

文章编号: 0258-7025(2008)04-0505-04

# 半导体激光线阵弯曲矫正方法的理论分析与实验

邓鑫李<sup>1,2</sup> 刘云<sup>1</sup> 尹红贺<sup>1</sup> 张岩<sup>1,2</sup> 顾媛媛<sup>1,2</sup> 冯广智<sup>1,2</sup> 单肖楠<sup>1,2</sup> 王立军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 半导体激光线阵(LDB)在制作和封装过程中会发生弯曲,从而引起发光弯曲,即“smile”,这影响其在抽运固体激光和外腔半导体激光阵列线宽窄化中的使用。利用平凸柱面镜在一定程度上可矫正半导体激光线阵的“smile”。通过几何光学方法对平凸柱面镜矫正半导体激光线阵的“smile”进行理论分析,利用不同焦距平凸柱面镜对不同半导体激光线阵的“smile”进行矫正,并通过 ORIGIN 软件对“smile”的矫正进行模拟,其结果与实验相吻合。结果显示,抛物线状“smile”矫正效果很好,相对矫正量高达 90%,选择合适小焦距平凸柱面镜对“smile”矫正较明显且模拟误差小,修正透镜焦距参数可减小误差。

**关键词** 激光技术;线阵;“smile”矫正;平凸柱面镜

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Theoretical Analysis and Experiment of “Smile” Correction for Diode Laser Bar

Deng Xinli<sup>1,2</sup> Liu Yun<sup>1</sup> Yin Honghe<sup>1</sup> Zhang Yan<sup>1,2</sup>

Gu Yuanyuan<sup>1,2</sup> Feng Guangzhi<sup>1,2</sup> Shan Xiaonan<sup>1,2</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Laser diode bar (LDB) curvature, namely “smile” produced in the manufacturing and packaging process, affects the application of LDB in laser diode pumped solid-state laser and external cavity laser diode array. Using plano-convex cylindrical lens, “smile” can be corrected to some extent. By geometrical optics approach and ORIGIN software, “smile” correction was simulated and coincided with the experiment. The results show that this method works best if the “smile” is a parabolic curvature, and the relative correction value can be as high as 90%. “Smile” is corrected obviously by using suitable lens with short-focal length. Moreover, error can be further reduced by amending focal length of lens.

**Key words** laser technique; laser diode bar; “smile” correction; plano-convex cylindrical lens

## 1 引言

半导体激光线阵(LDB)由于结构紧凑、功率大、效率高等优点,在激光加工、抽运固态激光等方面有着广泛的应用<sup>[1~6]</sup>。通常半导体激光线阵长约 10 mm,包含许多发光单元(10~50 个),每个发光单元大小一般为  $1 \mu\text{m} \times (50 \sim 200) \mu\text{m}$ ,发光单元间

距为 200~500  $\mu\text{m}$ 。由于有源层截面的不对称性,垂直于结平面(快轴)和平行于结平面(慢轴)的发散角分别为  $30^\circ \sim 40^\circ$  和  $8^\circ \sim 10^\circ$ ,光束质量较差。此外,半导体激光线阵与热沉键合的制作过程存在热应力,使半导体激光线阵中各个发光单元在垂直方向发生偏移,从而引起发光弯曲,文献中往往称之为

收稿日期:2007-08-17; 收到修改稿日期:2007-11-07

基金项目:吉林省科技发展计划重点项目(20060326)资助课题。

作者简介:邓鑫李(1982—),男,山西人,硕士研究生,主要从事大功率半导体激光技术方面的研究。

E-mail: dxlciomp@126.com

导师简介:王立军(1946—),男,吉林人,研究员,博士生导师,主要从事半导体激光及其应用技术方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

“smile”问题<sup>[6,7]</sup>,这增加了快轴准直镜引起的离轴像差,通常 $5\ \mu\text{m}$ 的“smile”引起2倍光束质量的降低<sup>[7]</sup>。另外,外腔半导体激光阵列实验中“smile”对光谱线宽窄化的影响较大<sup>[8~10]</sup>,因此减小半导体激光线阵的“smile”很有必要。通常,使用与GaAs衬底热膨胀系数匹配的CuW合金作热沉或在焊接时设计均匀加载方式及焊接工艺参数可从器件本身减小半导体激光线阵的“smile”<sup>[6]</sup>。另外,利用外部光学系统也可以矫正半导体激光线阵的“smile”,如U. S. Patent 6,166,759中通过弯曲快轴准直镜玻璃光纤,U. S. Patent 7,075,739通过快轴准直镜与棱镜阵列组合来矫正半导体激光线阵的“smile”,不过前者弯曲光纤的装置较为复杂而后者加工较难,成本高。本文利用平凸柱面镜对半导体激光线阵的“smile”进行外部矫正,并对其进行模拟,这种方法简单且成本低。

## 2 理论分析

旋转平凸柱面镜可以矫正半导体激光线阵的“smile”。首先,采用与文献[7]相似的方法推导光线通过倾斜柱面镜后偏移的模拟公式。如图1所示,半导体激光线阵每个发光单元的光入射到倾斜柱面镜上,“smile”边缘光线a与中心光线b相当于入射到两个厚度差为 $\Delta d$ 的倾斜平行平板上,由平行平板光线偏移公式<sup>[11]</sup>可得距离中心为 $h$ 的边缘光线相对中心光线偏移量 $\Delta y$

$$\Delta y = \Delta d \sin \alpha \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \approx \alpha \Delta d (1 - 1/n), \quad (1)$$

其中 $\alpha$ 为弧度制, $n$ 为透镜折射率, $n \approx 1.5$ 。

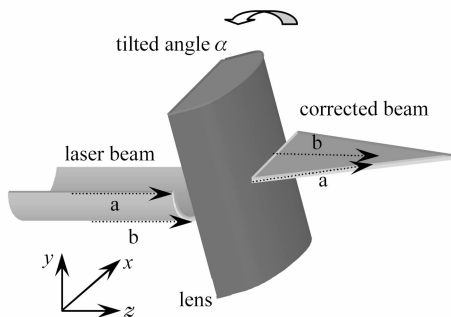


图1 平凸柱面镜矫正“smile”原理图

Fig. 1 Schematic diagram of “smile” correction with cylindrical lens

如图2所示,柱面镜球面曲率半径为 $R$ ,焦距为 $f$ ,入射到柱面镜慢轴方向( $x$ 方向)的光束宽度为

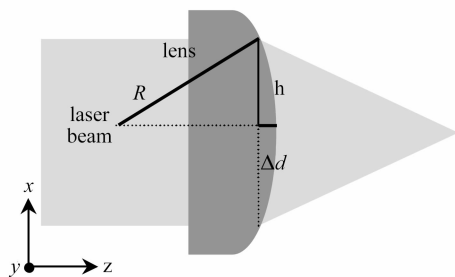


图2 平行激光束入射平凸柱面镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser beam passing through a cylindrical lens

$2h$ 。由磨镜者公式<sup>[11]</sup>可知平凸柱面镜焦距 $f$ 为

$$f = \frac{1}{(n-1)(1/R - 1/r)} = \frac{R}{(n-1)} \approx 2R, \quad (2)$$

$$\Delta d = R \left[ 1 - \sqrt{1 - (h/R)^2} \right] \approx h^2 / f (1 + h^2 / f^2), \quad (3)$$

$$\text{当 } h/f \ll 1 \text{ 时, } \Delta d \approx h^2 / f. \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式可得模拟公式<sup>[7]</sup>

$$\Delta y \approx \alpha \Delta d (1 - 1/n) \approx \alpha h^2 / f, \quad (5)$$

根据(5)式可对半导体激光线阵中每个距离中心发光单元为 $h$ 的光束通过倾斜 $\alpha$ 角度柱面镜后的偏移量进行近似计算。

非近似时,由(1)~(3)式可得理论公式

$$\Delta y = (n-1)f \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left\{ h / [(n-1)f] \right\}^2} \right\} \times \sin \alpha \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right). \quad (6)$$

图3为 $h = 5\ \text{mm}$ ,不同焦距柱面镜旋转 $10^\circ$ , $20^\circ$ , $40^\circ$ 时,由理论公式(6)与模拟公式(5)得到的边缘光线相对中心光线偏移量的相对误差值。(5)式中 $f$ 与 $\Delta y$ 成反比,小焦距透镜偏移量大,有利于矫正“smile”,但焦距太小,相对误差变大;而焦距越

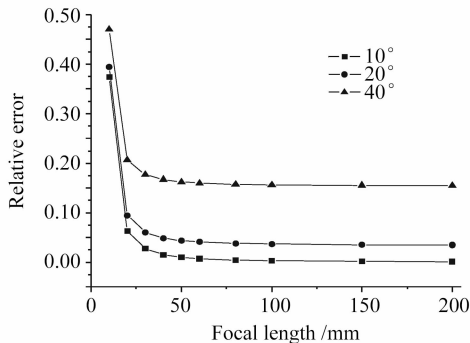


图3 不同焦距柱面镜旋转不同角度时理论公式与模拟公式得到的偏移量的相对误差

Fig. 3 Relative error of displacement using different formulas

大,由(5)式可知对于矫正一定量的“smile”偏移量,需很大的旋转角度,此时相对误差也较大。因此, $f$ 应选择合适的折衷值。另外,旋转角 $\alpha$ 一定时,(5)式得到的偏移量比(6)式的小,修正(5)式中焦距可减小误差。

### 3 “Smile”矫正的模拟与实验分析

图4为测量并矫正半导体激光线阵的“smile”的光学装置。实验中使用808 nm波长的激光线阵808A和808B,每个半导体激光线阵长10 mm,由19个发光单元组成,慢轴发散角约为 $8^\circ$ 。808A和808B快轴方向( $y$ 方向)都设有快轴准直镜,焦距分别为0.86 mm和0.64 mm。柱面镜1与柱面镜2平行共焦点放置(平行度误差小于 $1^\circ$ )组成倒置望远系统,对慢轴进行一定程度准直,准直后半导体激光线阵成像在屏上,由此可测得“smile”像的大小,实验中利用CCD相机对“smile”像进行记录。实际半导体激光线阵的“smile”大小 $\Delta y_0$ <sup>[10]</sup>为

$$f_c/\Delta y_0 = z/\Delta y, \quad (7)$$

其中 $f_c$ 为快轴准直镜焦距, $z$ 为屏与快轴准直镜的距离, $\Delta y$ 为 $z$ 处“smile”像的大小。

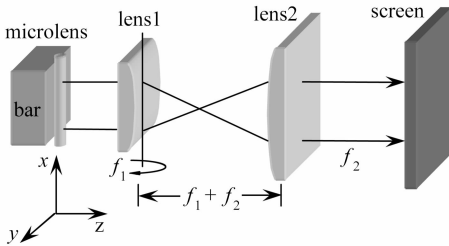


图4 测量并矫正“smile”的光学装置

Fig. 4 Optical arrangement of measuring and correcting “smile”

柱面镜1固定在可旋转调整架上,以 $x$ 轴旋转可矫正半导体激光线阵的“smile”。根据理论分析,选用焦距为20 mm和40 mm的柱面镜1分别对“smile”的矫正进行分析,柱面镜2焦距为75.6 mm。

对“smile”矫正进行模拟,首先测量矫正前屏上“smile”的像,并以中间发光单元为参考点对“smile”的像进行数值拟合,由公式(7)可得 $f_1$ 处柱面镜1上“smile”像的数值拟合像,然后由模拟公式(5)可知柱面镜1旋转 $\alpha$ 角度时,每个发光单元在 $y$ 方向的矫正量,利用ORIGIN软件进行数值计算并模拟,得到矫正后屏上“smile”的像。图5(a)和(b)为40 mm焦距柱透镜1旋转不同角度时,808A实验

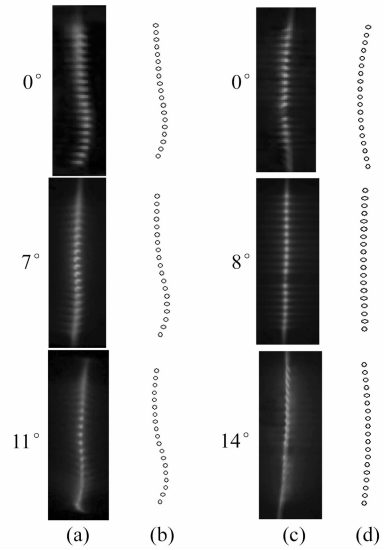


图5 不同焦距柱面镜1旋转不同角度时,808A与808B实验“smile”像(a)和(c)与模拟“smile”像(b)和(d)的变化情况

Fig. 5 Under different rotation angles of lens1 with different focal lengths, (a) and (b) are measured and simulated “smile” image of 808A, respectively, (c) and (d) are measured and simulated “smile” image of 808B, respectively

“smile”像(a)与模拟“smile”像(b)的变化情况;图5(c)和(d)为20 mm焦距柱透镜1旋转不同角度时,808B实验“smile”像(c)与模拟“smile”像(d)的变化情况。

利用接收屏上“smile”像的相对矫正量对“smile”的矫正效果进行分析。首先,“smile”像大小为屏上像弯曲的最大高度差,即最大峰值与最小峰值的距离差值。“smile”像的矫正量为旋转柱面镜1前后,屏上“smile”像大小的差值。“smile”像的相对矫正量定义为,“smile”像的矫正量与未旋转柱面镜1时的屏上“smile”像大小的比值。表1中,矫正前808A通过 $f_1 = 20$  mm柱面镜1与柱面镜2成像后的屏上“smile”像大小为1.7 mm,矫正后“smile”像大小为1.3 mm,“smile”像的矫正量为0.4 mm,“smile”像的相对矫正量为24%。另外,由表1可知抛物线状“smile”(808B)矫正效果明显,“smile”像的相对矫正量高达90%;小焦距柱面镜1对“smile”矫正较明显,这些与(5)式分析吻合,而且使用小焦距柱面镜1,倒置望远系统放大倍率大,“smile”像的测量误差小;理论模拟比实验所得的旋转角小,这是由于(5)式与(6)式的误差所至,修正(5)式中的 $f$ 可减小误差。另外,固定柱面镜1,而旋转柱面镜2,“smile”矫正效果较差,大焦距透镜不利于矫正“smile”。

表 1 不同焦距柱面镜 1 对 808A 和 808B“smile”矫正前后的实验测量值与模拟值

Table 1 Measured and simulated value of 808A and 808B before and after correction, when using different lens1

LDB	808A		808B	
Cylindrical focal length /mm	20	40	20	40
Bar curvature image before corrected /mm	1.7	2.0	1.5	1.8
Initial curvature of bar / $\mu\text{m}$	7.7	7.6	5.1	5.0
Simulated rotation angle $\alpha_1 /(^{\circ})$	3(4)	7(8)	9	21
Simulated curvature image when rotated $\alpha_2 / \text{mm}$	1.4	1.7	0.1	0.1
Experimentally measured rotate angle $\alpha_3 /(^{\circ})$	3	7	8	19
Measured curvature image when rotated $\alpha_4 / \text{mm}$	1.3	1.7	0.1	0.2
Maximal correction value /mm	0.4	0.3	1.4	1.6
Relative correction value /%	24	15	93	89

## 4 结 论

通过几何光学方法对平凸柱面镜矫正半导体激光阵列的“smile”进行理论分析,利用 ORIGIN 软件对“smile”的矫正进行数值模拟,并与实验结果进行对比分析。结果表明,选择合适的小焦距平凸柱面镜对“smile”,特别是抛物线状的“smile”矫正明显且模拟误差小。“smile”矫正后对外腔半导体激光阵列光谱窄化有改善,这方面的实验将在以后的文章中报道。

## 参 考 文 献

- 1 A. R. Holdsworth, H. J. Baker. Assessment of micro-lenses for diode bar collimation [C]. *SPIE*, 1997, **3000**:209~214
- 2 J. F. Monjardin, K. M. Nowak, H. J. Baker *et al.*. Correction of beam errors in high power laser diode bars and stacks [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18):8178~8183
- 3 Ma Hua, Zeng Xiaodong, An Yuying. Double half-cylindrical lens collimate the beam of laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):937~940  
马 华,曾晓东,安毓英. 双半圆柱透镜准直半导体激光光束 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):937~940
- 4 Chen Jiuying, Liu Jianguo, Zhang Yujun *et al.*. Autobalanced detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):350~353  
陈玖英,刘建国,张玉钧 等. 调谐半导体激光吸收光谱自平衡检测方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):350~353

- 5 Fang Gaozhan, Ma Xiaoyu, Wang Gaohong *et al.*. Quasi-CW 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs stack laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):649~653  
方高瞻,马晓宇,王国宏 等. 准连续 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs 叠层激光二极管阵列[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):649~653
- 6 Tang Chun, Wu Deyong, Gao Songxin *et al.*. Package technique for CW 40 W 808 nm quantum-well linear array diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):513~516  
唐 淳,武德勇,高松信 等. 连续 40 W 808 nm 量子阱线阵二极管激光封装技术[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):513~516
- 7 N. U. Wetter. Three-fold effective brightness increase of laser diode bar emission by assessment and correction of diode array curvature [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(3):181~187
- 8 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Linewidth-narrowed, tunable laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):751~754  
苏宙平,楼祺洪,董景星 等. 激光二极管阵列的窄线宽、可调谐输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):751~754
- 9 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Beam quality improvement of laser diode array by using off-axis external cavity [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(19):11776~11780
- 10 C. L. Talbot, M. E. J. Friese, D. Wang *et al.*. Linewidth reduction in a large-smile laser diode array [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29):6264~6268
- 11 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. *Geometry Optics • Aberration • Optical Design* [M]. 1st ed.. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003. 22~48  
李晓彤,岑兆丰. *几何光学 • 像差 • 光学设计*[M]. 第 1 版. 杭州:浙江大学出版社, 2003. 22~48