

高效率 400 μm 光纤耦合千瓦半导体激光器

姜梦华 徐丹 黄雪松 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 高光束质量、高功率的光纤耦合半导体激光器在工业加工领域具有广泛的应用需求。本文采用微光学元件光束变换系统(BTS)对 19 个发光单元的标准 cm-bar 半导体激光器阵列进行光束变换,提高阵列慢轴方向的光束质量;设计了紧凑型空间合束模块结构,实现了两个方向光束质量均衡的空间合束;利用 4 个模块经过偏振合束、波长合束后,耦合入芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.22 的光纤,光纤耦合输出最大功率达 1070 W,耦合效率为 96.3%,电光转换效率为 43%,在最大功率下连续工作 1 h,功率不稳定度小于 1%。

关键词 激光器;半导体激光器;光纤耦合;高效率;高功率

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s102005

High Efficiency 400 μm Fiber Coupled Diode Laser with Kilowatt Output Power

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

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

Abstract High beam quality, high power fiber coupled diode laser has extensive requirements in the field of industrial processing applications. Micro-optics beam transform system (BTS) has been employed to transform the beam emitted from standard cm-bar semiconductor with 19 emitters, the beam quality along the slow axis has been improved. Compact spatial multiplexing module is designed, and balanced beam quality in both directions of combined beam is achieved, four spatial multiplexing modules are employed in polarization multiplexing and wavelength multiplexing, the output beam is coupled into a fiber with core diameter of 400 μm , numerical aperture (NA) of 0.22. The maximum fiber-coupled output power of 1070 W, the coupling efficiency of 96.3%, and the electro-optical conversion efficiency of 43% are achieved. The instability of output power is less than 1%, by measuring the maximum output power for 1 h.

Key words lasers; semiconductor laser; fiber coupling; high efficiency; high power

OCIS codes 140.2020; 140.3300; 140.3510

1 引 言

高功率半导体激光器具有结构紧凑、效率高、可靠性好和使用寿命长等优点,广泛应用于国防、工业加工、生物医学和其他激光器抽运源等领域。但由于结构上的限制,高功率半导体激光阵列及叠阵输出光束快慢轴的光束质量差异较大^[1],因而其整体光束质量较差、亮度较低,通常用于金属表面处理^[2]及塑料焊接加工,限制了其应用范围。光纤耦合输出的高功率半导体激光器,具有光场分布均匀、可以实现柔性传输、应用灵活等优点,可以实现金属焊接、熔覆等加工应用,一直是半导体激光技术研究中的重要研究方向之一。国内外多所研究机构及激光公司都对此进行了研究,采用的方案主要有单管半导体合束^[3]、半导体阵列/叠阵经过外加光学元件改善光束质量后进行合束^[4-5]、波长光束组合技术^[6-8]三种。激光合束技术是目前实现高功率、高光束质量半导体激光输出的主要途径,其中单管半导体激光器合束光束质量较好,但是功率大多在

收稿日期: 2015-01-10; **收到修改稿日期:** 2015-02-18

基金项目: 北京市科委科技条件平台项目(Z131110000613063)

作者简介: 姜梦华(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail:jmh@bjut.edu.cn

几十瓦到百瓦量级^[9];半导体叠阵合束输出功率可以达到万瓦量级^[10-11],但光束质量较差;半导体线阵合束功率一般在千瓦量级^[5],可以耦合入芯径为 400~600 μm 的光纤,是实现高功率高光束质量光纤耦合输出的比较理想的一种合束方案。目前国外多家公司可以提供用于金属焊接、熔覆的光纤耦合高功率半导体激光器。如德国 Limo 公司采用 4 波长线阵合束实现芯径为 200 μm ,数值孔径(NA)0.22 光纤连续输出 1.2 kW^[12]。德国 Dilas 公司,利用 5 种波长的 mini-bar 合束,并耦合入芯径为 500 μm 、数值孔径为 0.12 的光纤,实现了 3835 W 连续激光输出^[13]。德国的 Laserline 公司也有系列产品的光纤耦合半导体激光器,最高功率达到 20 kW,采用 2 mm 芯径的光纤传输。国内研究方面,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所进行了较多半导体合束方面的研究,2013 年报道了利用 4 种波长的 cm-bar 半导体阵列,经过光束整形、偏振合束、波长合束后,耦合入芯径为 600 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤,输出功率为 2218 W,耦合效率为 90.4%^[14]。并利用短阵列,经过光束整形、偏振合束后,耦合入芯径为 400 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤,获得输出功率为 418.9 W,耦合效率为 93%^[15]。2010 年,长春理工大学报道了利用折叠镜对 cm-bar 叠阵光束整形后,耦合入芯径为 400 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤,实现输出功率为 195 W,耦合效率为 65%^[16]。2011 年北京工业大学报道了利用垂直叠阵,经过光束整形、偏振合束和波长合束后,耦合入芯径为 600 μm 的光纤,数值孔径为 0.22 的光纤,获得输出功率为 664 W,耦合效率为 85.9%^[17]。2013 年报道了利用 cm-bar 半导体阵列,经过光束整形后,耦合入芯径为 300 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤,实现输出功率 63 W,光纤耦合效率大于 90%^[18]。2012 年中国工程物理研究院报道了利用 mini-bar 叠阵,利用高反膜和增透膜周期分布的空间叠加镜合束,耦合入芯径为 1000 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤,实现输出功率 1306 W,耦合效率约为 80%^[19],并在 2014 年报道了耦合入芯径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤,获得输出功率为 280 W,光-光效率为 80.3%的研究结果^[20]。综合文献分析,国内半导体阵列(叠阵)光纤耦合输出激光,存在 cm-bar 阵列合束光束质量差,亮度低等问题,因而高功率半导体合束多采用 mini-bar 以实现芯径在 400 μm 以下的光纤耦合,且功率只有几百瓦,与国外研究存在较大的差距,限制了半导体激光器的广泛应用。

本文采用 19 个发光单元的标准 cm-bar 半导体阵列,通过微光学元件对半导体阵列的输出光束进行光束变换,提高阵列慢轴方向的光束质量,并设计了紧凑型空间合束模块结构,实现了两个方向光束质量均衡的空间合束,光束质量满足 400 μm 光纤耦合条件,利用 4 个空间合束模块,经过偏振合束、波长合束后,耦合入芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.22 的光纤,光纤耦合输出最大功率为 1070 W,耦合效率达 96.3%,电光转换效率为 43%。

2 系统方案设计

2.1 光束整形提高标准半导体阵列的光束质量

单个半导体阵列的光束质量是影响耦合光纤芯径和耦合效率的关键参数,本文研究中所采用的半导体阵列是 JENOPTIK 公司的标准半导体阵列,宽度 10 mm,19 个发光单元,发光单元宽度为 100 μm ,填充因子为 20%,快轴方向光束发散角为 40°,慢轴方向光束发散角为 3.5°。根据评价光束质量的光参数乘积的定义,半导体阵列快慢轴方向的光参数乘积(BPP, Q)分别为

$$\begin{aligned} Q_f &= 0.5 \mu\text{m} \times 698 \text{ mrad} = 0.35 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \\ Q_s &= 5 \text{ mm} \times 61 \text{ mrad} = 305 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 Q_f 和 Q_s 分别为阵列快轴方向和慢轴方向的光参数乘积。

为了实现高效率光纤耦合,单个半导体阵列的光束质量必须满足光纤耦合条件,研究中采用 Fisba Optik 公司生产的微光学元件光束变换系统(BTS)进行光束变换,提高半导体阵列慢轴方向的光束质量。如图 1 所示为 BTS 的结构图,由快轴准直(FAC)镜与倾斜 45°排列的柱透镜阵列组成。半导体阵列输出的光束经过快轴准直后,由倾斜 45°排列的柱透镜阵列将每个发光单元的光束旋转 90°,此时水平方向的光束发散角为准直后原快轴的发散角,光束宽度基本不变(10 mm),因而光束质量得到极大提高。

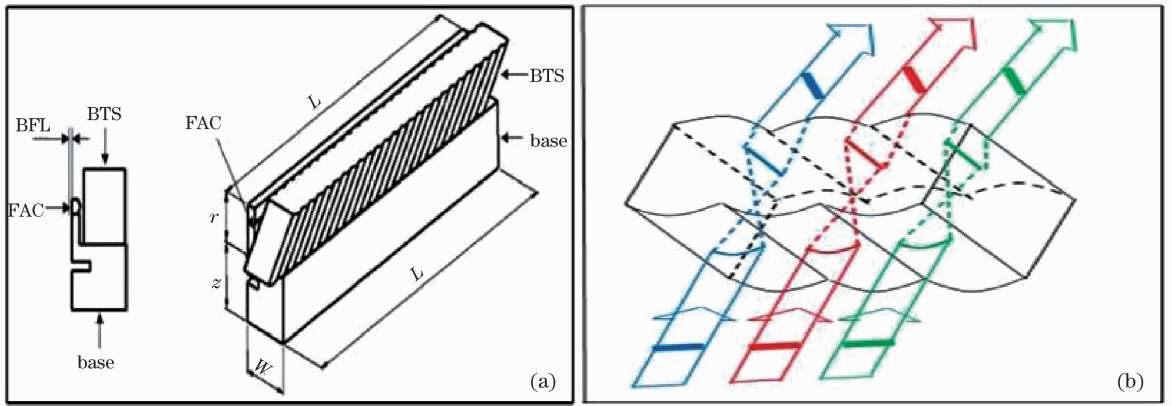


图 1 BTS 结构图及阵列光场旋转重构示意图. (a) BTS 的结构图; (b) 阵列光场旋转重构示意图

Fig. 1 Structure of BTS and process of rotating beams. (a) Structure of BTS;

(b) schematic map of process of rotating beams

光束变换后,水平方向的发散角约为 4 mrad,垂直方向的光束发散角约为 3.5°,那么两个方向的光参数乘积分别为

$$\begin{aligned} Q_{\text{ver}} &= 50 \mu\text{m} \times 61 \text{ mrad} = 3.05 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \\ Q_{\text{hor}} &= 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mrad} = 20 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 Q_{ver} 和 Q_{hor} 分别代表垂直方向和水平方向的光参数乘积, Q_{hor} 代表水平方向的光参数乘积。经过 BTS 后,利用柱透镜对垂直方向的光束进行准直,使两个方向具有相同的光束发散角。根据下式计算准直透镜的焦距 f

$$f = \frac{\omega_y}{\tan\theta_y} \quad (3)$$

式中 ω_y 为发光单元半宽, θ_y 为准直后的发散角,经计算,准直镜焦距 $f=12.5 \text{ mm}$,根据现有产品参数,选择焦距为 12.7 mm 的聚焦镜。

2.2 空间合束结构设计

改善光束质量后的半导体激光器阵列,在垂直方向的光参数乘积较小,为了增加激光功率,采用空间合束在垂直方向叠加多个光束,使两个方向上的光参数乘积更加接近。由于准直柱透镜的焦距为 12.7 mm,对应的光束发散角为 3.94 mrad,束腰位置的光束半峰全宽为 0.77 mm,为了增加光路调节的误差容限、减小遮挡效应,相邻两个半导体阵列之间的高度差为 2 mm。经过计算,垂直方向叠加 5 个半导体阵列,两个方向的光束质量一致性高,叠加后光参数乘积为

$$Q_{\text{ver}} = \frac{1}{2} \times 9.54 \text{ mm} \times 3.94 \text{ mrad} = 18.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

考虑到半导体阵列在 BTS 装调中的对准误差、空间合束对光束质量退化的影响,空间合束模块在垂直方向没有叠加更多的半导体阵列,虽然限制了模块的输出功率,但由于两个方向光束质量一致性高,因而在进行光纤耦合时,获得了高的光纤耦合效率。图 2 所示为设计的紧凑排列空间合束结构,这种结构设计减小了巴条之间的光程差,因而减小了每个巴条光束束腰的位置差异,有利于减少空间合束光束质量的退化。

2.3 偏振合束及波长合束

在半导体激光偏振合束及波长合束中,采用两个全反镜实现两路合束光束完全重叠的合束方案,提高合束光路的一致性,减少光束质量退化,同时合束光路易于调节;在光路设计方面,合束的模块等光程放置,提高光纤耦合时焦点的重合度,以实现高效率光纤耦合。合束光路原理图如图 3 所示,图中 HR 为 45°全反镜,PPBS 为偏振合束片,WCM 为 938 nm/976 nm 波长组合镜。激光器内部机械结构分为上下两层设计,以减小激光器的体积,每层的两个激光模块偏振合束后,再进行波长合束。

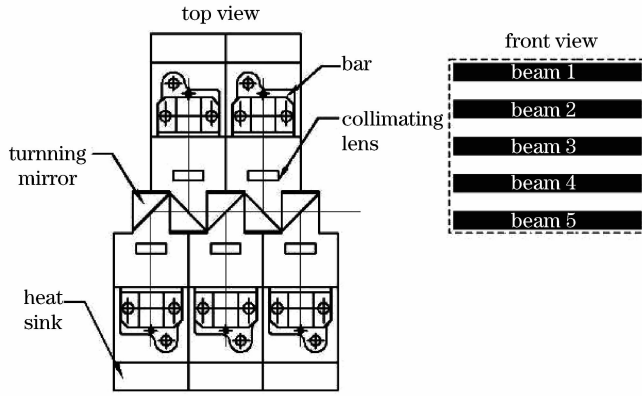


图 2 紧凑排列的空间合束设计

Fig. 2 Compact structure of spatial multiplexing

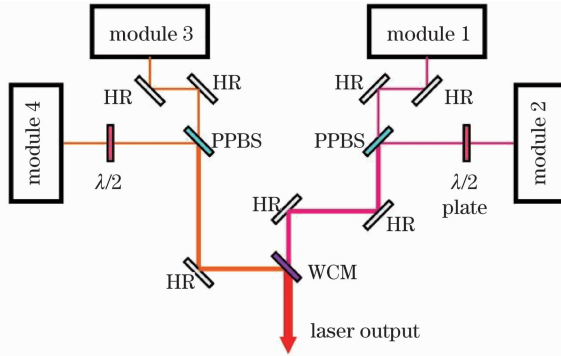


图 3 偏振及波长合束光路原理图

Fig. 3 Schematic of polarization multiplexing and wavelength multiplexing

2.4 光纤耦合设计

经过偏振合束、波长合束后光束的形状近似为矩形,如图 4 所示,图中, ω_x 、 θ_x 分别为光束水平方向的半宽及发散角, ω_y 、 θ_y 分别为光束垂直方向的半峰全宽及发散角, ω_0 、 θ_0 分别为光束沿对角线方向的半峰全宽及发散角。则 ω_0 、 θ_0 分别表示为

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \quad (4)$$

$$\theta_0 = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$$

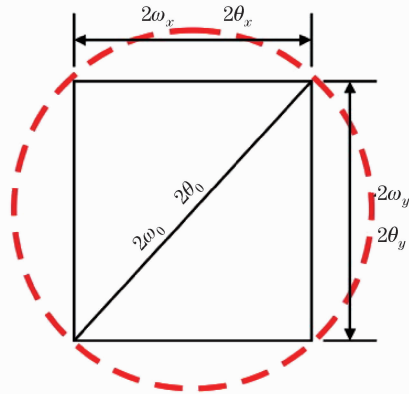


图 4 合束光束参数示意图

Fig. 4 Schematic of combined beam parameters

满足光纤耦合条件的情况下,取光纤芯径的 90%作为耦合光束的焦点范围,那么耦合透镜的焦距为

$$f = 0.225 \times \frac{D_{\text{fiber}} \times \phi}{Q} \quad (5)$$

式中 D_{fiber} 为光纤的芯径, ϕ 为耦合镜上矩形光束的对角线长度, 由于合束光束的发散角小, 计算中取 $\phi = 2\omega_0$ 。本文采用的光纤的芯径为 $400 \mu\text{m}$, 数值孔径(NA)为 0.22, 测量合束光束质量 $39.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 经计算耦合镜焦距为 34.62 mm 。实验中采用非球面镜作为光纤耦合聚焦镜, 减小球差影响, 提高聚焦质量, 根据现有的商业产品参数, 选择耦合镜的焦距为 32 mm 。在光束聚焦之前, 利用扩束镜进一步减少合束光束的发散角, 并匹配光纤耦合镜的数值孔径。

3 研究结果及分析

3.1 BTS 改善半导体激光器阵列光束质量的实验结果

半导体激光器阵列经过 BTS 光束变换后的光场分布如图 5 所示。利用刀口法及双曲线拟合的方法测量半导体阵列的光束质量, 取总功率的 96%。经计算, 在电流为 60 A 时, 水平方向的光束质量 $Q_{\text{hor}} = 22.9 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 垂直方向的光束质量 $Q_{\text{ver}} = 3.9 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 测量结果如图 6 所示。光束质量的实验测量结果比理论计算结果稍有退化, 主要是受半导体激光器阵列实际光束质量的差异、BTS 装调精度的影响, 其中 BTS 装调精度是影响光束质量的主要因素。

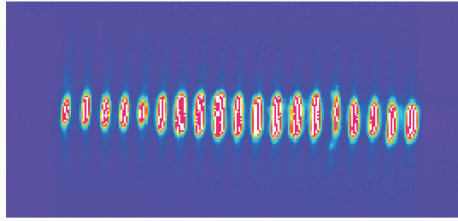


图 5 半导体阵列光束质量改善后的光场分布

Fig. 5 Beam distribution of LD bar after improving beam quality by BTS

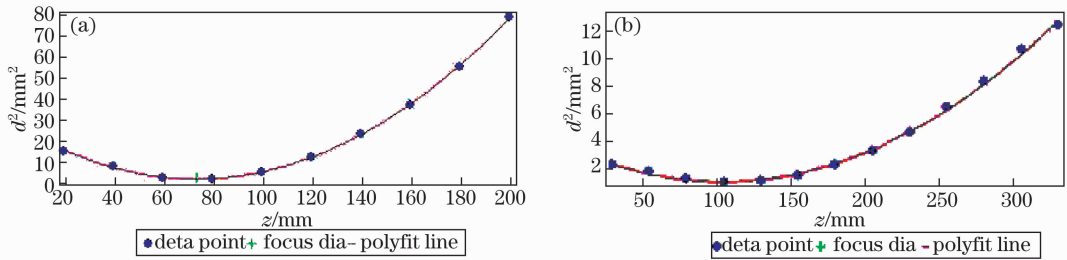


图 6 单个半导体激光器阵列的光束质量。(a)水平方向;(b)垂直方向

Fig. 6 Beam quality of single LD bare. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

3.2 空间合束激光模块

分别利用 10 只 938 nm 、 976 nm 半导体激光器阵列, 每 5 个阵列构成一个空间合束模块, 装调 4 个激光模块, 并测量每个模块的功率及光束质量。经测量, 每个空间合束模块, 水平方向及垂直方向的光束质量均小于 $30 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 满足 $400 \mu\text{m}$ 光纤的耦合条件。与理论设计相比, 合束后两个方向的光束质量都有退化, 原因在于不同巴条的光束之间, 光束指向性、光束间隔、光束平行度等方面都存在一定的装调偏差。图 7 为 CCD 测量其中一个合束模块的光场分布图。

3.3 偏振、波长合束及光纤耦合

分别将 938 nm 和 976 nm 的两个模块偏振合束, 再进行波长合束。每个模块的光束完全重合, 在光束质量基本不变的情况下提高激光输出功率。在电流为 75 A 时, 合束输出功率为 1112 W 。合束光束经过由凹凸镜组成的 $1:1.2$ 的扩束系统后, 由焦距为 32 mm 的非球面镜聚焦, 耦合进芯径为 $400 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤, 耦合输出功率为 1071 W , 耦合效率为 96.3% , 总的电光效率为 43% 。光纤耦合效率曲线如图 8 所示, 光纤耦合输出光束的光场分布如图 9 所示, 研制的芯径为 $400 \mu\text{m}$ 光纤耦合千瓦半导体激光器实物图如图 10 所示。

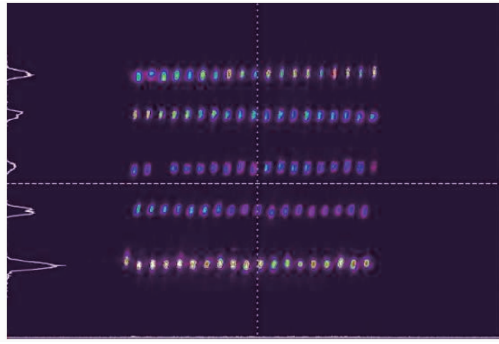


图 7 空间合束光场分布图

Fig. 7 Beam distribution of spatial multiplexing

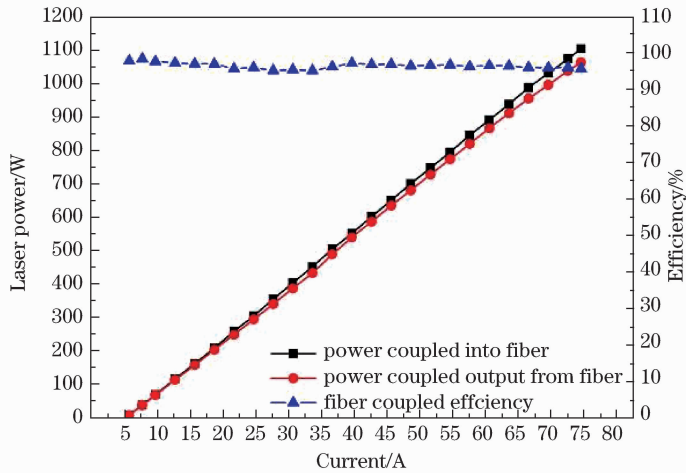


图 8 光输出功率及耦合效率曲线

Fig. 8 Experimental results of output power and fiber coupling efficiency

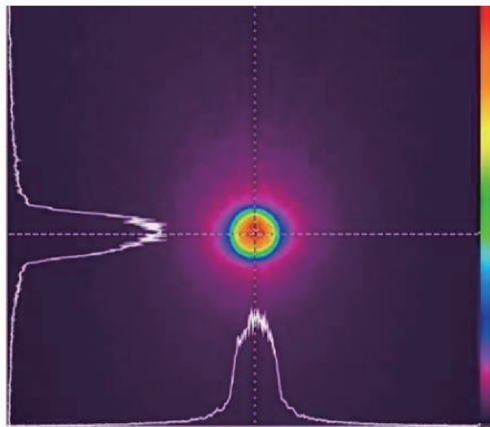


图 9 输出光束光场分布图

Fig. 9 Measured beam image coupled from fiber

3.4 激光器工作稳定性测试

在室温下,采用 OPHIR 5000 W-LP 功率计测量了激光器在最高功率 1071 W 时,连续工作 1 h 的输出功率,每隔 3 min 记录一次测试结果。功率测试记录如图 11 所示。根据不稳定性公式

$$R_t = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\bar{P}} \quad (6)$$

式中 P_{\max} 和 P_{\min} 为功率测量最高和最低值; \bar{P} 为功率测量的平均值。计算可得,激光工作不稳定性为 0.47%。



图 10 400 μm 光纤耦合千瓦半导体激光器实物图

Fig. 10 400 μm fiber coupled diode laser with kilowatt power

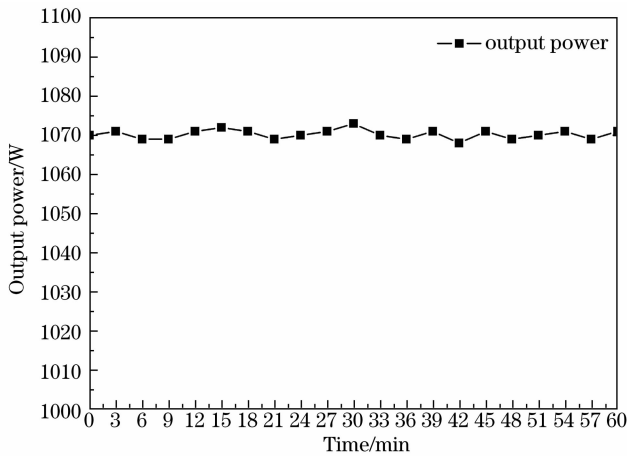


图 11 光纤耦合输出激光功率稳定性测试

Fig. 11 Stability measurement of fiber coupled output power

4 结 论

采用 20 只 938 nm、976 nm 的 cm-bar 半导体阵列,利用微光学元件 BTS 进行光束整形,提高半导体阵列慢轴方向的光束质量,设计了紧凑型空间合束模块结构,经过偏振合束、波长合束后,耦合入芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.22 的光纤,光纤耦合输出最高功率为 1070 W,耦合效率为 96.3%,电光转换效率为 43%,最高输出功率下,激光连续工作 1 h 功率不稳定性小于 1%。在下一步研究中,将组合更多的激光波长,以实现更高功率的激光输出,并进行激光焊接等加工应用。

参 考 文 献

- Zhou Minchao, Jiang Xianfeng, Zhang Lifang, *et al.*. Optical performance of high power laser diode stack[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202004.
周旻超,江先锋,张丽芳,等.大功率半导体激光器叠阵的光学性能[J].中国激光,2013,40(12):1202004.
- Wu Qiang, Wang Xubao, Niu Jianqiang, *et al.*. Composition and properties continuously changed gradient coating fabricated by high power diode laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203005.
武强,王旭葆,牛健强,等.成分及性能连续变化梯度涂层的半导体激光制备[J].中国激光,2013,40(12):1203005.
- 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 [C]. SPIE, 2009,7198:71980P.
- G Bonati, P Hennig, U Rolig, *et al.*. High power passive cooled diode laser device [C]. SPIE, 2003, 4973: 26-33.
- Tobias Koening, Kim Alegria, Zuolan Wang, *et al.*. Macro-channel cooled high power fiber coupled diode lasers exceeding 1.2 kW of

- output power[C]. SPIE, 2011, 7918:79180E.
- 6 B Chann, R K Huang, L J Missaggia, *et al.*. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2104—2106.
- 7 Zhu Zhanda, Gou Long, Jiang Menghua, *et al.*. High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining[J]. Opt Express, 2014, 22(15), 17804—17809.
- 8 Zhu Zhanda, Gou Long, Jiang Menghua, *et al.*. High efficiency and high beam quality diode laser array by spectral beam combination[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s114008.
朱占达, 缙 龙, 姜梦华, 等. 半导体激光阵列高效率高光束质量光谱组束[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s114008.
- 9 S Heinemann, H Fritsche, B Kruschke, *et al.*. Compact high brightness diode laser emitting 500 W from a 100 μm Fiber[C]. SPIE, 2013, 8605: 86050Q.
- 10 H J Baker, J F Monjardin, P Kneip, *et al.*. 1.8 kW diode laser system for fiber-delivery using brightness-enhanced diode stacks and a novel final beam-shaper[C]. SPIE, 2005, 6876: 68760W.
- 11 Joerg Malchus, Volker Krause, Arnd Koesters, *et al.*. A 25 kW fiber-coupled diode laser for pumping applications[C]. SPIE, 2014, 8965: 89650B.
- 12 Andre Timmermann, Daniel Bartoschewski, Stephan Schlüter, *et al.*. Intensity increasing up to 4 MW/cm² with BALB's via wavelengths coupling[C]. SPIE, 2009, 7198: 71980X.
- 13 Bernd Köhler, Armin Segref, Paul Wolf, *et al.*. Multi-kW high-brightness fiber coupled diode laser[C]. SPIE, 2013, 8605: 86050B.
- 14 Zhang Zhijun, Liu Yun, Miao Guoqing, *et al.*. The 2 kW semiconductor laser processing light[J]. Chinese J Luminescence, 2013,34(3): 334—339.
张志军, 刘 云, 缪国庆, 等. 2 kW 半导体激光加工光源[J]. 发光学报, 2013,34(3): 334—339.
- 15 Hao Mingming, Qin Li, Zhu Hongbo, *et al.*. High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 895—903.
郝明明, 秦 莉, 朱洪波, 等. 基于半导体激光短阵列的 976 nm 高功率光纤耦合模块[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4) :895—903.
- 16 Gao Xin, Bo Baoxue, Qiao Zhongliang, *et al.*. Single fiber coupling of multi-linear array diode laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(7): 1229—1234.
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.
- 17 Liu Youqiang, Cao Yinhua, Gao Jing, *et al.*. The research of fiber-coupled high power diode laser [C]. SPIE, 2011, 8192:81922X.
- 18 Chen Yanrong, Guo Linhui, Gao Songxin, *et al.*. High efficiency fiber coupled diode laser module[J]. Applied Laser, 2013, 33(5):542—546.
陈艳荣, 郭林辉, 高松信, 等. 高效率光纤耦合半导体激光模块研制[J]. 应用激光, 2013, 33(5):542—546.
- 19 Tan Hao, Guo Linhui, Gao Songxin, *et al.*. kW-output fiber coupled diode laser module[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(11): 2581—2584.
谭 昊, 郭林辉, 高松信, 等. kW 级光纤耦合输出二极管激光器模块[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(11): 2581—2584.
- 20 Yu Junhong, Guo Linhui, Wang Zhao, *et al.*. High brightness fiber coupled diode laser module with 200 W class output power[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11): 26111001.
余俊宏, 郭林辉, 王 昭, 等. 200 W 级高亮度半导体激光器光纤耦合模块[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 26111001.

栏目编辑: 宋梅梅