

文章编号 1004-924X(2012)03-0455-07

激光加工用半导体激光器的光束变换

刘友强¹, 曹银花^{1*}, 潘飞¹, 高静¹, 秦文斌¹, 刘世光², 王智勇¹

(1. 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124; 2. 山东昌邑供电公司, 山东 潍坊 261300)

摘要: 考虑不同的激光加工方式对激光功率密度和激光光斑尺寸的要求不同, 研究了如何通过调整光路设计实现各种尺寸的聚焦光斑输出, 使半导体激光器满足不同激光加工方式的需求。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、聚焦等光束变换方式, 实现了多种尺寸的光斑输出。实验中采用 16 个 bar 叠加而成的 980 nm 半导体激光叠阵, 阈值电流为 6.4 A, 最大工作电流为 84.8 A, 最大输出功率为 1 280 W, 总的电-光转换效率为 58.9%。准直后快轴的发散角小于 4 mrad, 慢轴的发散角小于 20 mrad。通过实验对该激光叠阵进行光束整形和扩束准直、聚焦, 最终实现了功率为 1 031 W 的激光输出, 聚焦镜焦距为 300 mm 时的聚焦光斑尺寸达 1.2 mm × 1.5 mm, 功率密度达 3.8×10^4 W/cm², 可以用于金属的表面重熔、合金化、熔覆和热导型焊接。

关键词: 激光加工; 半导体激光器; 光束整形; 光束质量; 矩形光斑

中图分类号: TN248.4; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0455

Beam transformation of diode lasers used in laser processing

LIU You-qiang¹, CAO Yin-hua^{1*}, PAN Fei¹, GAO Jing¹, QIN Wen-bin¹, LIU Shi-guang², WANG Zhi-yong¹

(1. *Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

2. Shandong Changyi Electric Supply Company, Weifang 261300, China)

** Corresponding author, E-mail: liuyouqiang@emails_bjut.edu.cn*

Abstract: As diode laser processing for different processing technologies demands different power densities and spot sizes, this paper researched how to get focus spot outputs with different sizes by adjusting optical path design to meet the requirements of various laser applications. By using ZEMAX to simulate the diode laser optical path, including beam shaping, collimation, focus, etc., several kinds of spot outputs with various sizes was implemented. In the experiment, a 980 nm diode laser stack with the superposition of 16 bars was used by a threshold current of 6.4 A, the maximum operating current of 84.8 A, maximum output power of 1 280 W, and the total electrical-optical conversion efficiency of 58.9%. After collimation, the divergence angles for the fast axis and slow axis are less than 4 mrad and 20 mrad, respectively. Finally, the experiments were performed on the diode laser stack by the beam shaping, collimation and focusing, and a power output of 1 031 W is obtained. Furthermore, the focused spot size has been 1.2 mm × 1.5 mm and the laser power density is up to 3.8×10^4 W/cm² when the focal length of focusing mirror is 300 nm. Results show that the laser stack can be

收稿日期: 2011-10-11; 修订日期: 2011-11-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61006040); 2009 年教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (No. NCET-09-0002); 北京市教育委员会科技计划重点项目 (No. KZ201010005006); 工业用高功率全光纤激光器的开发 (No. 2010ZX04013-052)

used in remelting, alloying, cladding and thermal conductivity-type welding for metal surfaces.

Key words: laser processing; diode laser; beam shaping; beam quality; rectangular spot

1 引言

半导体激光器具有电光转换效率高、体积小、寿命长、功耗低、可靠性高等优点,与传统的固体及气体激光器相比有很大的优势,在国防、工业、科研领域都得到了广泛应用。随着输出功率的不断提高,半导体激光器的应用领域也随之不断扩大,特别是随着工业加工领域对大功率激光需求的不断增长,半导体激光器在激光市场中的份额进一步增加。近年来,随着电光转换效率的提高、输出光束质量的改善和输出功率的增加,大功率半导体激光器越来越多地被直接应用于材料加工领域,以达到提高稳定性、减少能源消耗和降低运行、维护成本的目的,在许多领域甚至已经取代了传统的固体和 CO_2 激光器。

在工业用大功率直接半导体激光器的研制方面,德国的 Laserline、Rofin、Trumpf 等公司处于世界先进水平。Laserline 的 LDL80 系列直接半导体激光器功率为 1 200 W,焦距为 100 mm 时光斑尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$;功率为 2 200 W,焦距为 100 mm 时光斑尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ 。Rofin 公司 DL-Q 系列直接半导体激光器功率为 1 400 W,焦距在 66 mm 时光斑尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$;功率为 2100 W,焦距在 66 mm 时光斑尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$,而且 DL-Q 系列的半导体激光器能够很好地适应激光焊接、熔覆、钎焊、表面处理等方面的应用,光束可以聚焦成矩形、方形甚至圆形;Trumpf 公司的 TruDiode 系列半导体激光器 2009 年能够实现 1~3 kW 的激光输出,2010 年已经能够实现 4 kW 的激光输出^[1]。

金属材料的激光加工主要是基于光热效应的热加工,在不同功率密度的激光作用下,材料表面将发生不同的变化。当激光功率密度小于 10^4 W/cm^2 时,主要用于零件表面退火和相变硬化处理。当激光功率密度在 $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,主要用于金属的表面重熔、合金化、熔覆和热导性焊接^[2]。不同的激光加工方式不仅对激光功率密度的要求不同,同时对激光光斑尺寸的要求也有不同,特别是激光表面处理,不仅需要均匀分布的光强,更需要几何尺寸合适的光斑。激光切割需要

0.2~0.6 mm 的光斑,激光焊接需要 0.5~3 mm 的光斑,激光熔覆需要 1~6 mm 的光斑,钎焊需要 1.5~3.5 mm 的光斑,表面硬化需要 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的矩形光斑,而半导体激光器自身光斑的特点决定了它更容易满足这方面的需求。本文通过 ZEMAX 模拟了半导体激光器的整形和准直,得到了半导体激光器线性光斑、方形光斑和矩形光斑。

2 激光光束整形原理

2.1 半导体激光光束特性

半导体激光器的结构形式多种多样,有双异质结半导体激光器、条形半导体激光器、量子阱半导体激光器、分布反馈半导体激光器等。本文所讨论的半导体激光器为宽发射面双异质结构的半导体激光阵列。一个宽面发光单元的结构如图 1 所示,垂直于有源区结平面的方向为激光器的快轴方向,平行于有源区结平面的方向为激光器的慢轴方向。

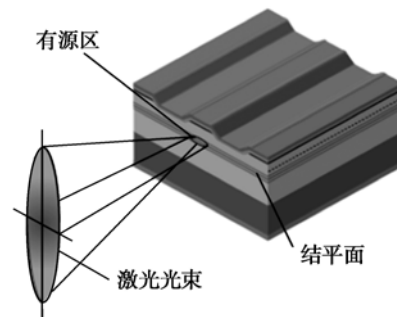


图 1 单个宽面发光单元的结构示意图

Fig. 1 Schematic figure of single broad area emitter

与其他激光器相比,半导体激光器阵列结构的特殊性决定了半导体激光器快、慢轴的光束质量不一致。快轴的光束质量接近衍射极限,慢轴的光束质量比较差。发光单元快轴方向的尺寸为 $1 \mu\text{m}$,慢轴方向的尺寸为 $100 \mu\text{m}$ 。准直前,快轴的发散角在 90° 左右,接近衍射极限,慢轴的发散角在 10° 左右,而且两个方向上半导体激光的光束束腰不在同一位置,出射光束在各自的发散角内的光强分布不均匀,在远场为椭圆形光斑。半导体激光叠阵的远场分布也具有同样的空间分布特性。这种光斑分布的不均匀性,使得半导体激

光必须经过光学系统的整形之后才能使用。

2.2 光束整形原理

半导体激光光束特殊的光强分布使得光束必须经过光束变换才能达到实际应用的需求。光束变换(即光束整形)包括对激光光束进行快慢轴准直、光束的切割旋转重排、光束的扩束及聚焦等。

半导体激光光束的准直包括快轴准直和慢轴准直,是通过快轴准直微透镜阵列(Fast Axis Collimator, FAC)和慢轴准直微透镜阵列(Slow Axis Collimator, SAC)来实现的。半导体激光出射后,在经过任何光学元件时,光束在快轴方向的发散角很大,经过椭圆柱面型的快轴准直微透镜阵列准直后,使快轴发散角大大减小,达到几个毫弧度量级。

光束的切割旋转重排是通过特殊光学元件将慢轴的光束分成 N 段,使光束的传输方向发生改变,被分开的 N 段光束在传输路径上重新排列,从而使快慢轴的光束质量接近均匀化,常用的方法有阶梯反射镜法、微片棱镜堆线束整形法、折射整形法、倾斜 45° 柱面镜阵列整形法等。基本的光束切割旋转重排过程如图 2 所示,条形光斑 a 经过一次旋转之后变成光斑 b,再经过一次旋转变成光斑 c。

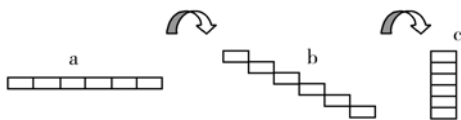


图 2 光束的切割旋转重排示意图

Fig. 2 Diagram of beam shaping with rotation and cutting

光束的扩束准直是通过扩束镜将激光束的直径扩大,同时减小激光束的发散角,达到进一步准直的目的,从而为后续的聚焦提供平行光束。快轴和慢轴方向的光束可以分别进行扩束,从而使激光光斑在快慢轴方向的尺寸比例不同,进而满足不同的应用需求。

3 ZEMAX 仿真模拟

3.1 ZEMAX 软件介绍

ZEMAX 是美国 Focus Software 公司开发的光学设计和仿真分析软件,具有强大的激光束传输仿真功能,并提供了序列和非序列 2 种光线追

迹模式。其中,序列模式使用物理光学传播来定义高斯光束;非序列模式有多种光源模型,包括高斯光束、半导体高斯光束、椭圆高斯光束等。由于非序列追迹模式可以考虑杂散光等情况,更符合实际激光束的情况,因此采用此追迹模式来进行多模高斯光束拟合。基准光源类型选用 Source Diode,其横向及纵向的发散角可控,通过多光源叠加来实现拟合^[3-5]。

3.2 半导体激光建模

在 ZEMAX 软件非序列模式下,光源类型选择 Source Diode,将光源设为 16 个 bar, X 方向发光点个数设置为 19 个,即填充因子为 20%,发光点沿慢轴方向的尺寸为 $100 \mu\text{m}$,发光点在慢轴方向的周期为 $500 \mu\text{m}$ 。快轴发散角对应的数值孔径为 0.6,对应的快轴发散角为 36.8° ;慢轴渐晕系数为 0.854,对应的慢轴发散角为 5° 。

3.2.1 快慢轴准直

为简化优化过程,在序列模式下,对单个发光点进行模拟,快慢轴准直镜分别选用 N-LAF21 和 B270 材料,快轴的曲面选择 toroidal 面型,慢轴的曲面选择 biconic 面型,并将面型的曲率设为变量,以快慢轴焦距及出射光线余弦为 1 作为优化目标,Lens Data Editor 如图 3 所示。

Surf. Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	0.000000		0.000000
S10	Standard	Infinity	0.000000		0.000000
2	Standard	Infinity	0.086893		0.000000
3	Standard	Infinity	1.500000	N-LAF21	0.750000
4	Toroidal	-0.694884	0.541958		0.527518
5	Standard	Infinity	1.000000	B270	0.527705
6	Biconic	Infinity	10.000000		0.527868
IMA	Standard	Infinity	-		0.530348

图 3 快慢轴准直镜优化过程的透镜参数设置

Fig. 3 Lens Data Editor (LDE) of optimization process of FAC and SAC

将优化得到的快慢轴准直镜的面型数据拷入非序列模式下,对 16 个 bar, 19 emitter/bar 的 Source Diode 光源进行准直,准直效果如图 4 所示:

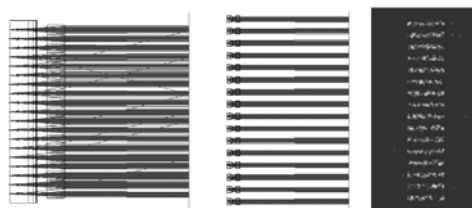


图 4 快慢轴准直效果图

Fig. 4 Collimating effect of FAC and SAC

经过准直以后,快轴发散角 <4 mrad,慢轴发散角 <20 mrad。

3.2.2 线性聚焦光斑

选用焦距 200 mm 的聚焦镜,对经过快慢轴准直后的光束进行聚焦,聚焦后的光斑及快慢轴能量分布如图 5 所示。快轴方向的 16 个 bar 全部重合合成一个光斑,呈现出理想的高斯分布,光斑边界非常清晰;但在慢轴方向,光斑拖尾比较严重,无明显的边界。

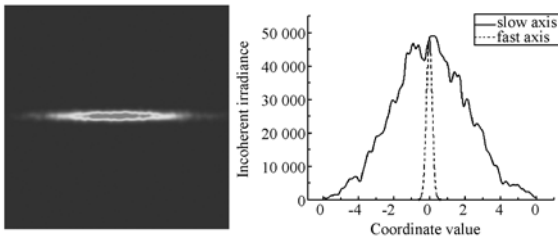


图 5 经 200 mm 聚焦镜后的光斑及能量分布

Fig. 5 Beam shape and energy distribution after 200 mm focal lens

由于这种光斑慢轴能量分布均匀性较差,仍然难以满足应用的需求,故在 200 mm 聚焦镜后面加入一个焦距 300 mm 的柱面镜对慢轴光束进行准直,光路如图 6 所示。

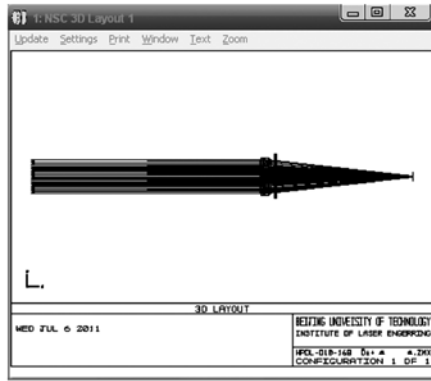


图 6 加聚焦镜和柱面镜后的光路图

Fig. 6 Light path of laser after focal lens and cylindrical lens

加了柱面镜后的光斑情况有明显改善,聚焦光斑尺寸为 $0.6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,光斑的快轴分布仍然为高斯分布,慢轴分布接近平顶光束,最高点的能量密度达到 $4.4 \times 10^4 \text{ W/cm}$,如图 7 所示。这种分布的光斑能够满足熔覆、表面硬化等方面的需求。

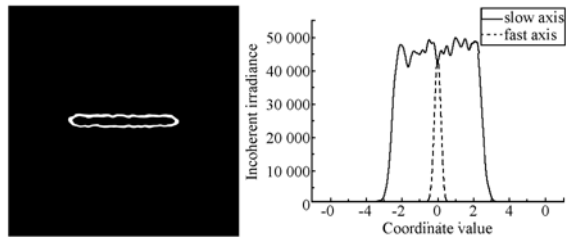


图 7 经聚焦镜和柱面镜后的光斑及能量分布

Fig. 7 Beam shape and energy distribution after focal lens and cylindrical lens

慢轴方向的尺寸可以通过扩束镜进行调整。通过扩束镜将慢轴的尺寸由 10 mm 扩束到 30 mm,然后再通过焦距 200 mm 的聚焦镜聚焦,可以得到 $0.6 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ 的聚焦光斑,最高点的能量密度达到 $6.5 \times 10^4 \text{ W/cm}$,光路如图 8 所示,光斑及能量分布如图 9 所示。

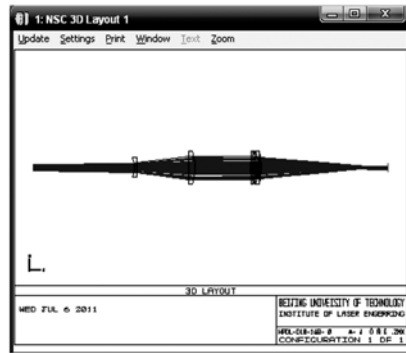


图 8 加扩束镜和聚焦镜后的光路图

Fig. 8 Light path of laser after expander lens and focal lens

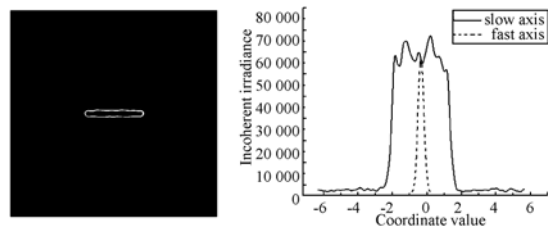


图 9 经扩束镜和聚焦镜后的光斑及能量分布

Fig. 9 Beam shape and energy distribution after expander lens and focal lens

3.2.3 矩形聚焦光斑

将慢轴尺寸继续减小有 2 种方案,一种是选用 mini bar,第二种方案是将 10 mm 长的慢轴进行切割重排,如可将 bar 间距 1.8 mm 的光斑切

割成 2 份进行重排,然后再进行扩束聚焦^[6-7]。根据应用需要,甚至可以将慢轴光斑分成更多份,从而将光斑聚焦成近似方形。

将慢轴光斑分成 4 份,然后扩束聚焦,聚焦光斑尺寸为 0.6 mm×1 mm,快轴和慢轴能量的包络近似重合,均为近高斯分布,最高点的功率密度达到 2.9×10^5 W/cm,光斑及能量分布图如图 10 所示。

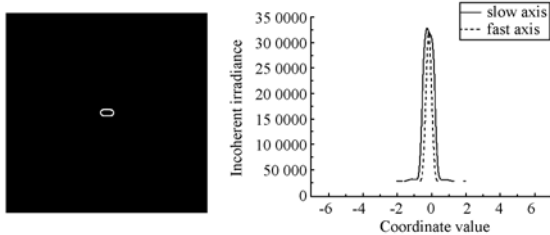


图 10 将慢轴光斑进行分段后的光斑及能量分布
Fig. 10 Beam shape and energy distribution after cutting slow-axis beam into segments

4 实验与结果

通过自行设计,对 ZEMAX 模拟的矩形聚焦光斑的情况进行了实验。实验过程中采用由 16 个 bar 组成的 980 nm 波长半导体激光叠阵,叠阵装有快慢轴准直微透镜,中心波长为 983.3 nm,单 bar 输出功率为 80 W,阈值电流为 6.4 A。在工作电流为 84.8 A 时,输出功率为 1 280 W,斜效率为 17.29 W/A,相应的电光转换效率为 58.2%,采用的测试设备为 OPHIR 公司的 5 000 W 水冷功率计。考虑到激光器的寿命,电源的最大工作电流设定到 80 A,注入电流为 80 A 时,裸 bar 的输出功率为 1 207 W。

利用三角形结构的快慢轴光束参数乘积匀称化装置(专利号:200 810 056 016.9)来完成光束整形,将 16 个 bar 的叠阵沿慢轴方向分割成 4 份,然后对慢轴方向进行 3 倍准直扩束,减小慢轴发散角,最后通过 300 mm 聚焦镜进行聚焦,聚焦光斑大小约为 1.2 mm×1.5 mm。

对经过光束变换后的激光功率进行测量,功率测试过程如图 11 所示。将功率计放置在离焦位置,每隔 10 A 测量一次功率,测试的 P-I 曲线

如图 12 所示。当注入电流为 80 A 时,经过聚焦镜后激光输出的最高功率为 1 031 W,光-光效率为 85.4%。

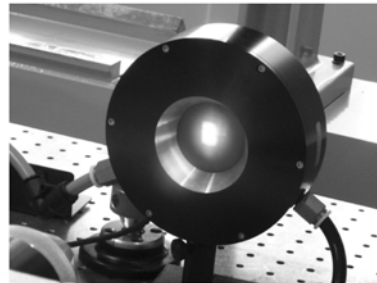


图 11 功率测量过程图
Fig. 11 Photo of power test

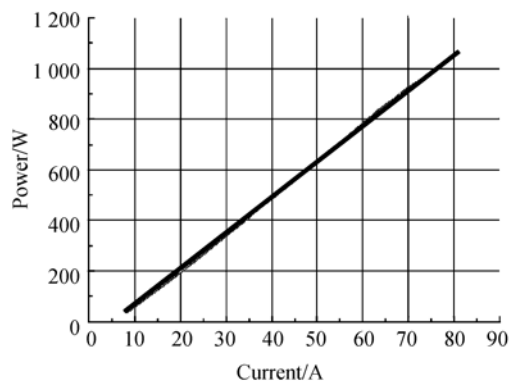


图 12 P-I 测试曲线图
Fig. 12 Laser power versus operating current

最终,本课题组将这种半导体激光光束变换思想转化为实际的半导体激光器产品,半导体激光器在实际加工中的应用如图 13 所示。



图 13 半导体激光器在实际加工中的应用
Fig. 13 Application of diode lasers in laser welding

半导体激光作用于金属表面的效果如图 14 所示,从加工的效果看,金属表面基本无飞溅产

生,焊缝比较均匀,因为与固体激光器和 CO₂ 激光器相比,半导体激光器的光斑更近似于平顶,同样的功率下,光斑峰值功率密度偏低,能量密度分布更加均匀,更适合于金属的表面重熔、合金化、熔覆和热导型焊接等。

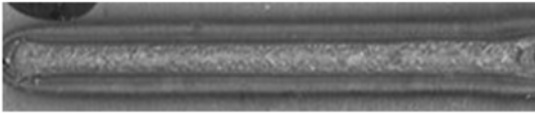


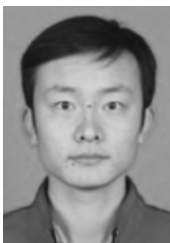
图 14 半导体激光作用于金属表面效果图

Fig. 14 Effect of diode laser acting on metal surface

参考文献:

- [1] DAVID H, MARCO H, RÜDIGER B. Dramatic advances in direct diode lasers [J]. *SPIE*, 2010, 7583:75830B-1-6.
- [2] 左铁钊. 21 世纪的先进制造-激光技术与工程[M]. 北京:科学技术出版社,2007.
ZUO T CH. *Twenty-first Century Advanced Manufacturing-laser Technology and Engineering* [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2007.
- [3] 雷平顺,薛丽芳,何军,等. ZEMAX 在多模光纤准直器设计中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2011,48(010605):010605-1-4.
LEI P SH, XUE L F, HE J, *et al.*. Design of multi-mode fiber collimator with ZEMAX [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011,48(010605): 010605-1-4. (in Chinese)
- [4] 韩冰,纪雷刚,赵廷磊,等. 基于 ZEMAX 的多模高斯光束拟合[J]. *科技创新导报*, 2009,9:25-26.
HAN B, JI L G, ZHAO Y L, *et al.*. Gaussian beam fitting based on ZEMAX [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009, 9 : 25-26. (in Chinese)
- [5] 叶锦函,郝晓剑,周汉昌,等. 基于 ZEMAX 的激光光束整形技术试验研究[J]. *工程与试验*, 2010, 50 (3):46-48.
YE J H, HAO X J, ZHOU H CH, *et al.*. Study on laser beam shaping technology based on ZEMAX [J]. *Engineering and Test*, 2010, 50(3):46-48. (in Chinese)
- [6] 彭宇航,顾媛媛,单肖楠,等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. *中国激光*, 2011,2(38): 0202010-1-6.
PENG Y H, GU Y Y, SHAN X N, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011,2(38):0202010-1-6. (in Chinese)
- [7] 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.
SHAN X N, LIU Y, CAO J SH, *et al.*. 808 nm KW-output high-efficiency diode laser sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 452-456. (in Chinese)

作者简介:



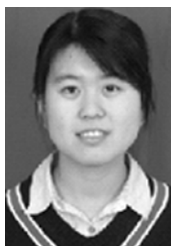
刘友强(1982—),男,山东潍坊人,博士研究生,2010 年于北京工业大学获得硕士学位,主要从事大功率半导体激光技术及光纤耦合技术的研究。E-mail: liuyouqiang@emails.bjut.edu.cn



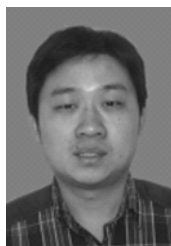
潘飞(1984—),男,湖北荆门人,博士研究生,2011 年于北京工业大学获得硕士学位,主要从事半导体激光器封装及准直技术的研究。E-mail: panfei2008@emails.bjut.edu.cn

5 结 论

通过实验对半导体激光叠阵进行光束切割重排、扩束准直和聚焦,最终实现了功率 1 031 W 的激光输出,聚焦镜焦距为 300 mm 时的聚焦光斑尺寸为 1.2 mm×1.5 mm,功率密度达到 3.8×10⁴ W/cm²,可以用于金属的表面重熔、合金化、熔覆和热导型焊接。要想进一步普及半导体激光器在激光加工领域的应用,光束的整形、变换和耦合技术仍然是今后发展的主要方向。



高 静(1988—),女,山东临沂人,博士研究生,2009年于曲阜师范大学获得光学理学学士学位,主要从事半导体激光器光束变换方面的研究。E-mail: gaojinggigi@emails. bjut. edu. cn



刘世光(1980—),男,山东潍坊人,助理工程师,2010年于山东大学获得硕士学位,主要从事电气控制方面的研究。E-mail: lsg2002@sina. com



秦文斌(1981—),男,河北石家庄人,博士研究生,2007年于北京工业大学获得硕士学位,主要从事高功率半导体激光器系统集成控制技术的研究。E-mail: wenbinqin@emails. bjut. edu. cn

通讯作者:



曹银花(1964—),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,2005年于北京理工大学获得光学工程博士学位,主要从事大功率半导体激光光束控制与光纤耦合技术的研究。E-mail: caoyh@bjut. edu. cn



王智勇(1970—),男,重庆人,研究员,博士生导师,1992年、1995年与1998年于北京工业大学分别获得学二、硕士和博士学位,主要研究方向为大功率半导体激光的光束质量问题、大功率半导体激光关键器件的制备与集成技术、大功率激光光束传输、聚焦与耦合及其应用。E-mail: zywang@bjut. edu. cn

● 下期预告

800 nm 飞秒激光制备长周期光纤光栅技术

苗 飞¹,张 玲¹,冯德军²,隋青美^{1*},陈 霄¹,贾 磊¹,刘汉平³,刘辉兰³

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100;

3. 德州学院 物理系, 山东 德州 253023)

利用 800 nm 钛蓝宝石飞秒激光器采用逐点曝光法制备长周期光纤光栅(LPFG),并实验验证了 LPFG 的高温特性。首先,设计使用摄像头、电动位移平台实现激光精确对准光纤纤芯的方案,以计算机控制 1.3 mW 飞秒激光使用逐点曝光法在未经载氢处理的光纤上刻写长周期光纤光栅,在 1 200~1 700 nm 波段内 LPFG 主谐振峰值可达-17 dB。然后,利用高温箱对 LPFG 进行高温传感特性实验,在 300~800 °C 范围内主谐振峰温度响应灵敏度为 0.056 nm/°C,线性度 0.992。实验结果表明,以 800 nm 钛蓝宝石飞秒激光器使用逐点曝光法制备 LPFG 的方法稳定可靠,写制的 LPFG 高温响应特性良好,为高温检测提供了一种新的方法。