

基于平行玻璃板阵列的二极管激光线阵光束整形

郭林辉^{1,2} 吴华玲^{1,2} 余俊宏^{1,2} 王昭^{1,2} 谭昊^{1,2} 高松信^{1,2} 武德勇^{1,2*}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 二维轴向光束质量的不均衡是二极管激光线阵应用的最大瓶颈,但利用光束整形技术可加以改善。基于平行玻璃板对光束的偏移作用,设计一种以线阵中独立发光单元作为整形对象的平行玻璃板阵列光束整形方法,可减小整形中慢轴光束能量损失,实现二维轴向光束质量的高效率调整。针对 12 个发光单元的短二极管激光线阵开展验证实验,结果表明,整形效果符合模拟结果,整形效率达 93.62%。

关键词 激光器; 二极管激光; 平行玻璃板阵列; 光束整形

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.051401

Beam Shaping Based on Parallel Glass Plate Arrays for Diode Laser Array

Guo Linhui^{1,2} Wu Hualing^{1,2} Yu Junhong^{1,2} Wang Zhao^{1,2} Tan Hao^{1,2}
Gao Songxin^{1,2} Wu Deyong^{1,2}

¹*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

²*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

Abstract Major drawback of diode laser array is its asymmetric beam quality, which can be improved by beam shaping. Parallel glass plate arrays are used in beam shaping for single emitter of diode laser array based on its beam displacement property, which can reduce power loss in slow axis and adjust beam quality with high efficiency in both axes. Validated experiment based on a short diode laser array with 12 emitters is carried out, and the results indicate that the beam shaping effect is according with the simulation, and the beam shaping efficiency is 93.62%.

Key words lasers; diode laser; parallel glass plate array; beam shaping

OCIS codes 140.2010; 140.2020; 140.3300; 130.3990

1 引言

二极管激光器线阵(DLA)因其电光转换效率高、体积小、重量轻等优点,在众多领域取得越来越广泛的应用,如抽运固体/光纤激光器、材料加工、生物医学、军事国防等。但由于 DLA 特殊的波导结构和长条形结构,导致输出光束在平行于 P-N 结方向(慢轴)和垂直于 P-N 结方向(快轴)的差异很大,快轴方向发散角很大,慢轴方向光束质量差,且两个方向存在像差。DLA 输出光束的以上特性严重限制了其应用范围。为了更好地应用 DLA 光源,需要根据使用要求,对其出射光束进行光束整形。

目前国内外已经有许多针对 DLA 的光束整形方法,其中的棱镜组整形^[1-2]、平行玻璃板^[3-4]、台阶镜^[5]等

收稿日期: 2015-09-08; **收到修改稿日期:** 2015-12-02; **网络出版日期:** 2016-04-23

基金项目: 中国工程物理研究院培育专项(909PY-4)

作者简介: 郭林辉(1982-),男,硕士,助理研究员,主要从事大功率半导体激光光束整形技术方面的研究。

E-mail: glh863@163.com

* **通信联系人.** E-mail: 020222102b@163.com

方法已被大量研究及应用。该类器件的优点是整形思路简单,通过折射或反射方法,沿 DLA 慢轴方向根据需要进行光束切割、重排,实现快慢轴光束质量的调整。其次,该类整形器件属无光焦度器件,整形中具有不引入像差的优点,同时成本较为低廉,易加工。但是该类方法的缺点是在光束切割、重排中,能量损失较大,整形效率一般不超过 90%^[3-4],能量损失原因除器件制作缺陷、装调等因素外,主要原因是该类方法设计中,常常根据切割的份数,针对 DLA 慢轴整体光斑进行切割、重排,导致光束切割点(线)可能处在 DLA 中发光单元上,同时慢轴方向的准直镜焦距受发光区间隔尺寸限制,边缘光不能实现较好准直,造成光能量损失^[5-8]。

设计了一种特殊结构的平行玻璃板阵列整形器件,针对 DLA 中独立发光单元进行光束错位、重排整形,有效克服了以往针对慢轴方向整体切割、重排整形方法中能量损失大的缺点,最大程度利用了发光单元的能量,可提高光束整形的效率。

2 整形原理

2.1 DLA 光束特点

DLA 中由多个二极管激光单元按照特定比例线性排列组成,如图 1 所示, Z 轴方向代表激光出射方向, Y 轴代表快轴方向,发散角一般为 $60^\circ \sim 90^\circ$,快轴方向发光尺寸约为 $1 \mu\text{m}$, X 轴代表慢轴方向,发散角一般为 $8^\circ \sim 10^\circ$,典型尺寸为 10 mm (或称 DL bar),目前也有尺寸小于 10 mm 的短 DLA 阵列。光参数积是目前应用最广泛的评价光束质量的方法之一,用束腰半径和远场发散半角乘积来描述。对于 DLA,其快慢轴方向的光参数积相差很大。快轴方向光束质量相对较好,几乎接近衍射极限,慢轴方向光束质量较差,一般为快轴方向的几十倍甚至上千倍。

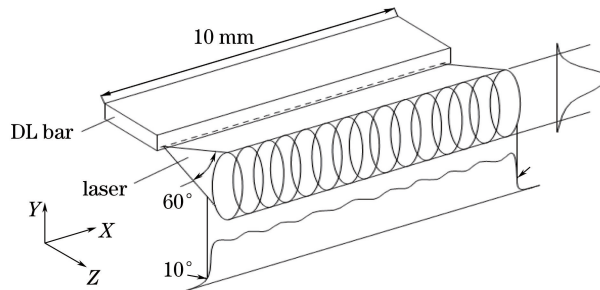


图 1 DLA 的光束特点

Fig. 1 Beam characteristics of DLA

2.2 平行玻璃板的光束整形原理

平行玻璃板对光束有偏移作用,如图 2 所示。平行玻璃板沿 Z 轴方向水平放置,其下底角为 θ ,底边长为 l 。光束沿水平方向以 α 入射,进入玻璃后折射角为 β ,折射光束与水平反向夹角为 x ,光束经过玻璃板后出射方向与入射方向平行,其 Y 方向的偏移量为 Δh 。为了表示方便,标记 3 个点 A、B、C,其位置见图 2 所示,其中 AC 为入射角的法线方向,将 AB 之间距离记为 l_1 ,AC 之间距离记为 l_2 。

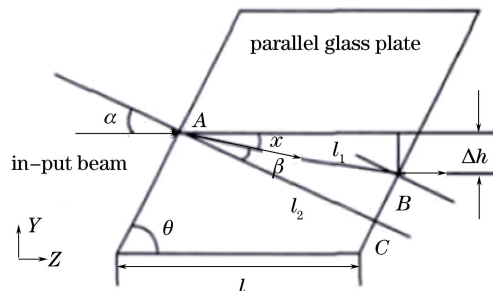


图 2 平行玻璃板对光束的偏移作用

Fig. 2 Beam displacement after through parallel glass

设空气的折射率为 n_0 , 平行玻璃板材料的折射率为 n_1 , 相对折射率 $n = n_1/n_0$, 由斯涅耳定律及几何关系, 可计算得到:

$$\Delta h = \frac{l \sin \theta}{\cos [\arcsin(\cos \theta/n)]} \times \sin \left[90^\circ - \theta - \arcsin \left(\frac{\cos \theta}{n} \right) \right]. \quad (1)$$

由(1)式可以看出, 偏移量 Δh 仅与玻璃板的底边 l 、底角 θ 以及材料的相对折射率 n 有关。若 θ 及 n 固定, 调节底边长 l 即可控制偏移量 Δh 。

3 平行玻璃板阵列整形器件设计

为简化分析, 以美国 QPC 激光器公司生产的短阵列 DLA 为原型进行设计。该激光器中发光单元条宽为 $100 \mu\text{m}$, 有源层厚度为 $1 \mu\text{m}$, 间距为 0.5 mm , 共包含 12 个发光单元, 慢轴发散角不大于 9° (包含 90% 能量), 快轴发散角不大于 75° (包含 90% 能量), 额定输出功率为 60 W , 中心波长为 $808 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ 。计算出该激光器在快慢轴的光参数积分别为 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 和 $47.37 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 可见快慢轴光参数积相差 150 多倍, 两个轴向光束质量均衡性极差。

设计了一种整形系统, 主要包括快轴准直单元、快轴方向错位单元及慢轴方向平移单元 3 部分, 分别记为 FAC (快轴准直透镜)、 P_1 、 P_2 , 其中错位及平移单元的组件由 3 种不同参数平行玻璃板根据特定方式组合构成, 如图 3 所示。为便于描述, 将不同参数玻璃板分别标记为 A、B、C, 其中 A、B 组件按照 A+B+反向放置 A 的组合方式, 依次沿慢轴方向排列组成 P_1 单元, P_2 单元由 A+C+反向放置 A 依次沿快轴方向组成, 形成一个 3 层结构。

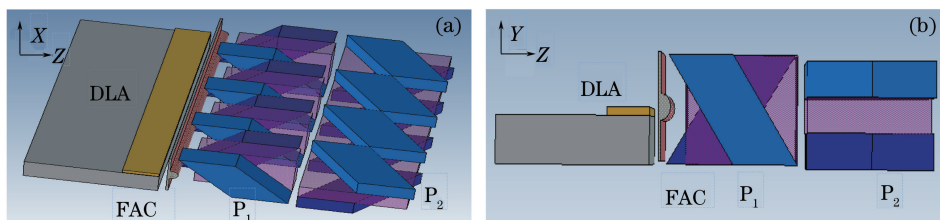


图 3 平行玻璃板对光束的偏移作用。(a) 俯视图; (b) 侧视图

Fig. 3 Schematic of beam shaping system. (a) Planform; (b) side view

其中快轴准直部分采用商品化的非球面快轴准直透镜, 可实现快轴光束的高效准直^[6], 型号选择德国 LIMO 公司 FAC410, 有效焦距为 0.41 mm , 准直后理想发散角为 3.0 mrad (包含 85% 能量)。

基于 2.2 节中的计算方法, 对图 3 中整形单元组件的尺寸及角度进行了设计, 主要参数见表 1 所示, 其中 A、B、C 单元件的宽度和激光器中发光单元间距相同, 均设计为 0.5 mm , 其余参数均根据(1)式计算获得, 组件材料为 SF11, 折射率为 1.75。

表 1 玻璃平板的主要参数

Table 1 Primary parameters of parallel glass plate

Type	Length /mm	Width /mm	Highness /mm	Angle /($^\circ$)	Remark
A	1.73	0.50	2.36	60/120	parallelogram
B	2.26	0.50	1.50	90	cuboid
C	6.00	0.50	2.26	90	cuboid

利用 ZEMAX 光学软件, 对 DLA 出射光束经过整形器件的光束特性进行了光学追迹, 如图 4 所示, 其中图 4(a)和(b)分别为慢轴和快轴方向的光线追迹效果图。

DLA 中发光单元先经 FAC 透镜在快轴方向上准直, 其准直效果光强度分布见图 5(a)所示, 然后利用 P_1 单元中的平板玻璃阵列把发光单元沿快轴方向平移分割成 3 组, 在慢轴方向上被分成了 4 组, 其强度分布见图 5(b)所示, 再利用 P_2 单元中的平板玻璃阵列把错位的 4 组光点在慢轴方向上平移对齐, 见图 5(c)所示, 从而实现 DLA 中慢轴方向发光单元在空间上向快轴方向的转移, 实现光束整形及光参数积的调整。

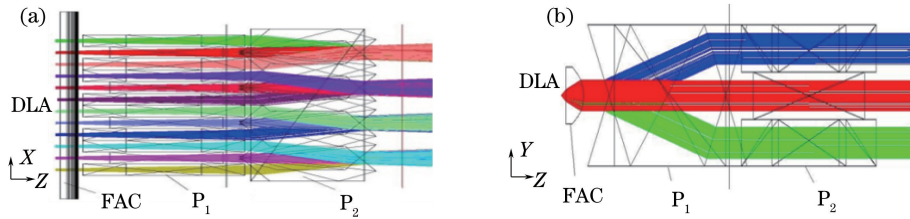


图 4 光束整形过程的光线追迹。(a) 慢轴方向；(b) 快轴方向

Fig. 4 Ray-tracing for beam shaping process. (a) Slow axis; (b) fast axis

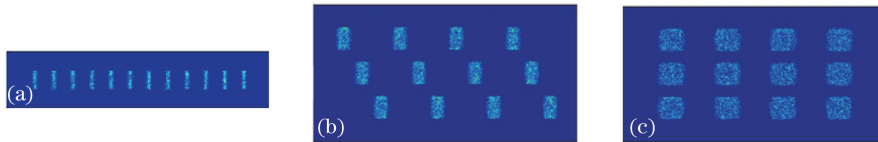


图 5 光束整形过程强度分布。(a) FAC 透镜后；(b) P1 单元中的平板玻璃阵列后；(c) P2 单元中的平板玻璃阵列后

Fig. 5 Intensity distributions in beam shaping process. (a) After FAC lens;

(b) after glass plate array in P1; (c) after glass plate array in P2

DLA 光束经过平行玻璃板阵列光束整形的优点主要有：1) 如果 DLA 采用标准微通道冷却器封装，冷却器的典型厚度为 1.8 mm，该整形方式可巧妙填充快轴方向由于封装引入的间距（“死区”），成倍提高光源的亮度及功率密度，可拓展应用到 DLA 叠层阵列光源研制中；2) 针对单独发光单元在空间位置上进行了重新排布，成倍增大了发光单元之间的间距（由 0.5 mm 增加到 1.5 mm），因此，有利于后续使用长焦距的柱面准直透镜阵列针对单个发光点进行慢轴准直，可获得高效率的准直效果，利于后续的聚焦或耦合输出。

4 实验研究

实验中采用传导冷却方式封装的 DLA 激光器（12 个发光单元），具体参数见第 3 节所述，采用 FAC410 非球面透镜对快轴光束进行准直，准直后快轴远场实测发散角为 5 mrad，对应包含 95% 能量，远场测试光斑见图 6 所示。根据表 1 中设计参数，加工了平行玻璃板器件，精密组装成平行平板玻璃阵列组件，实物如图 7 所示，器件中光束入射及出射面均镀高透过率薄膜，对 808 nm 的透过率大于 99.5%。

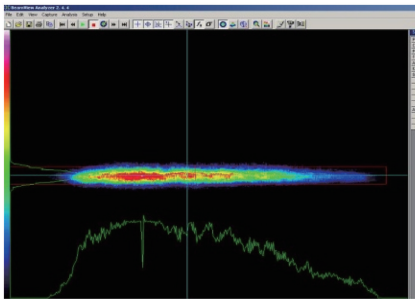


图 6 FAC 透镜准直后的远场光斑

Fig. 6 Far-field intensity distribution after FAC lens collimation

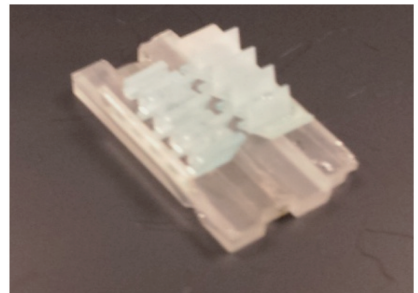


图 7 平行玻璃板阵列器件实物图

Fig. 7 Picture of parallel glass plate arrays

为验证整形过程光束的变换情况及掌握能量损失情况，利用分离的平行玻璃板阵列整形组件依次对 DLA 中发光单元开展了准直、错位、平移实验，由于实验中没有慢轴准直透镜阵列，为便于监测发光单元，验证整形过程中发光单元位置的变换，在光路后端增加了一个焦距为 50 mm 的成像透镜，利用电荷耦合器件（CCD）监测光束状态，DLA 激光束经过 FAC 透镜、P₁、P₂ 后的光斑如图 8 所示。

由图 8 中可以看出，整形后光斑清晰完整，错位及平移过程与理论符合度较高。在实验过程中，对各单元组件前后的功率进行了测试，该整形方法（错位组件 P₁ + 平移组件 P₂）的总体效率为 93.62%，各环节功率测试结果见表 2 所示。

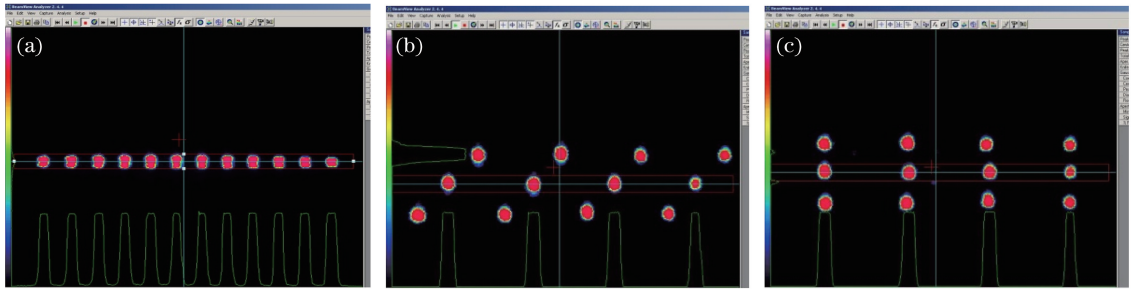


图 8 光束强度分布测试结果。(a) FAC 透镜后；(b) P_1 单元中的平板玻璃阵列后；(c) P_2 单元中的平板玻璃阵列后

Fig. 8 Test results of beam intensity distribution. (a) After FAC lens;

(b) after glass plate array in P_1 ; (c) after glass plate array in P_2

表 2 功率测试结果

Table 2 Test results of output power

	After DLA	After FAC lens	After glass plate array P_1	After glass plate array P_2
Power /W	60.10	59.23	57.02	55.45
Efficiency /%	--	98.55	96.26	97.24

通过对实验结果分析,得到平行玻璃板阵列整形过程能量损失的原因主要有:1)“smile”效应^[9]。DLA 封装过程由于存在应力,会产生“smile”效应,导致线阵列中发光单元沿快轴出现微小位移,引起错位及平移整形中光能量的损失;2) 件缺陷。平行玻璃板尺寸较小,加工及组装中的微小偏差,均会对光束边缘部分起到“裁剪”作用,引起能量损失,同时也会导致光束重排后位置出现偏差,如图 8(c)中第 3 列光斑。

5 结 论

设计一种 DLA 光束整形的方法,以 DLA 中发光单元作为整形对象,通过平行玻璃板阵列实现 DLA 中慢轴光束的错位、重排,实现快慢轴光束质量的调整。采用自研的整形器件针对短 DLA 进行整形实验,实验结果显示,光束整形效果良好,光束传输效率达 93.62%。

参 考 文 献

- Bonora S, Villoresi P. Diode laser beam shaping by optical path equalization[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9(5): 441-445.
- Pan Yuanyuan, Cui Ruizhen, Chen Gang, *et al.*. Beam-shaping technique for laser diode bars with prism group[J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 370-374.
潘圆圆, 崔瑞帧, 陈刚, 等. 用于半导体激光器的棱镜组光束整形方法[J]. 激光技术, 2006, 30(4): 370-374.
- Li Mingwei, Yu Xiaochen, Shao Xiaoyang, *et al.*. Laser diode array beam shaping based on parallel glass plate[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(5): 864-869.
李明伟, 于晓晨, 邵晓阳, 等. 基于平行玻璃板的半导体激光器阵列光束整形[J]. 应用光学, 2013, 34(5): 864-869.
- Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202010.
彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠, 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202010.
- Gao Xin, Bo Baoxue, Qiao Zhongliang, *et al.*. Single fiber coupling of multi-linear array diode lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(7): 1229-1233.
高欣, 薄报学, 乔忠良, 等. 多线阵半导体激光器的单光纤耦合输出[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1229-1233.
- Guo Linhui, Gao Songxin, Wu Deyong, *et al.*. Beam collimation of diode laser vertical stack[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 557-580.
郭林辉, 高松信, 武德勇, 等. 二极管激光器垂直阵列光束精密准直[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 557-580.
- Wang P Y, Gheen A. Beam shaping technology for laser diode arrays[C]. SPIE, 2002, 4770: 131-135.

- 8 Cao Yinhua, Liu Youqiang, Qin Wenbin, *et al.*. Kiowatt diode laser with beam quality better than all-solid-state laser [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2283-2285.
曹银花, 刘友强, 秦文斌, 等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2283-2285.
- 9 Guo Linhui, Tang Chun, Wu Deyong, *et al.*. Measurement of "smile" for high-power diode laser array[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 196-197.
郭林辉, 唐 淳, 武德勇, 等. 大功率二极管激光线阵的"smile"测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 196-197.