

文章编号 1004-924X(2011)02-0452-05

# 808 nm 千瓦级高效大功率半导体激光光源

单肖楠, 刘 云, 曹军胜

(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)

**摘要:**提出了一种新型光束整形技术,该技术通过平行平板玻璃堆实现光束的分割、平移、重排,从而改善半导体激光的光束质量。该试验采用自主设计的中心波长为 808 nm,连续输出功率为 60 W/bar,填充因子为 30%,具有 19 个发光点,每个发光点尺寸为  $1\ \mu\text{m}\times 135\ \mu\text{m}$  的 20 层半导体激光叠阵,通过望远镜系统对慢轴方向进行扩束后用一个聚焦镜同时对快慢轴聚焦,最终在焦平面上得到了 1 kW 输出,且聚焦光斑达到  $1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ ,耦合效率达到 90%,基本满足激光熔覆和激光焊接的要求。

**关键词:**高功率激光器;半导体激光器;光束整形

**中图分类号:**TN248.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111902.0452

## 808 nm kW-output high-efficiency diode laser sources

SHAN Xiao-nan, LIU Yun, CAO Jun-sheng

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** A kind of beam shaping technique was presented to improve the beam quality of a semiconductor laser and to achieve the beam splitting, translating, and rearranging by a parallel plate glass stack. The experiment uses a 20-layer 808 nm semiconductor laser array designed by ourselves with the output power of 60 W per bar, 19 light-emitting points of  $1\ \mu\text{m}\times 135\ \mu\text{m}$  each and 30% filling factor to expand beam at a slow axis through a telescope system, and also uses a focusing lens to focus on both the slow axis and the fast one at the same time. Experiments show that the technique can achieve the 1 kW output power on the focal plane, focused spot of  $1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$  and coupling efficiency of 90%, which basically satisfies the needs of laser cladding and welding.

**Key words:** high power laser; semiconductor laser; beam shaping

## 1 引 言

千瓦级半导体激光系统在工业、军事、核能等领域都有广泛的应用。工业上用于打孔、雕刻、热

处理、焊接、切割、打标、涂覆、合金化和表面硬化等加工项目。激光先进制造技术是一种可持续发展的绿色制造技术,代表先进制造的发展方向,得到国际上的高度重视,各发达国家都把激光制造技术作为提高生产率和竞争能力的重要手段和途

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:吉林省科技厅省长基金资助项目(No. 20075001)

径。基于 GaAs 半导体的高功率二极管激光器是可靠的高效率激光光源,其主要优点是效率高、光功率高、可靠性好、寿命长、投入成本相对较低和光斑小。近几年随着半导体材料本身、衬底和冷却技术方面不断的进步<sup>[1]</sup>,输出功率和寿命都有所提高,所以大功率半导体激光系统取代闪光灯泵浦固体激光的趋势已经初见端倪,这不仅仅是技术上的巨大进步,更重要的是还将带来巨大的经济和社会效益。此外,大功率半导体激光在军事上也有重要应用,如光电对抗、激光侦查、激光制导等,对该项研究的投入也必将使我国的国防建设现代化向前迈进一大步。随着半导体激光系统输出功率的提高和光束质量的改善,其应用范围将越来越广。

为提高高功率半导体激光器光束质量,本文提出了一种新型激光束整形技术。通过平行平板玻璃堆,实现光束的分割平移和重排,从而改善半导体激光的光束质量,实现了 20 层 808 nm 半导体激光光源的 1 kW 输出,聚焦光斑达 1 mm×1 mm,耦合效率达 90%。

## 2 整形原理

半导体激光器的光束质量在快轴方向和慢轴方向具有很大的差别。以波长为 808 nm 的半导

体激光器为例,其条宽一般为 1 cm,腔长为 1~3 mm,由 19 个发光点组成,填充因子为 30%,每个发光点的出光面尺寸为 1.5 μm×150 μm,相应的发散角分别为 45°×8°(包含 95%的能量)。半导体激光器的光束质量一般采用光参量积(BPP)来评价,具体定义为<sup>[2-5]</sup>

$$BPP = \omega_0 \times \theta_0 / 2, \quad (1)$$

其中,ω<sub>0</sub> 表示光束的束腰半径,θ<sub>0</sub> 表示光束的远场发散角。

因此,上述半导体激光器的快慢轴方向的光参量积分别为

$$BPP_f = 1.5/2 \times 10^{-3} \times 45/2 \times 17.45 \text{ mm} \cdot \text{mrad} = 0.29 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (2)$$

$$BPP_s = 10/2 \times 8/2 \times 17.45 \text{ mm} \cdot \text{mrad} = 349 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (3)$$

波长为 808 nm 半导体激光器的衍射极限为

$$BPP_d = \lambda/\pi = 0.26 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (4)$$

由上述数据可看出,虽然半导体激光器快轴方向的光束质量很好,接近衍射极限,但是快轴方向的发散角却非常大,不便于实际应用,同时慢轴方向的光束质量也很差,需进一步改善。为了便于后续的光束整形和实际应用,必须先采用透镜对快慢轴方向进行准直。表 1 为波长为 808 nm 的半导体激光器准直前后快轴和慢轴方向的光束质量。

表 1 808 nm 半导体激光器准直前后快慢轴方向的光束质量

Tab. 1 Beam quality of 808 nm diode laser before and after collimations

	快轴方向			慢轴方向		
	ω <sub>0</sub> /mm	θ <sub>0</sub> /mrad	BPP /(mm·mrad)	ω <sub>0</sub> /mm	θ <sub>0</sub> /mrad	BPP /(mm·mrad)
准直前	0.000 75	785	0.29	5	140	350
准直后	0.35	6	1.05	5	70	175

从表 1 可看出,单个半导体激光器经过准直后,慢轴方向的光束质量远大于快轴方向的光束质量。在快轴方向叠加多个半导体激光器有助于减小快慢轴方向的光束质量差别。在此采用 20 个激光器垂直叠加成一个半导体激光模块,相邻激光器的间隔为 1.9 mm。采用多个透镜快慢轴准直之后,快慢轴方向的光斑尺寸为 38 mm×10 mm,相应的发散角为 6 mrad×70 mrad,所得的

快轴和慢轴方向的光束质量分别为:

$$BPP_f = 38/2 \times 6/2 = 57 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (5)$$

$$BPP_s = 10/2 \times 70/2 = 175 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (6)$$

从半导体激光模块准直后的光束质量来看,慢轴方向和快轴方向仍呈近 3 倍的关系,需进一步降低慢轴方向的光束质量。在此采用光束整形元件来提高慢轴方向的光束质量。光束整形的方法一般是运用特殊的光学元件先对光束进行分

割,然后再经过平移和重排,以实现快慢轴光束质量均衡。

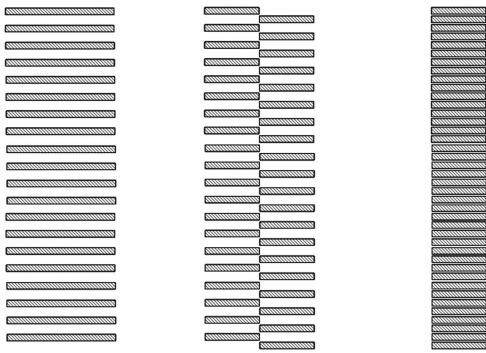
光束在慢轴方向分割成  $N$  份后,每一份的光束质量计算原则:

$$BPP_{s_1} = BPP_s / N, \quad (7)$$

在此,将慢轴方向切割成 2 份,则激光模块慢轴方向的光束质量:

$$BPP_s = 175 / 2 = 87.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (8)$$

然后再通过平移和重排,将其中一份光束穿插到另一份中,这样慢轴方向的光束质量减小一半,而快轴方向的光束质量几乎不变,达到快慢轴方向光束质量均衡的目的,其具体过程如图 1 所示。



(a)光束整形前光斑 (b)光束分割平移之后光斑 (c)整形后的最终光斑

图 1 半导体激光模块光束整形方法

Fig. 1 Principle of diode laser beam shaping

经过光束整形后,所得的快慢轴光束质量为  $57 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \times 87.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,两个方向的光束质量较为接近,实现了快慢轴光束质量均衡的目的。

### 3 实验建立和结果分析

#### 3.1 半导体激光器准直

此实验所采用的 20 层半导体激光叠阵均为自主生产,每个单元激光器的具体参数为:中心波长  $808 \text{ nm}$ ,连续输出功率  $60 \text{ W/bar}$ ,19 个发光点,填充因子 30%,每个发光点尺寸  $1 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ ,相应的发散角  $65^\circ \times 10^\circ$ 。发光单元尺寸在快慢轴方向的巨大差别导致快慢轴方向的发散角有很大不同,同时也存在严重的像散问题<sup>[6-9]</sup>。在进行光束整形之前,必须对光束进行准直,以减小快

慢轴方向发散角,准直方法如图 2 所示。

准直后通过 CCD 实测输出光斑如图 3 所示。

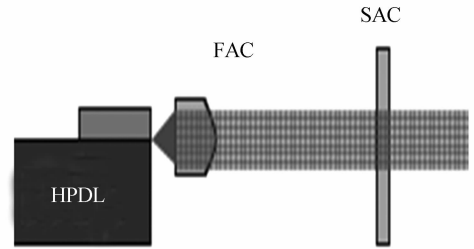


图 2 光束快慢轴准直方法

Fig. 2 Principle of fast and slow axes

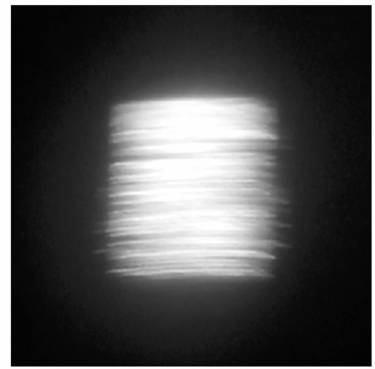


图 3 快慢轴准直后的输出光斑

Fig. 3 Spot size in two axes after collimation

#### 3.2 实验结果及分析

实验装置的结构如图 4 所示,经过准直后,快轴方向发散角下降至  $6 \text{ mrad}$ ,慢轴方向的发散角为  $70 \text{ mrad}$ ,相应的光束质量快轴方向为  $57 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,慢轴方向为  $175 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,两者仍有很大差别。为了实现光束质量均衡,慢轴方向需进行切割重排。本文自行设计了光束整形系统,首先将光束在慢轴方向上切割成两份,然后再将两束光束穿插在一起,这样慢轴方向的光束质量降低一半,下降至  $87.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,而快轴方向的光束质量在此期间几乎不变。经过光束整形后,快慢轴方向的光束质量为  $57 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \times 87.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,两者较为接近,因此实现了快慢轴光束质量的均衡。在此整形过程中,光-光转换效率达到 98% 以上。

尽管光束质量较为均衡,但是快慢轴方向的发散角巨大差异为后续的光束聚焦带来不便,在

此采用望远镜系统对慢轴方向进行扩束。扩束系统采用两个简单的平-凸透镜即可实现。待快慢轴方向的发散角较为一致时,采用一个聚焦镜同时对快慢轴聚焦,最终在焦平面上得到  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  的光斑输出,测得连续输出功率超过  $1\ 000\text{ W}$ 。经过反复测量,整个实验装置的光-光转换效率可达到  $90\%$ ,实测的  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  输出光斑如图 5 所示。

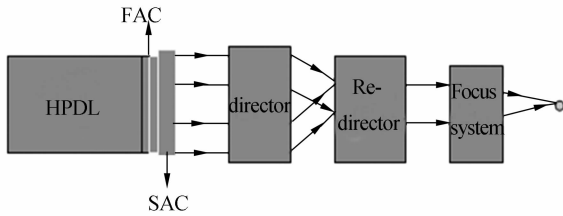


图 4 整个实验装置的结构示意图

Fig. 4 Experimental apparatus for beam shaping of 808 nm diode laser with continuously 20 bars

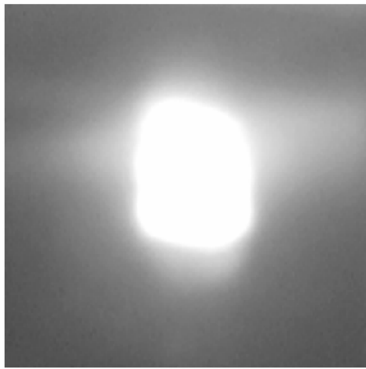


图 5 实验测得的  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  光斑

Fig. 5 Spot size of  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  in experiment

在实验过程中,能量的损失主要包括以下几个方面:光学透镜表面透射损失,尽管通过镀膜技术透镜表面透过率已达到  $99\%$  以上,但是经过多个光学表面后,损失的能量仍不可忽略;光学元件的实际位置和理想位置有一定的差距,这也会造成一些额外的能量损失。因此,在实验中应尽量减少光学元件的数量,并使整个系统紧凑,以降低由于光束发散角引起的能量损失。

通过引入光束整形元件改善输出光斑的质量,可以实现半导体激光器的直接加工应用,也可以将半导体激光器用在如激光干扰、激光照明等光电对抗等方面。随着功率增加和光束质量的改善,半导体激光器也将在表面处理和焊接等领域与  $\text{CO}_2$  和  $\text{Nd}:\text{YAG}$  激光器形成有力的竞争,并可能成为主要激光光源<sup>[10]</sup>。

## 4 结 论

通过自主设计加工的光学系统,在波长为  $808\text{ nm}$  的 20 层半导体激光叠阵模块中实现了  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  光斑输出,连续输出功率达  $1\ 000\text{ W}$ ,光-光转换效率达  $90\%$ ,此半导体激光器系统可直接用于工业加工和光电对抗等领域。目前,此光斑还不能直接耦合进光纤中,下一步工作将通过设计更加有效的光学系统,进一步缩小光斑,提高光束质量,以耦合进光纤中,这些结果将在后续的文章中报道。

## 参考文献:

- [1] STEFAN H, LARS I. Fiber coupled diode laser and beam-shaped high power stacks[J]. *SPIE*, 1998, 3267:116-124.
- [2] WANG P Y, GHEEN A, WANG Z. Beam shaping technology for laser diode arrays[J]. *SPIE*, 2002 4770:131-135.
- [3] 尧舜,套格套,路国光,等.  $68.5\text{ W}$  连续输出  $1\ 060$

$\text{nm}$  波段半导体激光列阵模块[J]. *光学精密工程*, 2006,14(1):8-11.

YAO SH, TAO G T, LU G G, *et al.*.  $1\ 060\text{ nm}$  wavelength high power diode array module[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):8-11. (in Chinese)

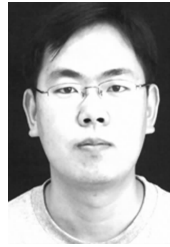
- [4] KUNETSOV F, HAKIMI F, SPRAGUE R. Design and characteristics of high-power ( $> 0.5\text{ W-CW}$ ) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular  $\text{TEM}_{00}$

- beams[J]. *JEEE J. Sel, Top, Quantum Electron*, 1999, 5(3): 561-573.
- [5] SANDUSKY J V, BRUECK S R J. A CW external-cavity surface-emitting laser [J]. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 1996, 8: 313-315.
- [6] ZAKHARIAN A R, HADER J, MOLONEY J V, *et al.*. Experimental and theoretical analysis of optically pumped semiconductor disk lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83: 1313-1315.
- [7] FRIEDRICH B. Present technology, industrial applications and future prospects of high power diode lasers [J]. *SPIE*, 2002, 4762: 1-15.
- [8] 顾媛媛, 冯广智, 单肖楠, 等. 808 nm 和 980 nm 半导体激光选阵波长耦合技术[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(1): 8-13.
- GU Y, FENG G ZH, SHAN X N, *et al.*. 808nm and 980nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 8-13. (in Chinese)
- [9] 单肖楠, 顾媛媛, 彭航宇, 等. 双波长高功率半导体激光器波长耦合技术[J]. *半导体光电*, 2010, 31(1): 23-26.
- SHAN X N, GU Y Y, PENG H Y, *et al.*. Wavelength coupling technology of double-wavelength high power diode laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(1): 23-26. (in Chinese)
- [10] FLOOD F A. L-band erbium-doped fiber amplifierS [C]. *Proc. OFC'00, Batimore, USA*, 2010, WG1.

#### 作者简介:

单肖楠(1979—),男,吉林蛟河人,博士后,副研究员,2004年于长春理工大学获得硕士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事高功率半导体激光器封装、光束整形等方面的研究。E-mail: shanxiaon@sina.com

刘云(1960—),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,1982年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事高功率半导体激光器封装、散热等方面的研究。E-mail: hs5252@sohu.com



曹军胜(1978—),男,陕西延安人,博士,副研究员,2000年、2003年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事半导体激光器应用方面的研究。E-mail: caojs@jlu.edu.cn