4.1 曲线空间合束实验

实验中采用六维调整架及自主设计夹具配合装调, 调整架及准直后的单管半导体激光器如图 7 所示。样机测试平台如图 8 所示, 单管的阈值电流为 0.7 A, 系统相应的 $P-I$ 曲线如图 9 所示。由于实验采用的单管半导体芯片不满足偏振的要求, 因此未装调偏振合束模块。整个系统在 10.5 A 电流驱动下, 光纤耦合输出功率 100.5 W。若

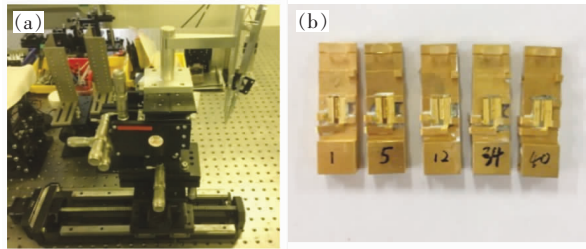


图 7 六维调整架及准直后单管实物图。(a)六维调整架;(b)准直后单管实物。

Fig. 7 Structure of the six dimensional adjustment frame and SE module after collimation. (a) Six dimensional adjustment frame. (b) SE module after collimation.

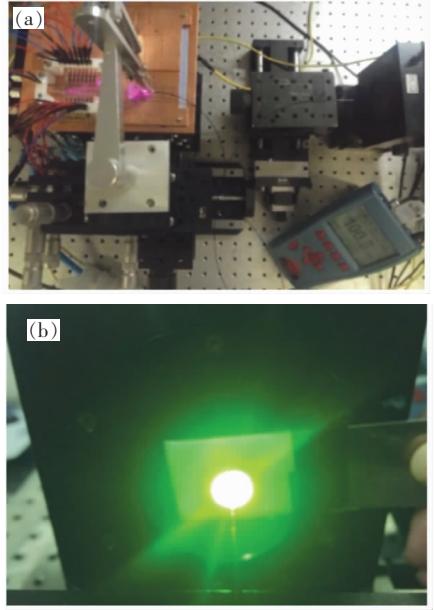


图 8 样机测试平台及耦合光斑

Fig. 8 Testing platform for the sample equipment and light spot after fiber coupling

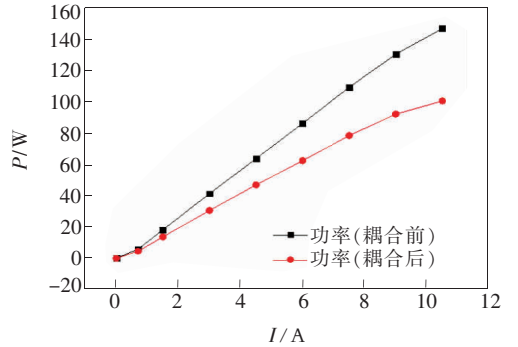


图 9 系统的 $P-I$ 曲线

Fig. 9 $P-I$ curve of the system

使用偏振合束, 整个系统可实现功率倍增, 预计输出功率可以达到 201 W。

4.2 实验误差分析

基于实验结果进行如下分析:

(1) 六维调整架精度在微米量级, 并且所有镜片为手动夹持, 在单个单管半导体激光器准直时, 由于夹具夹持和手动装配精度等误差的影响, 造成光束的准直效果不理想。准直后的光斑在快、慢轴方向的发散角较大, 光束指向性较差, 而且不同单管准直后发散角各不相同, 在光源系统装配时各个光源不能保证很好的一致性。

(2) 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。

(3)在光纤耦合模块装调时,由于前面合束光束误差较大导致光束聚焦镜位置偏离模拟预定位置,使得快慢轴两个方向的焦点位置发生偏离,快慢轴焦点没有完全重合,使激光不能高效率耦合进入光纤。

5 结 论

本文采用曲面空间合束的方式对多单管半导体激光器进行合束。通过 ZEMAX 模拟,分析了在曲面空间合束技术中光束倾斜角度与可容纳单管半导体激光器的数量的关系,确定了光

束的倾斜角度和排布数量,从而建立了 34 路多单管半导体激光器光学系统,并采用两片方向不同的柱面镜对光束进行聚焦,最终耦合进芯径 200 μm 、数值孔径 0.22 的光纤,最大输出功率 312.03 W,耦合效率 91.76%。通过实验设计出半导体激光器系统的机械结构,最终完成 17 路多单管半导体激光器样机的装调,得到 100.5 W 的输出功率,耦合效率为 68.46%。该系统作为自动化设备机器视觉学习的样机,在设备高精度的保证下有望实现更高的输出功率及耦合效率。

参 考 文 献:

- [1] 周泽鹏. 百瓦级高亮度半导体激光器光纤耦合设计 [D]. 长春:长春理工大学, 2014.
ZHOU Z P. *Fiber Coupling Design of Hundred-Watt High Brightness Semiconductor Lasers* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [2] 余俊宏, 郭林辉, 高松信, 等. 高功率半导体激光器光纤耦合实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5):26051005.
Yu J H, GUO L H, GAO S X, *et al.*. Research on high-power single emitter fiber-coupled diode laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5):26051005. (in Chinese)
- [3] 栾凯. 高功率半导体激光器光纤耦合模块的研究 [D]. 长春:长春理工大学, 2010.
LUAN K. *Study on Fiber-coupled High Power Semiconductor Laser Module* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [4] 胡博宇. 精密光纤耦合系统研究 [D]. 长春:长春理工大学, 2010.
HU B Y. *Research on Precision Fiber Coupling System* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] KARLSEN S R, PRICE R K, REYNOLDS M, *et al.*. 100-W 105- μm 0.15 NA fiber coupled laser diode module [J]. *SPIE*, 2009;71980T-1-8.
- [6] HOU L, MA X. Design of high-brightness 976 nm fiber-coupled laser diodes based on ZEMAX [C]. *Selected Proceedings of The Photoelectronic Technology Committee Conferences, International Society for Optics and Photonics, Nanjing*, 2015;95211F-1-8.
- [7] WANG B, ZHU J. Spectral beam combining of multi-single emitters [J]. *SPIE*, 2016, 9733:97330F.
- [8] COBB J M, BHATIA V. Multi-emitter laser multiplexer using a two mirror beam shaper [C]. *International Optical Design Conference, Kohala Coast*, 2014;92930C-92930C-5.
- [9] 陈晴. 大功率高亮度单管半导体激光器模块设计 [D]. 长春:长春理工大学, 2016.
CHEN Q. *High Power and Brightness Semiconductor Laser Module Design* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] LIU R, ZHU J. Packaging of wavelength stabilized 976 nm 100 W 105 μm 0.15 NA fiber coupled diode lasers [C]. *LASE. International Society for Optics and Photonics, SPIE, Shanghai*, 2016.



谢文君(1991 -),女,山西大同人,硕士研究生,2014 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束整形、光纤耦合技术方面的研究。
E-mail: S201513054@emails.bjut.edu.cn



曹银花(1964 -),女,吉林长春人,博士,研究员,2005 年于北京理工大学获得博士学位,主要从事大功率半导体激光系统集成技术、大功率半导体激光光束光纤耦合技术及大功率激光光束传输与控制技术等方面的研究。
E-mail: caoyh@bjut.edu.cn