

文章编号: 1000-7032(2011)10-4036-05

2 600 W 偏振耦合高效率半导体激光光源

彭航宇^{1,2}, 单肖楠¹, 马军龙¹, 付喜宏¹, 佟存柱¹, 王立军¹

(1. 中国科学院 激发态物理重点实验室 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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 将两个中心波长为 808 nm, 输出功率为 1 500 W 的半导体激光叠阵, 经过快慢轴准直后, 利用半波片将其中一个叠阵的偏振方向旋转 90°, 使用偏振分光平板的耦合功能, 将两个偏振方向相互垂直的激光耦合到一个光路。扩束后再通过焦距为 100 mm 的聚焦镜组聚焦, 提高激光器的亮度。在工作电流为 75 A 时, 输出功率达到了 2 600 W, 电光转换效率为 48%, 聚焦后的光斑尺寸为 1 mm × 2 mm, 功率密度为 130 kW · cm⁻², 可直接应用于熔覆、表面硬化等加工领域。

关键词: 半导体激光; 高效率; 偏振耦合; 偏振分光平板

中图分类号: TN248.4

PACS: 42.60.-v

PACC: 4260

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20113210.1036

1 引言

半导体激光器由于效率及功率等方面的优势, 逐渐代替闪光灯成为固体激光器的泵浦源, 通过对激光器的堆叠, 可以实现半导体激光阵列万瓦量级的功率输出^[1-3]。但是由于半导体激光器波导结构的特点, 其垂直方向的发散角大, 垂直方向与水平方向的远场图形不对称, 虽然可以实现高功率输出, 但亮度较低。在材料加工应用中, 要求功率密度在数十 kW · cm⁻² 以上, 而半导体激光器的功率输出尚不能达到如此高的要求。但是, 将多个半导体激光器耦合成一束激光输出, 就可以提高输出功率和亮度。因此, 通过光束耦合技术实现高亮度的输出就成了一个关键性的问题。为得到更大亮度的激光输出, 可通过光束整形(有折射整形法^[4]、反射整形法^[5]以及折反射整形法^[6]等)、偏振耦合^[7]、波长耦合^[8]实现亮度的提高, 在光斑不变的情况下, 获得较高的功率密度。

北京工业大学采用格兰-泰勒棱镜实现了 808 nm 半导体激光器 1 kW 的功率输出, 光斑尺寸为 0.547 mm × 5 mm^[9]。国外大功率半导体激光器

的输出功率已达到几千瓦, 美国 Coherent 公司推出了 4 000 W 半导体激光器光源系统, 光斑尺寸为 0.5 mm × 12 mm, 光功率密度为 66.7 kW · cm⁻²^[10], 但是 Coherent 公司采用的是直接将多个激光叠阵并行排列, 这个过程中没有进行光束耦合, 单纯的提高输出功率, 没有实现亮度上的增加。

本文采用两个 20 层的半导体激光叠阵构成了高功率密度的激光器系统。每个叠阵的输出功率为 1 500 W, 利用快慢轴准直镜对激光器进行准直、整形, 改善激光器的光束质量, 两个方向的光束质量达到 57 mm · mrad × 180 mm · mrad, 通过偏振分光平板实现两个叠阵的光束耦合, 耦合后输出功率达到电光转换效率超过 48%, 连续输出功率超过 2 600 W。经过焦距为 100 mm 的透镜聚焦后, 光斑尺寸为 1 mm × 2 mm, 功率密度为 130 kW · cm⁻², 实现功率密度的加倍, 为大功率半导体激光器的工业应用提供了可行的方案。

2 偏振耦合原理

半导体激光器的输出光束接近于线偏振光,

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-05-26

基金项目: 科技部国际合作(2006DFA12600); 吉林省与中科院院地合作(2007SYHZ0030); 吉林省科技厅省长基金(20075001); 中科院装备预先研究(61501060108)资助项目

作者简介: 彭航宇(1983-), 男, 浙江黄岩人, 博士研究生, 主要从事半导体激光光束整形的研究。

E-mail: imphy@163.com

* : 通讯联系人; E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

偏振度在 95% ~ 98% 的范围内。偏振方向由半导体激光器有源区中的量子阱结构决定, 压应变量子阱 (Compressively-strained QWs) 结构产生接近于 TE 模的线偏振光, 张应变量子阱 (Tensile-strained QWs) 结构产生接近于 TM 模的线偏振光。偏振合束就是将两个偏振方向相互垂直的光束通过偏振耦合元件耦合到同一个光路中。在使用相同偏振方向的两个半导体激光器进行偏振合束时, 需要将其中的一束光通过半波片使偏振方向旋转 90°, 使两束激光的偏振方向相互垂直, p 偏振光透射, s 偏振光反射, 满足偏振合束的要求。由于只存在两个独立的偏振态, 理论上只能将两个功率相等的光束进行偏振合束, 实现功率密度的倍增。在选择偏振耦合元件时需要考虑的因素有 p 偏振光透射率、s 偏振光反射率、孔径角、损伤阈值等。损伤阈值是考虑的重点。对于连续功率输出为 80 W/bar 的半导体激光, 经过快慢轴准直后的光斑尺寸为 1 cm × 0.07 cm, 可求出半导体激光光源的能量密度约为 1 kW · cm⁻², 所以对偏振耦合元件抗损伤阈值的要求是大于 1 kW · cm⁻²。

实现偏振合束的光学元件主要分为两大类: 一是双折射晶体偏振合束元件, 如格兰-泰勒棱镜; 二是介质膜偏振合束元件。对于连续激光, 格兰-泰勒棱镜抗损伤阈值约为 500 W · cm⁻², 适合功率密度较小的半导体激光合束。另外, 因为用于制造格兰型偏振棱镜所使用的冰洲石是一种稀缺贵重材料, 所以一般其通光面积不大, 价格较高。介质膜偏振合束元件主要有偏振分光棱镜和偏振分光平板。偏振分光棱镜是将两个高精度直角棱镜通过胶合的方法, 合成一个立方体, 其中两个高精度直角棱镜中的一个的斜面上镀有偏振分光膜, 从而实现两个相互垂直偏振态的分光或合束。偏振分光棱镜使用有机胶作为胶合剂, 虽然可以实现分束, 但对光能有一定的吸收, 损伤阈值低, 不适合大功率半导体激光合束的使用。偏振分光平板是依靠多层膜的 p 偏振光和 s 偏振光有效折射率不相等这个条件设计的。光束倾斜入射时, p 偏振光和 s 偏振光的有效折射率发生变化, s 光的有效折射率 $\eta_s = n \cos \theta$, p 光的有效折射率 $\eta_p = n / \cos \theta$, 通过膜层的设计可使 p 偏振光实现高透过率, s 偏振光实现高反射率。由于偏振分光平板不存在有机胶, 介质膜可以实现高抗损伤阈值, 满足损伤阈值大于 1 kW · cm⁻² 的要求, 因

此相对于其他偏振耦合元件而言, 选择偏振分光平板进行偏振耦合, 不存在元件的损伤阈值问题, 是最好的偏振合束元件。

3 实验装置

如图 1 所示, 采用两个输出功率为 1 500 W 的 20 层半导体激光叠阵, 构成激光器系统。由于发散角大, 需要使用快轴准直镜对快轴发散角进行压缩, 降低快轴方向发散角。慢轴方向光束质量差, 需要慢轴准直镜对慢轴方向的光束进行准直。两个叠阵激光器的输出模式是 TE 模 (平行于有源区方向, 即激光器慢轴方向), 对应的是偏振分光平板的 p 偏振光。叠阵 1 为偏振光, 经过偏振分光平板后透射。叠阵 2 同样为 p 偏振光, 经过一个半波片后, 变成 s 偏振光, 叠阵 2 沿偏振分光平板的布儒斯特角入射, 被偏振分光平板反射, 就可以实现 s + p 的合束, 通过精确调节叠阵 1 与叠阵 2 的位置, 将两路激光合成一束。

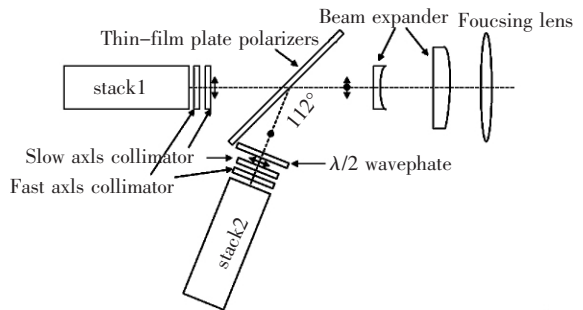


图 1 半导体激光器偏振耦合示意图

Fig. 1 The principle of polarization coupling technology

合束后的光束必须经过设计扩束准直系统对光束进行扩束, 减小慢轴发散角, 实现慢轴方向光束的准直, 再通过焦距为 100 mm 的聚焦透镜组聚焦, 实现高功率密度的输出能量。

4 结果与讨论

采用的 808 nm 半导体激光器, 在快轴方向的发散角为 60° (95% 功率), 尺寸为 1 μm · bar 条的宽度为 1 cm, 发散角为 10°。每个半导体激光器 bar 上有 19 个发光单元, 每个发光单元的尺寸为 150 μm, 发光单元之间的周期为 500 μm, bar 条的输出功率为 75 W。

快轴方向的光束质量较好, 接近衍射极限, 但是发散角很大, 不利于半导体激光器 bar 条在垂直方向的堆叠, 需要使用快轴准直镜对快轴发散角进

行压缩,降低快轴方向发散角。慢轴方向光束质量差,需要慢轴准直镜对慢轴方向的光束进行准直,利用 bar 条的不发光区域,尽可能地减小慢轴方向发散角。因此需要对激光器进行快慢轴准直。快轴方向是利用有效焦距(EFL)为 0.91 mm 的快轴准直镜对激光器进行准直,慢轴方向是利用周期与激光器一致的 EFL 为 2.2 mm 的微透镜阵列对激光器进行准直。准直后,利用刀口法测量快轴方向发散角 θ_F 为 6 mrad(95% 功率),慢轴方向发散角 θ_s 为 72 mrad(95% 功率),如图 2 所示。

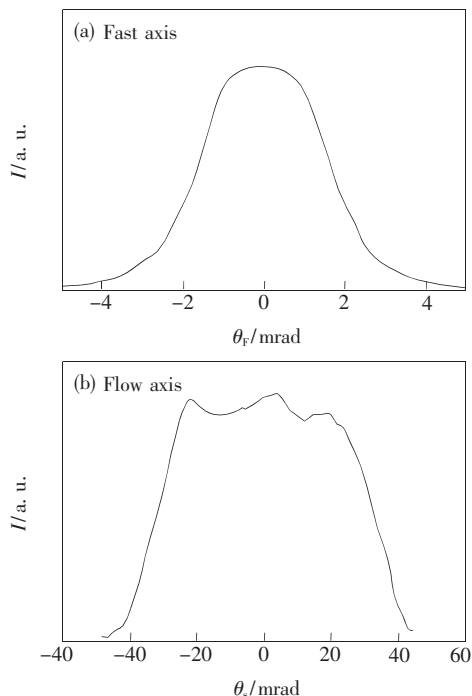


图 2 (a) 叠阵快轴准直后的发散角; (b) 叠阵慢轴准直后的发散角。

Fig. 2 (a) Fast axis divergence angle with collimated; (b) Slow axis divergence angle with collimated.

将 20 个 bar 条在垂直方向叠加,得到一个 20 层的半导体激光叠阵。半导体激光叠阵 bar 与 bar 之间的间距约为 1.9 mm,经过快慢轴准直之后的光斑尺寸为 38 mm × 10 mm,发散角为 6 mrad × 72 mrad。根据 ISO-11146 标准,激光器的光束质量由光参数积(BPP)描述^[4]:

$$BPP = w_0 \cdot \theta/2,$$

快、慢轴方向的光束质量为:

$$BPP_F = 19 \text{ mm} \times 6 \text{ mrad}/2 = 57 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

$$BPP_s = 5 \text{ mm} \times 72 \text{ mrad}/2 = 180 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

经过快慢轴准直,激光器慢轴方向的光束质

量明显提高。

由于出射光束的面积较大,所以需要采用探测面积较大的激光功率计。将两个输出功率为 1 500 W 的 20 层半导体激光叠阵串联,采用 OPHIR 公司的 5 000 W 激光功率计,同时使用万用表测量激光叠阵两端的电压,计算叠阵的电光转换效率,得到如图 3 所示的 $P-I$ 曲线。在注入电流为 76 A 时,输出功率达到 3 176 W,电压为 72.9 V,相应的电光转换效率为 59%,中心波长 λ 为 808.6 nm,光谱 FWHM 为 2.6 nm。

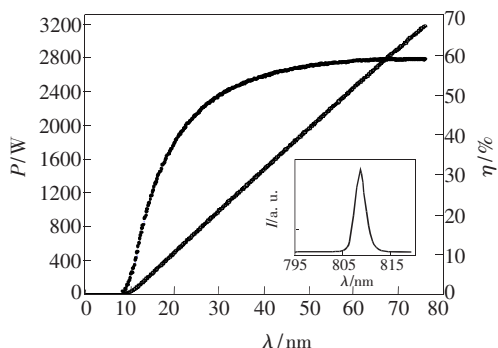


图 3 808 nm 半导体激光叠阵的 $P-I$ 、 $E-I$ 及光谱特性曲线。

Fig. 3 Optical power, efficiency versus operating current and spectrum of the 808nm laser diode stack.

将经过快慢轴准直的光束经过如图 1 所示的偏振耦合系统可以实现 2 600 W 的功率输出。如图 4 所示,在注入电流 76 A 时,输出功率达到 2 600 W,电光转换效率为 48%,这是目前国内所达到的最高功率,而且国内没有使用偏振分光平板进行偏振耦合方面的报道。

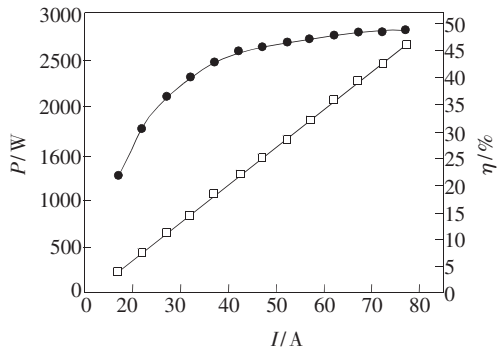


图 4 水温 20 ℃、水流量 16 L/min 时,偏振耦合后的 $P-I$ 及 $\eta-I$ 特性曲线。

Fig. 4 Output power and efficiency versus operating current of the stack with polarization coupling at 20 ℃ water temperature and 16 L/min water flow rate.

整个系统的光-电转换效率约为 83%, 这主要由以下几个方面造成的: 激光器的本身不是完全线偏振的, 偏振度一般为 95% ~ 98%; 偏振分光平板的耦合效率不是 100%; 偏振合束时 p 偏振光反射及 s 偏振光透射会造成一定的损失; 快

慢轴准直会造成损失; 各个光学元件的表面反射也会造成损失。

将整形之后的光束通过焦距 100 mm 的聚焦镜聚焦之后, 光斑接近于平顶光束 1 mm(快轴方向) × 2 mm(慢轴方向), 光斑均匀度大于 0.8, 如图 5 所示。

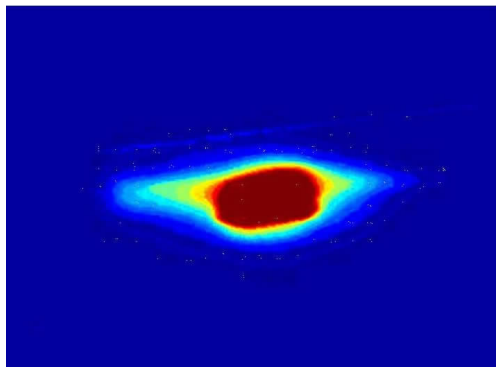


图 5 聚焦后获得的光斑轮廓图

Fig. 5 Profile of spot size after focusing lens

4 结 论

采用偏振分光平板对半导体激光器进行偏振耦合, 通过扩束、焦距 100 mm 的聚焦镜组聚焦, 在工作电流 75 A 时, 实现了 2 600 W 的功率输出, 电光转换效率为 48%, 聚焦后的呈矩形分布, 光斑尺寸达到 1 mm × 2 mm, 功率密度为 130 kW · cm⁻²。这是目前国内所达到的最高功率及功率密度。通过使用更加有效的光学系统可以得到更小光斑, 提高激光输出功率密度, 满足半导体激光器直接应用于熔覆、表面硬化等领域的要求。

参 考 文 献:

- [1] Ma Xiangzhu, Huo Jin, Qu Yi, *et al.* Thermal-resistor analysis of the laser chips with different size in C-mount package [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(2): 184-187 (in Chinese).
- [2] Lin Zhiqi, Zhang Yang, Lang Yonghui, *et al.* Constant temperature control of semiconductor laser based on temperature characteristics of pn junction [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, 30(2): 223-227 (in Chinese).
- [3] Grenier P, Taillon Y, Labranche B, *et al.* Symmetrization device and laser diode system provided with the same: US, 7260131 [P]. 2007-08-01.
- [4] Spaeth W, Groetsch S, Moser R, *et al.* Microoptical device with mirrors: US, 5808323 [P]. 1998-09-15.
- [5] Gao Xin, Shinoda K, Saitoh M, *et al.* Laser light source and an optical system for shaping light from a laser-bar-stack: US, 6943957 [P]. 2005-09-13.
- [6] Feng Guangzhi, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.* 808 nm high power diode laser stack with polarization coupling [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, 29(4): 695-720 (in Chinese).
- [7] Gu Yuanyuan, Feng Guangzhi, Shan Xiaonan, *et al.* 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2009, 17(1): 8-13 (in Chinese).
- [8] Ding Peng, Cao Yinhua, Su Guoqiang, *et al.* 1 kW high power diode laser with polarization coupling by Gran-Taylor prism [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2009, 36(2): 290-293 (in Chinese).
- [9] Haake J M, Zediker M S. High power direct diode laser successes [J]. *SPIE*, 2004, 5336: 107-115.

2 600 W High Efficiency Laser Diode Source with Polarization Coupling

PENG Hang-yu^{1,2}, LIU Yun¹, SHAN Xiao-nan¹, ZHANG Jun-long,

FU Xi-hong¹, TONG Cun-zhu¹, WANG Li-jun¹

(1. Key Laboratory of Excited State Physics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: As the increasing applications of laser diodes in laser cladding and laser hardening, the single laser diode optical power can not meet the actual requirements. An improvement of the power and power density is necessary and it can be achieved by beam shaping and beam combination such as polarization coupling. The polarization coupling technology is used to couple two laser beams with thin-film plate polarizer. In this paper, two 808 nm vertically stacked arrays with an output power of 1 500 W was achieved. After fast axis and slow axis collimated, the polarization direction of one stacked arrays is rotated 90° through a half wave plate, thus, the polarization directions of two laser stack are vertical. The beams of two lasers are incident on thin-film plate polarizer; one transmits through it, and the other is reflected on it. Finally, two beams combine to one. Polarization coupling of two bars increases the power by a factor of 1.6, and the output power is 2 600 W, electro-optical conversion efficiency is more than 48%. The spot size is about 1 mm × 2 mm. This source reaches an intensity of 130 kW · cm⁻². This laser can be directly applied to cladding, surface hardening and other fields.

Key words: laser diode; high efficiency; polarization coupling; thin-film plate polarizer

CLC number: TN248.4

PACS: 42.60.-v

PACC: 4260

Document code: A

DOI: 10.3788/fgxb20113210.1036