

文章编号 1004-924X(2013)04-0829-06

10 kW 连续输出半导体激光熔覆光源

朱洪波¹, 张金胜^{1,2}, 马 军¹, 秦 莉^{1*}, 宁永强¹, 王立军¹
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对于目前国内半导体激光加工熔覆光源主要依赖于国外进口的局面, 研制了连续输出功率达 10 kW 的半导体激光熔覆光源。利用 ZEMAX 光学设计软件模拟半导体激光光路, 包括光束整形、准直及聚焦透镜的设计等。实验中采用 2 只波长为 915 nm 和 2 只波长为 976 nm 的半导体激光叠阵, 通过偏振合束和波长合束技术实现它的合束。由自行设计的聚焦系统进行了聚焦实验, 结果显示, 当模块工作电流为 122 A 时, 光源最大输出功率为 10 120 W, 电-光转换率为 46%, 在工作面的聚焦光斑为 2.5 mm×18 mm, 可满足工业中大面积高速激光熔覆和表面热处理的要求。

关键词: 半导体激光器; 激光熔覆; 激光合束

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0829

10 kW CW diode laser cladding sources

ZHU Hong-bo¹, ZHANG Jin-sheng^{1,2}, MA Jun¹, QIN Li^{1*}, NING Yong-qiang¹, WANG Li-jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: qinl@ciomp.ac.cn*

Abstract: As civil diode laser cladding sources rely heavily on import from the occident, this paper developed a diode laser source which could continuous output ten thousands of watt powers. The light paths of the diode laser was simulated by ZEMAX, including the designs of beam arrangement, collimation lens and focus units. Four diode laser stacks with wavelengths of 915 nm and 976 nm respectively were used in an experiment and their beams were combined by the technologies of polarization combination and wavelength combination. A focusing experiment was performed by the focusing system developed by oursevels and the experiment results show that when an current of 122 A is inputted, the output power and the total electrical-optical conversion efficiency of this laser cladding source are 10 120 W and 46%, respectively, and the beam spot size is 2.5 mm×18 mm at working surface. This diode laser source can meet the need of large area and rapid laser cladding and heat treatment in industry.

Key words: diode laser; laser cladding; laser beam combination

收稿日期: 2013-03-08; 修订日期: 2013-03-28.

基金项目: 中国博士后科学基金第 52 批面上项目; 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 201105025, No. 20116011)

1 引言

在激光加工应用中,传统的 CO_2 气体激光器及固体激光器均存在电光转换效率低,单位能耗高等缺点,不能满足国家节能减排的要求。随着半导体激光器封装技术及合束技术的逐渐成熟,半导体激光器凭借电光转换效率高、能耗低、寿命长等优点,被越来越多地应用在激光熔覆、热处理、表面硬化等领域^[1-3]。因此,半导体激光熔覆光源的研制也成为了国内外研究的热点^[4-5]。

在工业用大功率半导体激光熔覆光源的研制方面,欧美国家位居世界前列。针对激光加工中对不同功率光源的需求,美国 Coherent 公司研发出输出波长为 976 nm,功率达 2~8 kW 的半导体激光熔覆光源,光斑尺寸为 $1\text{ mm} \times 3\text{ mm} \sim 1\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 可调,整机效率为 40%。德国 laserline 公司研制出波长为 976 nm,输出功率为 1~10 kW 的半导体激光熔覆光源,其聚焦光斑以直径为 2~4 mm 的圆斑或者 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, $1\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 等多种尺寸输出,电光转换效率达 50%,可实现工业大面积高速激光熔覆。国内在大功率半导体激光的制备、合束及高热流密度器件散热等技术的研究中存在许多尚未解决的问题,因此所研发的半导体激光熔覆光源与国外相比还有一定差距。目前,西安炬光^[6]、北京工业大学等单位在半导体激光熔覆光源的研究中取得了一些进展^[7-8],所研制光源的输出功率为 1~3 kW,还不能完全满足工业大面积高速激光熔覆、表面热处理的要求。

本文通过偏振合束和波长合束技术将 2 对波长分别为 915 nm 和 976 nm 的半导体激光叠阵进行合束,制备了一个 10 kW 的大功率半导体激光熔覆光源。该光源在 122 A 的工作电流下,最大输出功率为 10 120 W,电光转换效率为 46%,工作面聚焦光斑为 $2.5\text{ mm} \times 18\text{ mm}$,可满足激光加工要求。

2 实验原理

实验中使用的半导体激光叠阵由 25 层 bar 条组成,每层 bar 条上有 49 个发光单元,bar 条的宽度为 10 mm,每个发光单元的尺寸为 $100\text{ }\mu\text{m}$,

发光单元之间的周期为 $200\text{ }\mu\text{m}$,相应的快轴和慢轴的发散角为 $70^\circ \times 10^\circ$ (90% 能量分布)。由于快慢轴方向的光束具有较大的发散角,因此需要对激光器的快慢轴进行准直,以尽可能地减小快慢轴方向的发散角。快轴准直镜 (Fast Axis Collimator, FAC) 采用焦距为 0.9 mm 的非球面柱面微透镜,图 1 为半导体激光叠阵快轴的准直模拟。由于 bar 条慢轴方向的填充因子为 50%,每个发光单元周期较短,使用微透镜阵列无法得到较好的准直效果,因此本文采用自行设计的双分离准直透镜。该透镜的焦距为 200 mm,叠阵的出光面被安置于双分离准直透镜的后焦点对半导体激光 bar 条进行整体准直。通过 ZEMAX 光学设计软件对半导体激光叠阵的准直情况进行模拟,准直结果如图 2 所示。

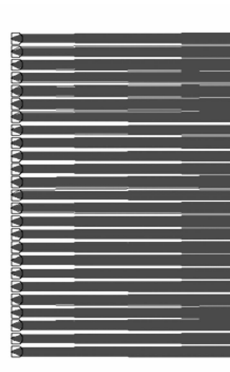


图 1 半导体激光叠阵快轴准直模拟

Fig. 1 Simulation of fast axis collimation of diode laser stack

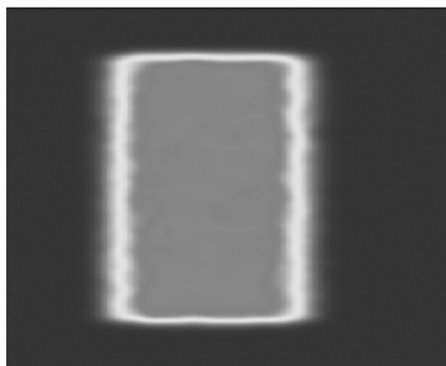


图 2 快慢轴准直后的输出光斑模拟

Fig. 2 Simulation of output spot for diode laser stack after fast and slow axis collimations

经过准直后,快轴发散角为 0.2° (90% 能量分布),慢轴发散角为 1.5° (90% 能量分布),如图 3 所示。

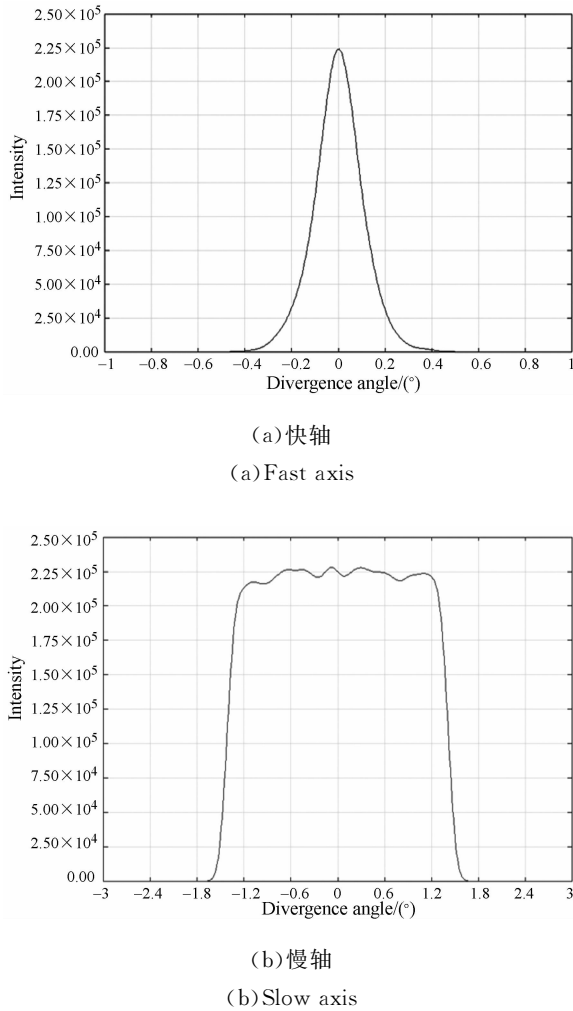


图 3 准直后半导体激光叠阵的发散角

Fig. 3 Divergence angles of diode laser stack after collimation

由于单只半导体激光叠阵的输出功率较低,因此需要通过偏振合束和波长合束技术来提高光源的输出功率。偏振合束和波长合束都是在原有光斑尺寸大小上进行叠加,在不改变光束质量的前提下将输出功率提高 2 倍。由于所用的半导体激光叠阵均为 TE 模式,即磁场矢量振动方向垂直于 p-n 结平面,为 p 偏振光,因此,需要通过半波片将其中一个激光叠阵的偏振态改成 s 偏振。在偏振合束中,常用的合束器件为薄膜干涉型偏振合束片,利用光束以布儒斯特角入射到薄膜界面时,p 偏振光的反射率为 0 这一性质,在偏振合束片的表面镀上高低折射率交替的多层介质膜。

当光束经过多层薄膜后,绝大部分 p 偏振光透过,绝大部分 s 偏振光被反射。由于偏振合束时 p 偏振态的光束和 s 偏振态的光束以 45° 角入射到偏振合束片,其入射角度与布儒斯特角有一定的误差,因此 p 偏振光束的透射率约为 95%,s 偏振光束的反射率大于 99%,这样就实现了同一波长、不同偏振态的两光束的合束。偏振合束片的透过率曲线和反射率曲线如图 4 所示^[9]。

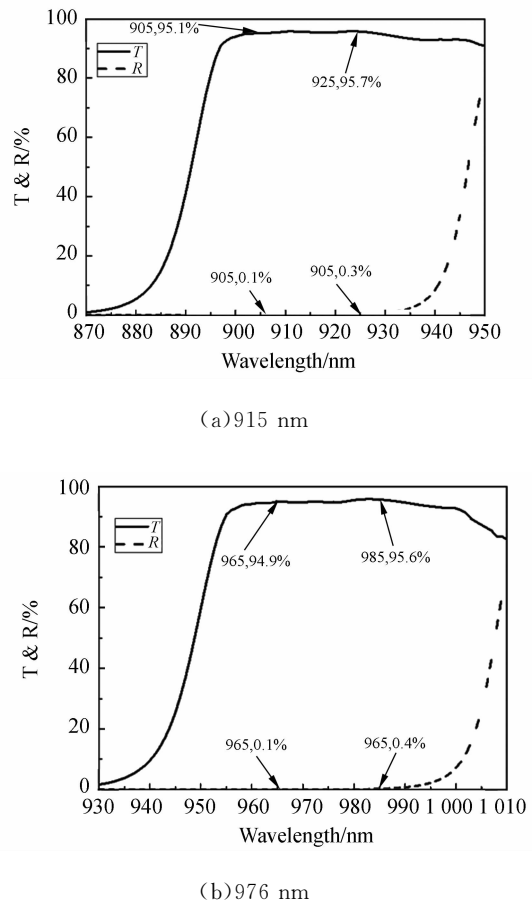


图 4 偏振合束片的透过率和反射率曲线

Fig. 4 Transmissivity and reflectivity curves of polarization combination plate

为了进一步提高光源的输出功率,采用波长合束技术将经过偏振合束后得到的波长不同的两束光进行波长合束。波长合束片的透过率和反射率曲线如图 5 所示。当两种波长的半导体激光束以 45° 角入射到波长合束片时,915 nm 的光透过率约为 95%,而 976 nm 的光反射率超过 99%,这样就使两束不同波长的光束在经过波长合束片时分别发生透射和反射进而实现波长合束。

本实验设计了三片结构的聚焦镜组对合束后

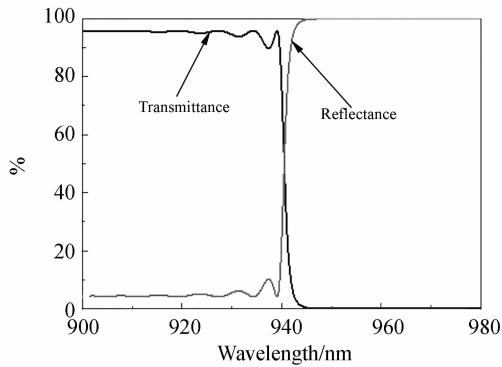


图 5 波长合束片的曲线图

Fig. 5 Transmissivity and reflectivity curves of wavelength combination film

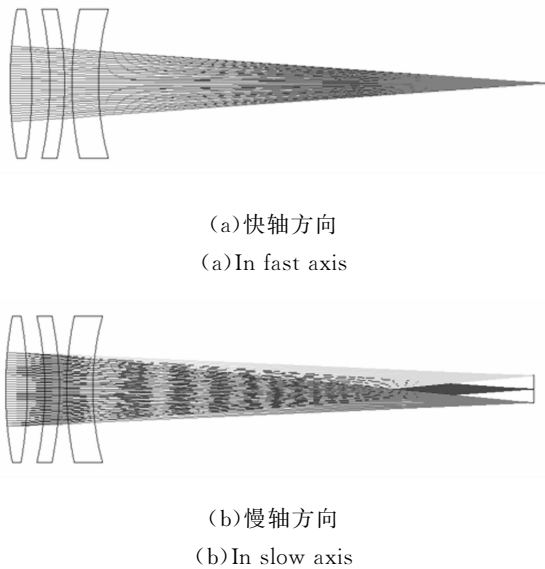


图 6 合束光束聚焦情况模拟

Fig. 6 Simulation of focusing of combination beam



图 7 聚焦光斑模拟图

Fig. 7 Simulation of focal spot

的光束进行聚焦,根据激光熔覆光源在激光加工中工作距离的要求,聚焦镜组的焦距设为 300 mm。图 6 为光束在快慢轴方向的聚焦情况。由图可以看出,由于光束准直后快慢轴方向的发散角不相等,在焦平面处快慢轴的光斑也不相等。聚焦光斑的尺寸为 2 mm×18 mm,如图 7 所示。

3 实验结果

实验采用的半导体激光叠阵由 25 层 bar 条组成,每层 bar 条在 122 A 电流下的输出功率为 110 W,所以在注入电流为 122 A 时,每只叠阵的输出功率达到 2 750 W。经过精密调试,最终将 4 只半导体激光叠阵合束并聚焦,制作的半导体激光熔覆光源如图 8 所示。

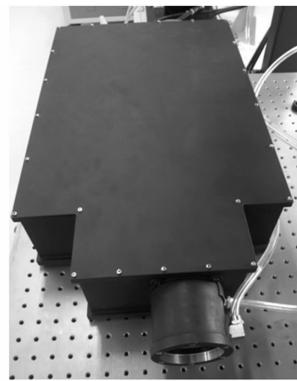


图 8 半导体激光熔覆光源

Fig. 8 Source of diode laser cladding

在室温下测得不同工作电流下熔覆光源的输出功率,得到的 P-I 特性曲线如图 9 所示。当工作电流为 122 A 时,光源的输出功率为 10 120 W,电光转换效率为 46%。

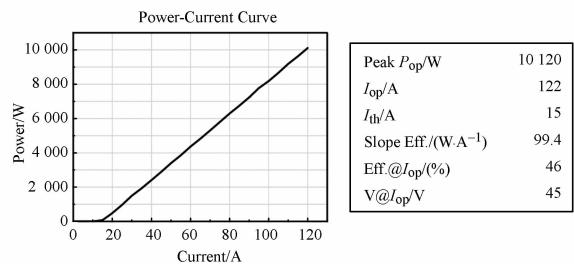
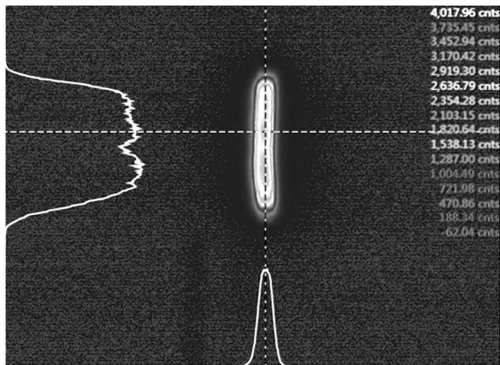


图 9 光源的 P-I 特性曲线

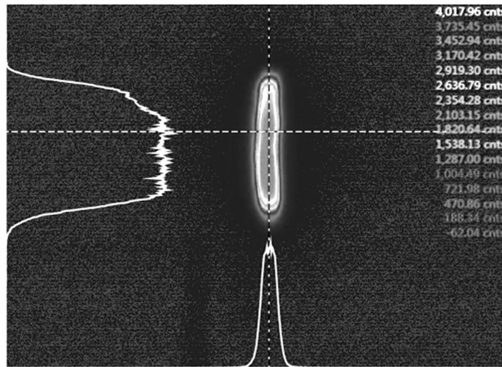
Fig. 9 P-I curve of laser source

本文采用 Spiricon 光束质量分析仪对聚焦光斑进行测量。由于激光的功率太强,这使测量工



(a) 单只半导体激光叠阵的聚焦光斑

(a) Focusing spot from single-diode laser stack



(b) 两只半导体激光叠阵合束后的聚焦光斑

(b) Focusing spot from two-diode laser stack

图 10 采用光束质量分析仪采集的聚焦光强分布

Fig. 10 Energy distribution after beam focusing with beam quality analyzer

作变得较为复杂,因此仅测量了两路激光的合成光斑,如图 10 所示。图 10(a)是单只半导体激光叠阵工作时的聚焦光斑图,图 10(b)是两只导体激光叠阵通过偏振合束后的聚焦光斑图。由图可知,两只半导体激光叠阵的光斑在空间上完全重合。

通过光束质量分析仪测出快慢轴方向的光斑尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 。由于叠阵中每个 bar 条存在 smile 效应;而且在进行快轴准直时,叠阵中的每层光束都存在指向性误差,这两个因素会导致快轴光束的发散角过大,从而使快轴方向的聚焦光斑尺寸偏离理论值^[10-11]。

4 结 论

本文通过采用偏振合束和波长合束技术将 2 只波长为 915 nm 的半导体激光叠阵和 2 只波长为 976 nm 的半导体激光叠阵进行合束,研制出万瓦级的半导体激光熔覆光源。在 122 A 的工作电流下,该光源的最大输出功率为 10 120 W,电光转换效率达 46%,工作面的聚焦光斑为 $2.5 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$,可满足工业制造中大面积高速激光熔覆和表面热处理的要求。在国内如此大功率的半导体激光熔覆光源的成功研制尚属首次,下一步的研究将针对万瓦级半导体激光光源光束质量的改善以及光源的可靠性展开。

参考文献:

- [1] DORSCH F, DAIMINGER F X, HENNIG P, *et al.*. 2 kW cw fiber-coupled diode laser system[J]. *Proc. of SPIE*, 2000, 3889: 45-53.
- [2] 彭航宇, 顾媛媛, 朱洪波, 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(2):1-6.
PENG H Y, GU Y Y, ZHU H B, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(2):1-6. (in Chinese)
- [3] WERNER M, WESSLING C, HENGESBACH S, *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: 1-7. (in Chinese)
- [4] 单肖楠, 刘云, 曹军胜, 等. 808 nm 千瓦级高效大功率半导体激光光源[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 452-456.
- [5] SHAN X N, LIU Y, CAO J SH, *et al.*. 808 nm kW-output high-efficiency diode laser source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 452-456. (in Chinese)
- [6] DAVID H, MARCO H, RUDIGER B, *et al.*. Dramatic advances in direct diode lasers [J]. *SPIE*, 2010, 7583:1-6.
- [7] XIONG L L, WANG M, WANG X B, *et al.*. 3000 W CW diode laser cladding system [J]. *SPIE*, 2012, 8241:82416-1-9.
- [8] 刘友强, 曹银花, 潘飞, 等. 激光加工用半导体激光器的光束变换[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 455-461.

- LIU Y Q, CAO Y H, PAN F, *et al.*. Beam transformation of diode lasers used in laser processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 455-461. (in Chinese)
- [8] 陈虹, 王旭葆. 制造用高功率激光器光束质量的评价与测量[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 298-303.
- CHEN H, WANG X B. Evaluation and measurement of beam quality of high power manufacturing laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 298-303. (in Chinese)
- [9] 朱洪波, 郝明明, 王立军, 等. 基于 808 nm 的半导体激光器单管合束技术的光纤耦合模块[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 1-5.
- ZHU H B, HAO M M, WANG L J, *et al.*. Module of fiber coupled diode laser based on 808 nm single emitters combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, 39(5): 1-5. (in Chinese)
- [10] 朱洪波, 郝明明, 王立军, 等. 808 nm 高亮度半导体激光器光纤耦合器件[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1684-1690.
- ZHU H B, HAO M M, WANG L J, *et al.*. 808 nm high brightness module of fiber coupled diode laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1684-1690. (in Chinese)
- [11] 朱洪波, 刘云, 郝明明, 等. 高效率半导体激光器光纤耦合模块[J]. *发光学报*, 2011, 32(11): 1147-1151.
- ZHU H B, LIU Y, HAO M M, *et al.*. High efficiency module of fiber coupled diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(11): 1147-1151. (in Chinese)

作者简介:



朱洪波(1984—),男,吉林长春人,博士后,2003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纤耦合的研究。E-mail: zhbciomp@163.com



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,主要从事大功率垂直腔面发射激光器及应用方面的研究。E-mail: qinlicomp@yahoo.com.cn



张金胜(1986—),男,河南新乡人,博士研究生,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: zhangjs.ciomp@gmail.com



宁永强(1965—),男,吉林人,研究员,博士生导师,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn



马军(1960—),男,吉林长春人,研究员,主要从事精密光机检测技术和光学仪器的研究。E-mail: majun@ciomp.ac.cn



王立军(1946—),男,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn