

文章编号:1001-5078(2007)10-1041-03

大功率半导体激光器光纤耦合技术研究

宁长春, 陈天禄, 索朗桑姆, 厉海金, 胡海冰
(西藏大学理学院物理系, 西藏 拉萨 850000)

摘 要:文章通过对高功率 DL 输出光束特性的分析, 设计了大功率 DL 光纤耦合输出激光器系统, 并进行了实验验证。根据实验结果, DL 单元线阵经过准直后, 快轴方向的发散角小于 0.2° 。利用微台阶镜实现了高功率 DL 快轴、慢轴方向束参积的转换, 较好地实现了光纤耦合, 在光纤直径为 $800\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22 的条件下, 连续输出功率达到 31.5W, 耦合效率达到 72%。

关键词:高功率二极管激光器; 光纤耦合; 光束参量积; 光束整形

中图分类号:TN253

文献标识码:A

High Power Fiber Coupled Diode Laser System

NING Chang-chun, CHEN Tian-lu, SUO Lang-sang-mu, LI Hai-jin, HU Hai-bing
(Physics Department of Science School, Tibet University, Lhasa 850000, China)

Abstract: In the paper, high power diode laser optical performance is analyzed and high power fiber coupled diode laser system is designed. The DLA divergence angle is less than 0.2° after the fast axis collimation lens. Efficiency of fiber coupling is more than 72%, and out power is 31.5W.

Key words: high power LD; fiber coupling; beam parameter product; beam forming

1 引 言

近年来,随着半导体光电技术的迅猛发展,二极管激光器(DL)的功率水平和电光效率不断提高,千瓦级的大功率 DL 器件的研究和应用出现了快速发展的趋势^[1-2]。但是,由于 DL 波导结构的特点,大功率 DL 的光束参量积在快、慢轴方向相差较大,输出光能量不集中,远场光强分布不均匀,很难用普通的光学系统得到高亮度的大功率激光输出,严重妨碍了大功率 DL 的应用。针对这一特点,研究人员采取了各种光束整形和光纤耦合技术实现大功率 DL 的柔性传输,直接应用于材料加工和固体激光器泵浦源(包括光纤激光器)^[3]。

本文通过对二极管激光器光束输出特性的分析,确定了二极管 bar 条在快轴和慢轴方向的不同发散角,并利用 limo 公司的快慢轴准直透镜和台阶镜,将光束汇聚到直径为 $800\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22 的光纤中,耦合效率达到 72%。

2 DL 光束特性分析

光束参数积(BPP)可以较好地表征激光光束质量。光束参数乘积定义为光斑直径与远场发散角的乘积^[1],对于半导体激光器而言,由于其有源层较薄,衍射效应使得垂直于结平面方向(快轴)发散角很大,达到 $35^\circ \sim 40^\circ$,而平行于结平面方向有源层宽度较大,发光面上的光场表现出多光丝,发散角较小,一般只有 $6^\circ \sim 10^\circ$,远场光斑呈椭圆形分布,如图 1 所示。由于 DL 激光器快慢轴方向的光束空间分布不对称,其束参积在两个方向相差较大,快轴方向单个 DL bar 条的束参积可表示为:

$$\text{BPP}_{\text{bar, fast}} = \omega_{\text{fast}} \times \theta_{\text{fast}} \quad (1)$$

其中, ω_{fast} 为快轴方向发光区宽度; θ_{fast} 为快轴方向光束发散角。

基金项目:西藏大学校科研基金资助项目。

作者简介:宁长春(1978-),男,讲师,现主要从事半导体激光器件的研究。E-mail:ningchangchun@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-04-23

单个 DL bar 条在慢轴方向是由多个发光区 (emitter) 组成, 其束参积可表示为:

$$BPP_{\text{bar,slow}} = \frac{BPP_{\text{emitter,slow}} \times N_{\text{emitter,bar}}}{F_{\text{bar,slow}}} \quad (2)$$

式中, $BPP_{\text{bar,slow}}$ 为慢轴方向每个单元发光区的束参积; $N_{\text{emitter,bar}}$ 为慢轴方向发光区数量; $F_{\text{bar,slow}}$ 为 bar 条在慢轴方向的填充因子。

$$BPP_{\text{emitter,slow}} = \omega_{\text{emitter,slow}} \times \theta_{\text{slow}} \quad (3)$$

其中, $\omega_{\text{emitter,slow}}$ 为慢轴方向单个发光区宽度; θ_{slow} 为慢轴方向光束发散角。

$$F_{\text{bar,slow}} \approx \frac{w_{\text{emitter,slow}} \times N_{\text{emitter,bar}}}{w_{\text{bar,slow}}} \quad (4)$$

其中, $w_{\text{bar,slow}}$ 为 bar 条宽度; $N_{\text{emitter,bar}}$ 为 DL bar 条上发光区的数量。

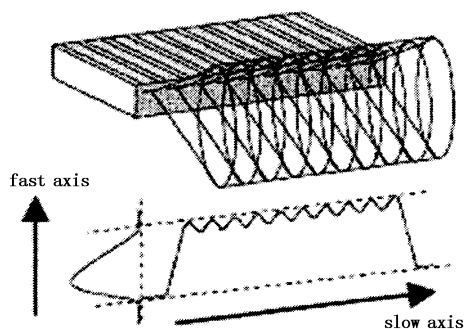


图1 高功率 DL 发射光束远场特性

Fig.1 far-field characteristics of High power DL

3 高功率 DL 线阵单元

对于连续 DL 线阵单元 (bar 条), 商品化产品外形尺寸为 $10\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.15\text{mm}$, 由于占空因子和出光间距不同, 每个 bar 条上一般分布 19 或 25 个发光单元 (emitter), 出光功率 $40 \sim 60\text{W}$ 。考虑到二极管 bar 条在慢轴方向比较难以准直, 实验计划只对快轴方向进行准直, 因此, 实验选用了发光单元 25 个的二极管激光器 bar 条, 其发光间距为 $400\mu\text{m}$, 发光区为 $200\mu\text{m}$ 。对于高功率 DL 光纤耦合激光器, 二极管线阵的光束特性对后面光学系统的设计非常重要, 特别是 DL 激光器快、慢轴方向的束参积。在实验方案设计前期, 首先对二极管的光束远场特性进行了测量, 实验采用 DL 发射光谱的相对强度测量方法对 DL 远场发散角进行了测试, 将光谱仪探头放置在半径为 2m 的半圆上, 每个点测试时探头对准 DL 发光区, 在半圆上移动探头位置, 记录每点的光谱峰值强度, 测试结果如图 2 和图 3 所示。根据测试结果可以看出, DL 光束的远场在快、慢轴方向的特性相差较大, 快轴方向发散角很大, 其半峰全宽度 (FWHM) 为 37° , 呈高斯分布, 慢轴方向

发散角较小, 呈类似双高斯分布, 并且, 慢轴方向随着二极管输出功率的增加, 发散角也有所扩大, 在连续 50A 工作时, 慢轴方向的分散角 (FWHM) 扩展为 7° 左右。因此, 对慢轴方向耦合系统的设计必须考虑到最大发散角的情况。

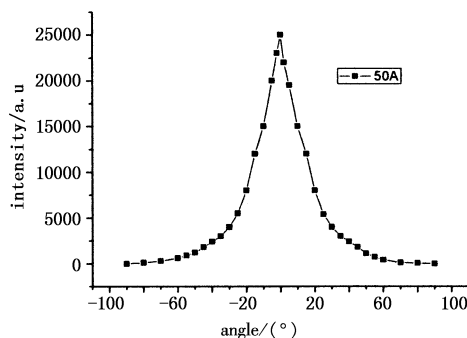


图2 快轴方向远场发散角

Fig.2 far-field divergence angle of fast axis

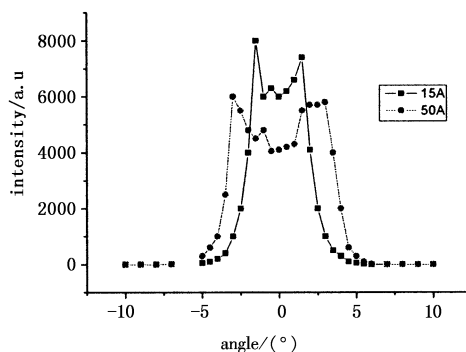


图3 慢轴方向远场发散角

Fig.3 far-field divergence angle of slow axis

4 光束整形及聚焦系统设计

根据测试结果, 使用的二极管激光器在快、慢轴方向的发散角分别为 37° 和 7° , 根据式 (1) 和 (2), 对应的快、慢轴方向的束参积分别为 $0.16\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 和 $146.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。对于直径为 $800\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22 的光纤而言, 束参积为 $88.6\text{mm} \cdot \text{mrad}$, 理论上只要将慢轴方向的束参积减小一半, 就可以耦合到光纤中。但实际上, 由于慢轴方向的发光区的填充因子为 50%, 其束参积为 $293\text{mm} \cdot \text{mrad}$; 快轴方向利用 limo 公司的透镜进行准直, 经过微透镜准直后发散角减小为 0.2° , 光束宽度变为 1mm , 其实际束参积为 $3.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$; 另外, 由于快轴和慢轴方向的束参积相差较大, 不利于耦合聚焦系统的设计, 因此, 通过光束整形后使快慢轴的束参积近似相同。光束整形的目的就是通过重新排列两方向的光束, 来减小一个方向的光斑尺寸, 增加另一方向的光斑尺寸, 从而实现两方向光束参量积的平衡。这里是将慢轴光束截成 n 段叠加到快轴方向, 实现两方向光束平衡, 其中 n 可由下式获得:

$$n = \sqrt{BPP_{\text{slow}}/BPP_{\text{fast}}} \approx 9 \quad (5)$$

实验中采用双台阶镜进行光束整型,经过整型后,快轴方向束参积变为 $31.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$,慢轴方向变为 $32.6\text{mm} \cdot \text{mrad}$,两个方向的束参积基本对称。利用 CCD 对整型后的光斑分布情况进行了测试,测试结果如图 4 所示。为了减小像差,达到较高的耦合效率,实验设计了由多个透镜组成的聚焦系统完成了整个光束的聚焦。

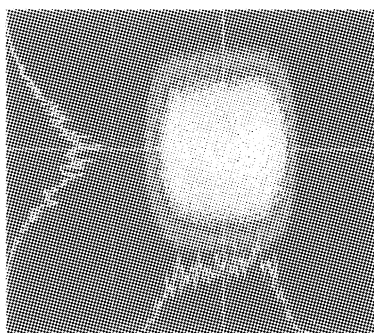


图 4 CCD 测试的整型后的光斑

Fig. 4 light spot after beam forming using CCD test

5 实验结果及分析

整个试验对光纤对准的精度要求很高,试验选用 NEWPORT 公司的 5 维精密调节支架完成。经过调试,大功率 DL 激光器在 50A 工作时,输出功率为 43.5W,经过 2m 长的光纤后,输出的功率为 31.5W,光纤输出光斑如图 5 所示,耦合效率达到 72%。经过实验结果分析,整个耦合系统中,光束整形部分是能量损失的关键环节,主要是由于微台阶镜加工十分困难,并且 45° 的高反膜质量未达到设计要求,造成能量的损耗。实验测试了系统的光-光转换效率曲线,如图 6 所示。随着 DL 输出功率的增加,光-光转换效率降低,这主要是由于慢轴方向随着功率增加,发散角增大,光束质量变差造成的。

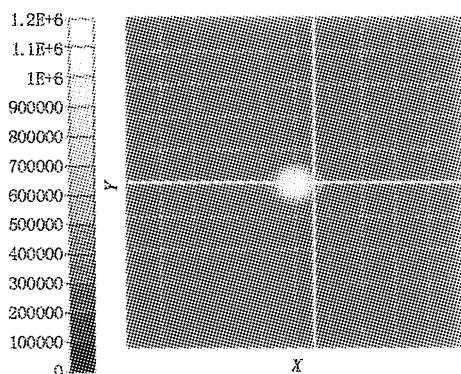


图 5 耦合后光纤输出光斑分布

Fig. 5 light spot distribution with fiber output after coupling

6 结论

通过对大功率 DL 输出光束特性的分析,设计了大功率 DL 光纤耦合系统,整个系统主要由大功率 DL 线阵模块、光束整型微台阶镜、耦合聚焦系统以及光纤接收器组成。根据实验结果,DL 单元线阵经过准直后,快轴方向的发散角小于 0.2° 。利用微台阶镜实现了大功率 DL 快轴、慢轴方向束参积的转换,简化了耦合聚焦系统的设计,提高了光-光转换效率和系统的稳定性。在光纤直径为 $800\mu\text{m}$,数值孔径为 0.22 的条件下,连续输出功率达到 31.5W,耦合效率达到 72%。随着光学加工手段的提高,将有望实现更高功率水平、更高耦合效率和亮度的半导体激光输出,对半导体激光器的直接应用具有重要的参考价值。

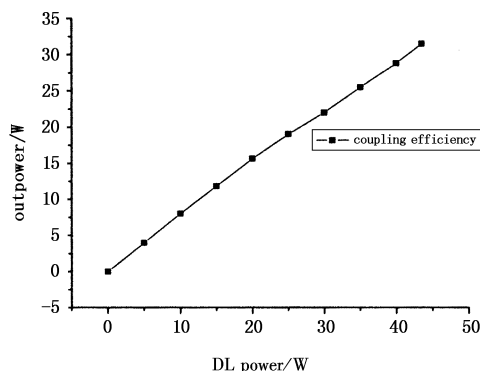


图 6 光-光耦合效率曲线

Fig. 6 coupling efficiency curve of light-light

参考文献:

- [1] Bachmann, Friedrich G. Chances and limitation of high power diode laser [C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5336 (6): 95 - 106.
- [2] Bachmann, Friedrich G. Present technology, industrial applications, and future prospects of high power diode lasers [C]//Proceedings of SPIE, 2002, 4762 (8): 1 - 15.
- [3] Bachmann, Friedrich G. Present status and future aspects of high power diode laser materials processing under the view of the German national research project [C]//Proceedings of SPIE, 2000, 3933 (6): 90 - 104.
- [4] M Behringer, F Eberhard, G Herrmann, et al. High power diode lasers technology and application in Europe [C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4831 (3): 4 - 13.
- [5] M Behringer, F Eberhard, G Herrmann, et al. More brilliance from high power diode laser [C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4993 (6): 68 - 76.