

文章编号: 0258-7025(2009)05-1097-04

双平行平面反射镜在激光二极管阵列 光束整形中的应用

王翠鸾 韩 淋 吴 芃 刘媛媛 李 伟 冯小明 王勇刚 刘素平 马晓宇

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 为了实现激光二极管阵列(LDA)的高亮度光纤耦合输出,设计了一套简单有效的光束整形系统。首先采用快慢轴准直透镜压缩 LDA 的发散角,然后采用双平行平面反射镜光束整形装置,将压缩后的 LDA 慢轴方向的光束分为 4 束(也可以根据需要分为任意多束),并将 4 束子光束在快轴方向重新排列,最后通过聚焦系统,将整形后的光束耦合进入芯径 $600\ \mu\text{m}$,数值孔径 0.37 的光纤。实验测得双平行平面反射镜整形装置的效率为 98.87%,系统的整体效率为 77.2%。该整形系统设计简单,效率高,具有很高的应用价值。

关键词 激光技术; 光束整形; 双平行平面反射镜; 激光二极管阵列; 光纤耦合; 高亮度

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1097

Study of the Beam Shaping of Laser Diode Arrays Using Two Parallel Plane Mirrors

Wang Cuiluan Han Lin Wu Peng Liu Yuanyuan Li Wei Feng Xiaoming
Wang Yonggang Liu Suping Ma Xiaoyu

(Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract In order to achieve high brightness fiber-coupled output of diode laser array, a simple but efficient system was designed. Firstly, the output beam from a laser diode arrays (LDA) was collimated by fast and slow axis collimation module. Secondly, the collimated beam in the slow axis was divided into 4 parts (any other amount of the divided parts if needed) by the beam-shaping set of two parallel plane mirrors, and then reordered in the fast axis. Finally, the shaped beams were focused into a fiber ($\phi 600\ \mu\text{m}$, $NA = 0.37$) by a focusing lens. The beam-shaping efficiency was 98.87%, and the total system efficiency was 77.2%. This beam-shaping system is simple but effective and useful.

Key words laser technique; beam-shaping; two parallel plane mirrors; laser diode array; fiber coupling; high brightness

1 引 言

激光二极管阵列(LDA)因其电光转换效率高、体积小、重量轻、可靠性高、寿命长等优点,在众多领域取得越来越广泛的应用,如抽运固体激光器、光纤激光器、材料加工、激光医疗、航空航天、军事等。但由于 LDA 特殊的波导结构和长条形结构特点使其输出光束在平行于 P-N 结方向(慢轴方向)和垂直

于 P-N 结方向(快轴方向)差异很大,快轴方向发散角很大,慢轴方向光束质量差,且快慢轴两个方向存在像差。LDA 输出光束的这些特性导致很难用传统的成像系统使其耦合进入光纤,严重限制了应用范围。

为了实现 LDA 的光纤耦合输出,国内外都进行了大量的研究,提出了很多整形方法,例如光纤合

收稿日期: 2008-06-13; 收到修改稿日期: 2008-09-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(6057604)资助课题。

作者简介: 王翠鸾(1980—),女,博士研究生,主要从事激光二极管阵列光束整形的研究。E-mail: clwang@semi.ac.cn

导师简介: 马晓宇(1966—),男,博士生导师,主要从事材料生长、大功率激光二极管阵列及其组件的研究。

E-mail: maxy@semi.ac.cn

束法^[1,2]、阶梯反射镜法^[3~5]、双反射镜法^[6,7]、多棱镜阵列法^[8]、微片棱镜堆法^[9,10]等。光纤合束法是一种简单有效的光束整形方法,但其结构特点限制了输出光束亮度的提高,目前国内商用的光纤合束耦合输出 LDA 模块光纤芯径约 1.1 mm,输出功率 30 W。阶梯反射镜法、多棱镜阵列法和微片棱镜堆法等虽可实现高亮度激光输出,但结构复杂,加工、装调困难,成本高。而双平行平面反射镜法是一种可实现 LDA 光纤耦合输出的简单有效的光束整形方法,由英国 Southampton 大学光电研究中心的 Clarkson 等人最早提出。系统整形聚焦后的效率为 75%,该系统中采用了很多柱透镜,而柱透镜加工和装调精度都不易控制,对入射光的发散角要求苛刻,不易于产品化生产。

本文通过对 LDA 输出光束特性的分析,首先压缩快慢轴两个方向的发散角,然后采用双平行平面反射镜进行光束重排,最后通过球对称聚焦系统,耦合进入纤芯 600 μm ,数值孔径 $NA=0.37$ 的光纤,整体效率达到 77.2%。

2 理论分析

2.1 LDA 输出光束的特性及整形基本原理

LDA 由多个发光区排列组成,一般为 10 mm 长,由于填充因子和出光间距不同,每个 LDA bar 条上一般分布 19 或 25 个发光单元,连续运转时出光功率 20~60 W。

为了较好地表征激光光束质量,引入了光束参数乘积(BPP)的概念,其定义为光斑直径与远场发散角的乘积^[11]

$$BPP = \omega \times \theta. \quad (1)$$

对 LDA 而言,快轴方向的光束参数乘积 $BPP_{\text{fast}} = \omega_{\text{fast}} \times \theta_{\text{fast}} \approx 1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,而慢轴方向的光束参数乘积 $BPP_{\text{slow}} = \omega_{\text{slow}} \times \theta_{\text{slow}} > 1000 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。光纤(以芯径 400 μm ,数值孔径 $NA=0.37$ 的光纤为例)的光束参数乘积 $BPP_{\text{fiber}} = \omega_{\text{fiber}} \times \theta_{\text{fiber}} \approx 300 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。慢轴方向的 BPP 值比光纤的 BPP 值大很多,而传统的光学成像系统不能改变光束参数乘积,所以不能把 LDA 的输出光直接耦合进入光纤。为了实现 LDA 的光纤耦合输出,必须将 LDA 的输出光束沿慢轴方向切割,并将切割后的子光束沿快轴方向重排(如图 1 所示),使慢轴方向的 BPP 值减小,快轴方向的 BPP 值增大。整形后的快慢轴方向的 BPP 值均不大于光纤的 BPP 值,才能实现高效率的光纤耦合输出。



图 1 光束整形原理示意图。(a)快、慢轴准直后 LDA 的辐射;(b)光束整形后 LDA 的辐射

Fig. 1 Schematic diagram of beam-shaping. (a) radiation of LDA after fast and slow axis collimation; (b) radiation of LDA after beam-shaping

2.2 双平行平面反射镜的光束重排原理

双平行平面反射镜整形原理示意图如图 2 所示。

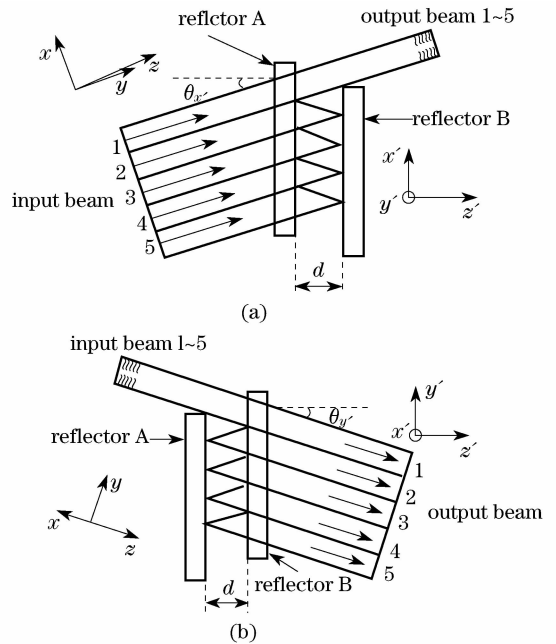


图 2 双平行平面反射镜整形原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two parallel plane mirrors beam-shaping

设压缩后的 LDA 输出光束慢轴方向为 x 轴,快轴方向为 y 轴,与之相对应的双平行平面反射镜的方向分别为 x' 和 y' , x 轴与 x' 轴成 $\theta_{x'}$ 角,而 y 轴与 y' 轴成 $\theta_{y'}$ 角。双平行平面反射镜由反射镜 A,B 组成,它们相互平行放置,镀反射膜的面朝向里,间距为 d ,并且在 x' 和 y' 方向上分别相互错开 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 。 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 的存在使得每个反射镜都有一部分未被对方挡住的区域,可以分别作为光束的入射孔和出射孔。假设把慢轴方向的光束分为 5 个子光束,子光束 1 未经过整形镜直接透过。子光束 2 入射到反射镜 B 上被 B 反射到反射镜 A 上,然后又被 A 反射输出。由于 $\theta_{x'}$ 和 $\theta_{y'}$ 的存在,光束 2 经过反射

镜 A 和 B 的反射后沿 x 方向平移 Δx , 沿 y 方向平移 Δy ,

$$\Delta x = 2 \times d \times \sin(\theta_x'), \quad (2)$$

$$\Delta y = 2 \times d \times \sin(\theta_y'). \quad (3)$$

同理, 子光束 3, 4 和 5 会在 x 方向产生 $2\Delta x$, $3\Delta x$ 和 $4\Delta x$ 的平移, 而相应地在 y 方向产生 $2\Delta y$, $3\Delta y$ 和 $4\Delta y$ 的平移。因为反射镜 A 和 B 是相互平行的, 所以出射光束只是发生位置的平移而传播方向不变。所以通过合理地选择 d, θ_x', θ_y' 的值和整形镜的位置, 就可以方便地控制压缩后的 LDA 的分束情况, 达到光束重排的目的。

3 实 验

3.1 装置及发散角压缩

LDA 光束整形系统的实验装置如图 3 所示。实验中所用的 LDA 是中国科学院半导体研究所工程中心生产的中心波长为 808 nm, 连续输出功率为 20 W 的 bar 条, 包含 19 个发光区, 条宽为 100 μm , 周期为 500 μm , 占空比为 20%。LDA 采用 CS 封装的形式, 通水制冷, 可保证连续条件下稳定可靠的工作。在水冷温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 28 A 连续电流条件下, 测得其输出功率为 26.8 W, 快轴方向的分束角为 63.8 $^{\circ}$ ($1/e^2$ 宽度), 慢轴方向的分束角为 10.7 $^{\circ}$ ($1/e^2$ 宽度)。

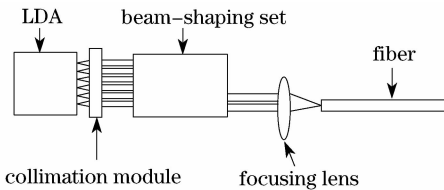


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup diagram

因为 LDA 输出光束快轴方向的分束角很大, 慢轴方向存在空区, 所以在进行光束重排之前, 必须先进行分束角的压缩。选用德国 LIMO 公司生产的快慢轴准直微透镜组进行快慢轴两个方向分束角的压缩。压缩后, 输出功率为 26.5 W, 快轴方向的分束角为 0.21 $^{\circ}$ ($1/e^2$ 宽度), 束宽为 0.85 mm($1/e^2$ 宽度), 慢轴方向的分束角为 5.37 $^{\circ}$ ($1/e^2$ 宽度)。代入公式 (1), 计算得到 BPP_{fast} 值约为 3.1 mm · mrad, BPP_{slow} 值约为 890 mm · mrad。压缩后 LDA 输出光束慢轴方向的 BPP_{slow} 值约为光纤 $\text{BPP}_{\text{fiber}}$ 值的 3 倍, 所以为了实现高效的光纤耦合输出, 慢轴方向的光至少应分为 3 束, 在本实验中选择把慢轴方向的光束分为相等的 4 束。

3.2 光束重排

压缩后 LDA 输出光束慢轴方向的光斑尺寸约为 9.5 mm, 整形镜距离出光端面约为 15 mm, 由于慢轴方向还存在 5.37 $^{\circ}$ 的分束角, 此时的慢轴光斑约为 11 mm。把 LDA 慢轴方向的输出光束平均分为四段时, $\Delta x = 11/4 = 2.75$, $\Delta y \approx 0.85 \times 1.3 = 1.1$ mm, Δy 值比快轴束腰宽度大 1.3 倍的目的是减小光能的损失。由于 $\Delta x = 2 \times d \times \sin(\theta_x')$, $\Delta y = 2 \times d \times \sin(\theta_y')$, 所以可以合理地选择镜间距 d 和入射角 θ_x', θ_y' 的值达到光束整形的目的。综合以上考虑, 选择间距 $d = 2.5$ mm, 则 $\theta_x' = \text{asin}[\Delta x / (2 \times d)] = 33.37^{\circ}$, $\theta_y' = \text{asin}[\Delta y / (2 \times d)] = 12.7^{\circ}$, 总的入射角 $\theta = \text{acos}[\cos(\theta_x') \times \cos(\theta_y')] = 35.4^{\circ}$ 。在实际应用中, 间距 d 与理想值总会有一定的误差, 但误差范围只有十几到几十个微米, 可以通过对 θ_x' 和 θ_y' 进行微调, 达到预设的 Δx 和 Δy 值, 而因为反射膜在一定的角度范围内都有很高的反射率, 所以不会影响整形效率。

用电子束镀膜机在 2 mm 厚的平板玻璃片上镀膜, 得到在入射角为 35 $^{\circ} \pm 5^{\circ}$, 波长为 808 ± 10 nm 范围内反射率 $R > 99.9\%$ 的反射镜。把两片镀膜好的反射镜粘成一体 (间距 2.5 mm, 平行度小于 30 s, $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 值为 5 mm), 即为双平行平面镜整形装置的核心部件。双反射镜间的平行度是影响整形后光束质量的重要因素, 因为如果双反射镜间有夹角 θ , 子光束的传播方向会偏离原传输方向 $N \times \theta$ (N 为子光束被反射的次数), 相当于使得慢轴方向的整体分束角增加了 $N \times \theta$, 会增加聚焦、耦合的难度, 影响系统的整体效率。

把粘好的双平行平面反射镜放置在六维调整架上, 精确调节位置和角度, 即可实现压缩后的 LDA 输出光束在慢轴方向的切割和在快轴方向的重排, 其输出光斑如图 4 所示。用功率计测得经双平行平面反射镜重排后的功率为 26.2 W, 整形效率为 98.87%。

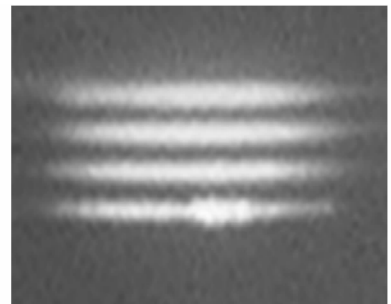


图 4 通过双平行平面反射镜光束整形后的光斑图

Fig. 4 Optical spot after two parallel plane mirrors beam-shaping

最后把重排后的光束用聚焦透镜组进行聚焦,耦合进入芯径 $600\ \mu\text{m}$,数值孔径 0.37 的光纤。功率计测得通过聚焦透镜后的功率为 24.84 W,出纤功率为 20.89 W,通过计算可以知道,聚焦透镜组的聚焦效率为 94.8%,出纤效率(光纤输出功率/聚焦后的功率)约为 84.1%,系统的整体效率约为 77.2%。

4 分析与讨论

从上面的数据结果可以看到快慢轴准直透镜和双平行平面反射镜都具有很高的效率,几乎没有多少光能的损失,影响系统整体效率的主要因素是聚焦、耦合入纤效率太低。其原因为整形后的快慢轴光斑大小和发散角都不同,而所用的聚焦透镜组是球对称的,使得聚焦后的光束存在较大的像散,聚焦光斑尺寸偏大,耦合输出的光纤见理想值($\phi 400$)要大。

在进一步的研究中,计划通过改进聚焦透镜的设计,采用非圆对称的椭圆透镜或加入柱透镜,使透镜聚焦后的像散减少,从而使光斑达到最小,进一步提高入纤效率。同时,在多分几束的情况下,使得快轴和慢轴方向的光束参数乘积更接近,从而耦合进入更细、数值孔径更小的光纤,进一步提高输出光的亮度。还可以采用光纤进行快轴压缩,在多分几束,同时改进聚焦系统的情况下,也可以实现 $400\ \mu\text{m}$ 光纤耦合输出。

5 结 论

通过对 LDA 输出光束特性的分析,设计了双平面平行高反镜的结构参数,先用德国 LIMO 公司的快慢轴准直微透镜组进行发散角的压缩,然后采用双平行平面反射镜进行光束重排,整形装置的效率为 98.87%,最后通过球对称聚焦系统,耦合进入纤芯 $600\ \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.37$ 的光纤,整体效率达到 77.2%。整个整形系统具有结构简单、加工镀膜方

便、装调容易、效率高、成本低、参数可调,可用于产品化生产等优点。

参 考 文 献

- 1 Th. Graf, J. E. Balmer. High-power Nd:YLF laser end pumped by a diode-laser bar[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1317~1319
- 2 Wang Xiaowei, Xiao Jianwei, Ma Xiaoyu *et al.*. Fiber coupling of laser diode bar to multimode fiber array [J]. *Chinese. J. Semiconductors*, 2002, **23**(5):464~467
- 3 B. Ehlers, K. Du, M. Baumann *et al.*. Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays[C]. *SPIE*, 1997, **3097**:639~644
- 4 Gao Xin, Bo Baoxue, Qu Yi *et al.*. 808 nm output from a single-fiber-coupled laser diode array[J]. *Chinese. J. Laser*, 2006, **33**(Suppl.):56~58
高欣,薄报学,曲轶等. 808 nm 波长阵列半导体激光器单光纤耦合输出[J], *中国激光*, 2006, **33**(Suppl.):56~58
- 5 Niu Gang, Fan Zhongwei, Wang Peifeng *et al.*. A single fiber coupling module with the output power of 50W [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(6):427~429
牛岗,樊仲维,王培峰等. 50 W 半导体激光阵列单光纤耦合模块[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(6):427~429
- 6 W. A. Clarkson, D. C. Hanan. Two-mirror beam-shaping technique for high-power diode bars[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6):375~377
- 7 Yang Huan, Zhou Chongxi, Du Chunlei *et al.*. Design of two mirror beam-shaping and fiber coupling for diode bars[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8):32~36
杨欢,周崇喜,杜春雷等. 平面镜半导体光束整形的设计优化与光纤耦合[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8):32~36
- 8 Satoshi Yamaguchi, Tetsuro Kobayashi, Yoshimasa Saito *et al.*. Collimation of emissions from a high-power multistripe laser-diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8):898~900
- 9 Shi Peng, Li Xiaoli, Zhang Guifen *et al.*. Micro-Prism stack beam shaper for high power laser diode array[J]. *Acta. Optica Sinica*, 2000, **20**(11):1544~1547
石鹏,李小莉,张贵芬等. 大功率激光二极管的微片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出[J]. *光学学报*, 2000, **20**(11):1544~1547
- 10 Lu Yutian, Liu Liren, Jiang Jianzhong *et al.*. linear beam shaping set[P]. China Patent: ZL99124019, 2000-05-17
陆雨田,刘立人,江建中等. 线光束整形装置[P]. 中国专利, ZL99124019, 2000-05-17
- 11 Lü Baida. *Laser Optics; Beam Description, Transmission and Optical Cavity Physics* [M]. Third Edition. Beijing: High Education Press, 2003. 36
吕百达. *激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理* [M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2003. 36