

大功率半导体激光列阵单光纤耦合技术*

牛 岗^{1,2,3,†} 樊仲维³ 王培峰^{1,2,3} 崔建丰^{1,2,3} 石朝辉^{1,2,3} 张 晶^{1,2,3}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 利用阶梯反射镜整形技术和偏振合束及波长合束技术成功将两只波长为 808nm 和两只波长为 980nm 的 40W 大功率半导体激光器光束进行混合, 最后得到输出功率为 95.8W、耦合效率为 60% 的双波长大功率半导体激光列阵单光纤耦合模块, 光纤芯径为 400 μ m, 数值孔径为 0.22.

关键词: 激光技术; 大功率半导体激光列阵; 阶梯反射镜; 偏振合束; 波长合束; 耦合效率
EEACC: 4320J

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)10-1607-04

1 引言

随着大功率半导体激光器应用的发展, 大功率半导体激光列阵(LDA)光纤耦合技术也在不断完善和发展. 大功率半导体激光器由于其特殊的工作原理, 其光束质量在垂直与平行于 p-n 结两个方向上相差很大, 通常把垂直于 p-n 结的方向称为快方向, 平行于 p-n 结的方向称为慢方向. 快方向上的光束接近衍射极限($M^2 \approx 1$), 发散角大; 而慢方向上的光束质量极差($M^2 > 1000$), 发散角小^[1]. 正是由于这两个方向的光束质量的极不平衡性使半导体激光器应用时比较困难, 需要对半导体激光器的光束进行整形输出. 在大多数的应用中都要求对半导体激光器光束进行整形, 形成小芯径、小数值孔径的高亮度的光纤耦合半导体激光输出.

通常市场上使用的成熟大功率半导体激光器光纤耦合模块功率为 30W 左右. 本课题组首先使用阶梯反射镜技术将 LDA 的光束整形, 然后通过偏振分光合束技术和波长合束技术^[2]成功实现了功率为 95.8W、耦合效率约为 60% 的双波长大功率半导体激光列阵单光纤耦合模块, 大大地增加了光纤输出亮度; 并且随着工艺水平的提高, 光纤输出功率还可以成倍提高. 此技术可以应用到工业加工场合, 也可以在抽运多个吸收峰的激光晶体及抽运光纤激光器方面得到应用.

2 阶梯反射镜整形

对于大功率半导体激光器列阵, 其光束特性通常使用光参数积 (beam parameter products, BPP) 来表示, 光参数积定义为光斑直径与光斑在该方向上的发散角的乘积^[3]:

$$BPP = d\theta \quad (1)$$

大功率半导体激光器列阵通常的快轴光斑尺寸为 1 μ m, 发散角大约为 40°, 快轴光参数积为 0.70mm \times mrad; 慢轴光斑尺寸为 10mm, 发散角为 10°, 慢轴光参数积为 1745mm \times mrad. 首先采用椭圆柱面型快轴准直微透镜对快轴光斑进行准直, 透镜折射率 $n = 1.82$; 透镜的高度为 1mm, 厚度为 1mm, 长度为 12mm; 而其椭圆柱面的参数分别为 $r_x = 0.756$, $cc = -0.366$, 其中 r_x 是椭圆顶点处的曲率半径, cc 为圆锥常数 (conic constant). 准直后快轴方向高度为 0.7mm, 发散角大约为 10mrad. 快轴方向的光参数积 $BPP_F = 7\text{mm} \times \text{mrad}$, 慢轴方向光参数积 $BPP_S = 1745\text{mm} \times \text{mrad}$.

可以看出, 慢轴方向的光参数积远远大于快轴方向的光参数积. 此时, 可以使用一对阶梯反射镜重新排列快慢轴方向, 实现两方向的光参数积平衡. 阶梯反射镜整形原理^[4]如图 1 所示.

首先阶梯镜将慢轴方向光束分成了 n 段, 并且每一段都围绕其自身光轴旋转了 90° 角.

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA311020)和北京市科学技术委员会(批准号: H020420070110)资助项目

† 通信作者. Email: niugang8765@hotmail.com

2007-03-28 收到, 2007-05-23 定稿

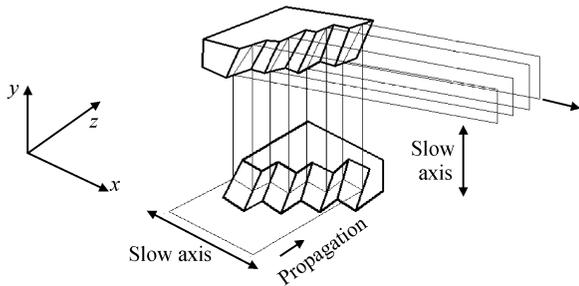


图 1 阶梯镜光束整形原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the micro step-mirrors

阶梯镜整形时分割的段数 n 可由公式 (2) 得出^[5]:

$$n = \sqrt{\frac{\text{BPP}_S}{\text{BPP}_F}} \quad (2)$$

代入光束在阶梯镜整形前的各光参数积后, 可以得出 $n = 16$ 时, 快、慢轴光参数积最为接近, 耦合效率也最为理想. 在实验中为了保证一定的调整容差, 选用了 $n = 17$ 的阶梯镜, 此时阶梯镜中的每个微台阶宽度为 0.7mm, 阶梯镜反射面总长度为 11.9mm.

在阶梯镜前, 半导体激光器的输出光束为 x 方向(慢轴)宽为 10mm, 发散角度($\text{FW1}/e^2$)约为 10° , y 方向(快轴)宽为 0.7mm, 发散角度($\text{FW1}/e^2$)约为 10mrad; 经过阶梯镜变换后, 激光束变为(光轴始终为 z 轴): x 方向宽为 11.9mm, 发散角度($\text{FW1}/e^2$)约为 10mrad, y 方向宽为 0.7mm, 发散角度($\text{FW1}/e^2$)约为 10° ; 可见, 经过阶梯反射镜阵列变换后, 快、慢轴方向的宽度没有改变, 但是发散角进行了互换, 也就是说阶梯镜在减少慢轴方向光参数积的同时, 增大了快轴方向的光参数积, 从而达到整形的要求.

3 偏振合束与波长合束

偏振合束是利用偏振分光棱镜(PBS)来实现的. 一束经过 PBS 的圆偏振光可以分为水平偏振和垂直偏振的两束光, 根据光路可逆原理, 就可以实现水平偏振和垂直偏振两束光的合束. 在实验中利用相同波长的两束光转换成为互相正交的两个偏振方向, 再用 PBS 汇合在一起的方法来完成偏振合束.

实验中使用的 LDA 为美国 Coherent 公司产品, 其中 LDA1 和 LDA2 的波长为 808nm, 功率为 40W, 偏振态为垂直偏振(TM); 而波长为 980nm 的 LDA3 和 LDA4 为水平偏振(TE), 功率也为 40W.

图 2 为 808nm LDA 偏振合束结构示意图, 图中 LDA 输出光束为垂直偏振光. LDA1 光束经过一对阶梯反射镜, 原来的垂直偏振改变为水平偏振, 水平偏振光进入 PBS 后直接输出. LDA2 光束首先

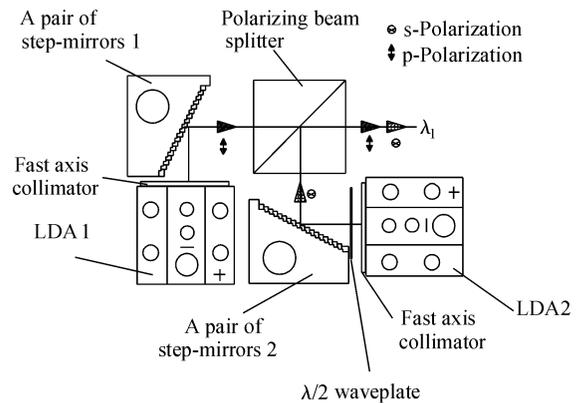


图 2 偏振合束结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the polarizing beam combined

经过一个 $\lambda/2$ 波片, 偏振态改变为水平偏振, 水平偏振光经过阶梯反射镜转折后, 偏振方向又改变 90° , 变为垂直偏振光, 垂直偏振光经 PBS 转折 90° 输出. 可以看出, 只要保证 LDA1 和 LDA2 两束整形后的光斑完全重合, 就可以成倍地增加输出功率. 图 3 为 LDA1 经过阶梯反射镜后光斑形状, 图 4 为 LDA1 与 LDA2 经过 PBS 偏振合束后的光斑形状. 从图中可以看出, 偏振合束后的两束光斑基本重合, 效果良好.

对于 980nm 的 LDA 来说, 只要将 $\lambda/2$ 波片位置放置到原 LDA1 位置前端并且选用 980nm 的 PBS 就可以达到同样的效果.

波长合束是利用波长合束片对两个不同波长的光进行合束, 它主要依靠玻璃片上镀膜的质量. 本实验选用短波通片, 要求波长 $808 \pm 10\text{nm}$ 在波长合束片 45° 时透过率为 95%, $980 \pm 10\text{nm}$ 在波长合束片 45° 时反射率为 98%. 图 5 为波长合束及耦合结构示意图, 图中波长 808 和 980nm 的两光束经过波长合束片后合为一束光, 最后经过柱透镜再次整形, 通过

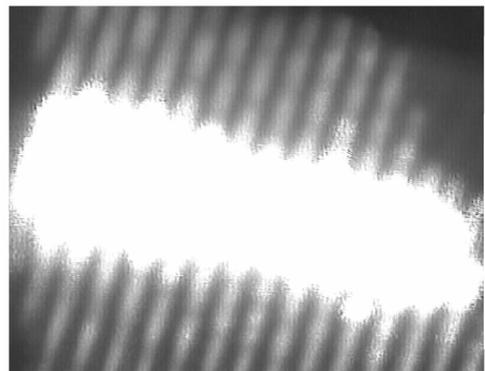


图 3 LDA1 经过阶梯镜后光斑形状

Fig. 3 Beam profiles of LDA1 after step-mirrors rearranging

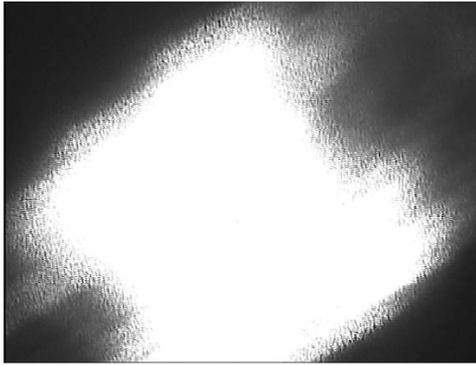


图 4 LDA1 与 LDA2 偏振合束后光斑形状

Fig. 4 Beam profile of LDA1 and LDA2 after polarizing beam combined

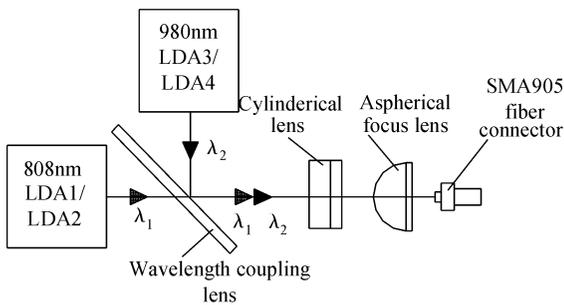


图 5 波长合束及耦合结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the wavelength combined

球透镜聚焦在带有 SMA905 光纤连接器的光纤端面上. 图 6 为光斑经过波长合束后最终聚焦的光斑形状, 可以看出光斑在波长合束后有一个方向聚焦不够, 这也是最终的耦合效率不够高的原因之一.

4 LDA 光纤耦合实验结果

实验中, 电源使用自制的 4V, 50A 电源, 功率计

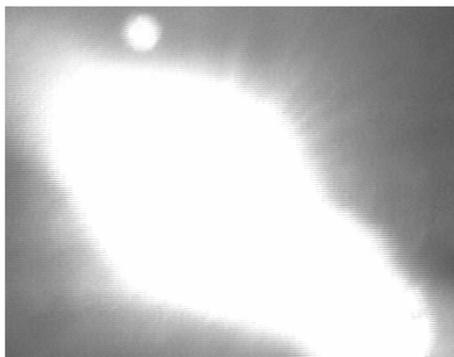


图 6 最终聚焦光斑照片

Fig. 6 Photograph of the focused spot

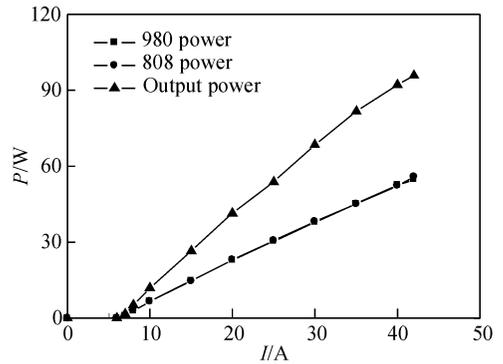


图 7 实验过程中的 P-I 曲线

Fig. 7 P-I characteristics of the coupled LDA

采用加拿大 Gentec 公司的 PS-1K 型功率计, 制冷部分采用水冷. 首先将 4 只 LDA 分别整形后, 利用 PBS 将相应波长的 LDA 偏振合束, 在波长合束前对各自功率进行测试. 图 7 为功率和电流关系图, 图中方形和圆形的标识线分别表示为偏振合束后 808 和 980nm 光束的 P-I 曲线. 其中, 808nm 光束在偏振合束后电流 42A 时, 功率为 54.7W; 980nm 光束在偏振合束后电流 42A 时, 功率为 55.8W. 在图 7 中这两条线基本重合. 然后将两种波长进行波长合束, 精密调整合波片、柱透镜和球面透镜的前后相对位置后, 得到输出功率为 95.8W, 耦合效率约为 60% 的大功率半导体激光阵列单光纤耦合模块. 图 7 中带有三角形标识线为光纤耦合输出的功率和电流关系曲线.

耦合效率损失的原因主要有以下几个方面: (1) 光学聚焦系统的设计上有一定误差, 需要进一步优化设计; (2) 在阶梯镜中有一定的平行度误差, 并且在装配中误差也会影响光斑质量; (3) 光纤有一定的损耗, 镀宽带增透膜会使耦合效率有一定增加; (4) PBS 和波长合束片镀膜质量导致损耗较大, 随着工艺的持续改进, 还可以达到更高的耦合效率.

5 结论

首先使用阶梯反射镜技术将 LDA 的光束整形, 然后通过偏振分光合束技术和波长合束技术成功得到了功率为 95.8W, 耦合效率约为 60% 的双波长大功率半导体激光阵列单光纤耦合模块, 大大地增加了光纤输出亮度. 输出光纤芯径为 $\Phi 400\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22. 随着相关器件水平的不断提高, 耦合技术需要进一步的研究, 模块也更需工业化产品的改造.

参考文献

[1] Tang Chun, Yan Diyong, Gao Songxin, et al. The design a-

- bout high power laser diode linear array coupling with optic fiber. *Laser Journal*, 2002, 23(5):19 (in Chinese) [唐淳, 严地勇, 高松信, 等. 高功率线阵半导体激光器光纤耦合设计. *激光杂志*, 2002, 23(5):19]
- [2] Treusch H G, Du K, Baumann M. Fiber-coupling technique for high-power diode laser arrays. *SPIE*, 1998, 3267:98
- [3] Dorsch F, Henning P, Nickel M. High-brightness fibre-coupled diode laser module. *SPIE*, 1998, 3285:192
- [4] Du K, Baumann M, Ehlers B, et al. Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for high-power diode lasers bars. *OSA TOPS*, 1997, 10:390
- [5] Zhou Chongxi, Liu Yinhui, Xie Weimin, et al. Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array. *Chinese Journal of Laser*, 2004, A31(11):1296 (in Chinese) [周崇喜, 刘银辉, 谢伟民, 等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究. *中国激光*, 2004, A31(11):1296]

A Single Fiber Coupling Technique for High Power Diode Laser Arrays*

Niu Gang^{1,2,3,†}, Fan Zhongwei³, Wang Peifeng^{1,2,3}, Cui Jianfeng^{1,2,3},
Shi Zhaohui^{1,2,3}, and Zhang Jing^{1,2,3}

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

(2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(3 *Beijing GK Laser Technology Co. Ltd, Beijing 100085, China*)

Abstract: This paper reports two pairs of laser diode arrays (LDA) with wavelengths of 808 and 980nm, respectively, whose beams were mixed into a single fiber using step-mirror beam-shaping technology, polarization, and wavelength coupling technology. As a result, a single fiber optic coupling module of LDA was achieved, of which the output power is 95.8W, maximal coupling efficiency is more than 60%, the diameter of the fiber core is 400 μ m, and NA is 0.22.

Key words: laser technology; high power laser diode array; step-mirrors; polarization coupling; wavelength coupling; coupling efficiency

EEACC: 4320J

Article ID: 0253-4177(2007)10-1607-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA311020) and the Key Program of the Beijing Municipal Science and Technology Commission (No. H020420070110)

† Corresponding author. Email: niugang8765@hotmail.com

Received 28 March 2007, revised manuscript received 23 May 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics