

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0009-04

# LD 列阵的光束参数测试和光束质量的研究

高春清, 高明伟, 王青, 何晓燕, 魏光辉

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

**摘要** 讨论了 LD 列阵的光束参数特性, 采用面阵 CCD 探测器测量了半导体激光器线阵的光场分布、远场发散角、光束参数积和  $M^2$  因子等, 分析了半导体激光器线阵的光束参数与激光器结构形式的关系, 讨论了改善激光器光束特性的方法。

**关键词** 激光技术; 半导体激光器阵列; 光束参数; 光束质量

中图分类号 TN247

文献标识码 A

## Study on the Beam Parameters of Laser Diode Array and its Beam Quality

GAO Chun-qing, GAO Ming-wei, WANG Qing, HE Xiao-yan, WEI Guang-hui

(Department of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** This paper discussed beam parameters of the laser diode array and its beam quality. By using a high resolution CCD array the intensity profiles of the laser diode array were measured and the beam width, far field divergence, beam parameter product and  $M^2$ -factor were obtained. By calculating the intensity moments the relation between beam parameters of the laser diode linear array and its structure was found, and the method for improving beam properties of laser diode arrays was discussed.

**Key words** laser technique; laser diode array; beam parameters; beam quality

### 1 引言

半导体激光器阵列在体积、重量、效率等方面具有其他类型激光器无法比拟的优越性, 在通讯、医疗、工业加工、国防和科学研究中具有巨大的应用前景。但在使用中人们发现半导体激光器阵列的空间光束特性很差, 既存在严重的不对称性, 又有严重的像散。它们在平行和垂直于  $p-n$  结( $x$  和  $y$ ) 的两个方向上具有不同的光束宽度、不同的远场发散角和不同的束腰位置, 在  $y$  轴方向(快轴方向)光束发散半角达  $40^\circ$ , 在  $x$  轴方向(慢轴方向)光束参数积(BPP)和  $M^2$  因子很大。半导体激光器阵列的这种空间光场特性在许多应用场合很不利, 因此在大多数情况下需首先对半导体激光器阵列的光束进行准直和变换, 有时还需进行光纤耦合。在进行以上工作之前, 人们需确定半导体激光器阵列的光束参数及其光束质量。本文主要讨论了半导体激光器列

阵的光束参数特性及其测量, 以及改善光束特性的方法。

### 2 光束参数测试

主要讨论输出功率为瓦级的半导体激光器阵列和输出功率为几十瓦的半导体激光器线阵(Laser diode bar)的光束特性参数及其光束质量。

#### 2.1 光束参数的定义

采用 ISO 推荐的光强二阶矩的方法来定义激光器的光束参数。根据这种方法, 激光器的光束宽度的定义为<sup>[1,2]</sup>

$$d_x(z) = 4\sqrt{\sigma_x^2(z)} = 4\sqrt{\frac{1}{P_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 I(x, y, z) dx dy} \quad (1)$$

其中  $d_x(z)$  是光束在  $x$  方向上的光束宽度,  $\sigma_x^2(z)$  是光束在  $x$  方向上的光强二阶矩,  $I(x, y, z)$  为光强的空间分布,  $P_0$  为测量截面处包含的总光强。  $d_y(z)$  可参照

基金项目: 高功率半导体激光国防重点实验室基金和教育部优秀青年教师基金资助课题。

作者简介: 高春清(1967-), 博士, 教授, 主要研究方向为激光束特性评价与测试、半导体激光抽运固体激光器等。

E-mail: gao@bit.edu.cn

$d_x(z)$ 定义。激光束的BPP和  $M^2$  因子的定义为

$$BPP=d_0 \cdot \theta, \quad M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} d_0 \cdot \theta \quad (2)$$

### 2.2 LD 线阵的光束参数

对于数十个发光面组成的半导体激光器线阵,其输出激光是由许多个发光面非相干叠加而成的,其光束质量与只有一个发光区的LD不同。下面对此作一简单分析<sup>[6]</sup>。

$$\langle x_a^2 \rangle = \left[ \int x^2 I_n(x-nd) dx + \dots + \int x^2 I_0(x) dx + \dots + \int x^2 I_n(x+nd) dx \right] / [(2n+1)P_n] \quad (3)$$

其中  $I_n(x)$ 表示第  $n$  个发光面的光强分布,

$$P_n = \int I_n(x) dx.$$

经过简单计算可以得到

$$\langle x_a^2 \rangle = \langle x_0^2 \rangle + [(N^2-1)d^2/12] \quad (4)$$

其中

$$\langle x_0^2 \rangle = \int x^2 I_0(x) dx / P_0$$

表示单个发光面的二阶矩。 $N=2n+1$ ,是总的发光面个数。根据光束二阶矩半径的定义,半导体激光器线阵的光束半径可写为

$$w_m = 2\sqrt{\langle x_a^2 \rangle} = w_{x0} \sqrt{1 + \frac{N^2-1}{3} \left( \frac{d}{w_{x0}} \right)^2} \quad (5)$$

$w_{x0}$ 表示单个发光面的光束半径。根据光束参数积和  $M^2$  因子的定义,半导体激光线阵和单个发光面沿  $x$  方向的  $M^2$  因子为

$$M_{mz}^2 = \frac{\pi}{\lambda} w_m \theta_m \quad M_{x0}^2 = \frac{\pi}{\lambda} w_{x0} \theta_{x0} \quad (6)$$

其中  $\theta_m$  和  $\theta_{x0}$  分别表示线阵和单个发光面的光束发散角,如果没有慢轴准直,这两个发散角是相等的,故有

$$M_{mz}^2 = M_{x0}^2 \sqrt{1 + \frac{N^2-1}{3} \left( \frac{d}{w_{x0}} \right)^2} \quad (7)$$

从(7)式可以看出半导体激光器线阵的  $M^2$  因子正比于单个发光面的  $M^2$  因子。通过缩小相邻两发光面的间距,可以提高半导体激光器线阵的光束质量。

### 2.3 光束参数测试系统

采用的测量半导体激光器列阵光束参数的系统是由光束变换系统、光强衰减器、面阵 CCD 探测器、图像采集与处理系统等构成,如图 2 所示,其中 CCD 探测器采用的是 Spectra Source Instrument 公司的 16 位数字面阵 CCD,其像元大小为  $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 。

测量了沿光束传播方向上不同位置的光斑图像,按照光强二阶矩的定义计算每个位置上的光斑宽度,

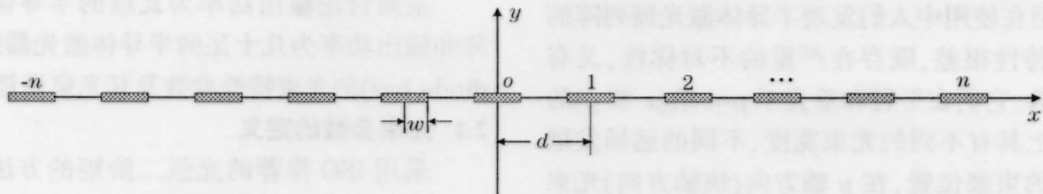


图 1 具有  $2n+1$  个发光面的半导体激光器线阵的示意图

Fig. 1 Simplified scheme of a linear laser array with  $2n+1$  emitters

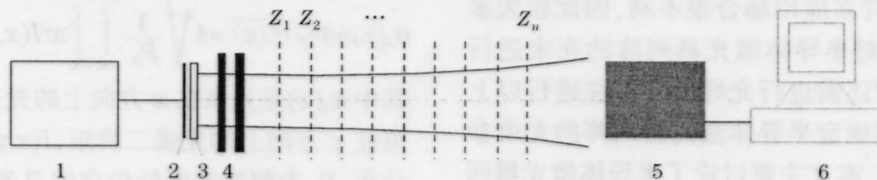


图 2 半导体激光器光束质量测试系统实验装置图。1:电源和控制系统;2:激光二极管线阵;3:微型圆柱透镜;4:中性玻璃;5:16位 CCD 相机;6:图像处理系统

Fig.2 Experimental setup for measuring the beam quality of the laser diode bar. 1: power supplier and cooling system; 2: laser diode bar; 3: micro-cylindrical lens; 4: neutral glasses; 5: 16-bit CCD camera; 6: image processing system

并根据(8)式进行双曲线拟合<sup>[8]</sup>,可得到被测激光束的束腰宽度  $d_0$ ,束腰位置  $z_0$ ,瑞利长度  $z_R$ 和  $M^2$  因子

$$d = d_0 \sqrt{1 + (z - z_0)^2 / z_R^2}, \quad (8)$$

## 2.4 测试结果

测量了输出功率为 1 W 的半导体激光器阵列和输出功率 20 W 的半导体激光器线阵的光束参数。图 3 是半导体激光器线阵的二阶矩半径传输曲线,经过二次曲线拟合,得到半导体激光器线阵沿  $x$  轴方向的束腰半径和瑞利长度分别为 5.45 mm 和 124.5 mm。 $x$  方向上的束腰位置位于坐标平面后 24.55 mm 处。通过公式  $M^2 = \pi w_0^2 / z_R \lambda$  可以计算出  $M^2$  因子为 937。

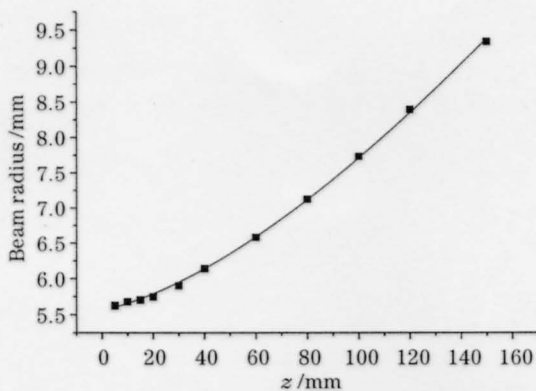


图 3 半导体激光器线阵的二阶矩半径传输曲线

Fig.3 Propagation of the second order moment radii of the laser diode bar

## 3 改善光束特性的讨论

### 3.1 激光束准直

LD 及其列阵在垂直于结平面方向上(快轴)的发光面宽度约为  $1 \mu\text{m}$ ,快轴方向的发散半角约为  $40^\circ$ ,瑞利长度仅为微米量级,光束发散很快,不利于实际应用,因此在许多应用中都需先进行快轴准直。可以采用微柱面镜或光纤透镜进行快轴准直。根据光束参数测试的结果,用不同芯径的光纤微透镜进行快轴准直。对应芯径为  $200 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  的光纤微透镜,在快轴准直后光束的发散角分别被压缩到  $0.413^\circ$ 和  $0.488^\circ$ 。

对于 LD 线阵,除了进行快轴准直外,慢轴准直在很多情况下也是必须的。由于 LD 线阵在慢轴方向有若干个发光区,因此慢轴准直一般由微透镜阵列完成。如图 4 所示,慢轴准直可减小 LD 列阵光束在慢轴方向的光束参数积,改善其光束质量。激光光束参数的测试是设计准直透镜的基础。

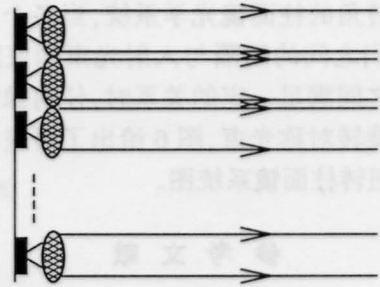


图 4 LD 列阵慢轴准直示意图

Fig.4 Scheme of collimation of LD bar's slow axis

### 3.2 光束对称化

由于 LD 列阵输出的光束具有严重的不对称性和像散特性,因此在许多实际应用中需对其进行对称化变换。目前进行此类变换的方法主要有两种,一种是通过采用反射镜或棱镜的方法,将 LD 线阵平行于结平面方向上的光束(10 mm 方向)分解为若干子光束,这些子光束在经过反射镜或棱镜后在垂直于结平面方向重新排列,通过选择合适的尺寸可使输出光束成为方形对称。此类变换中比较成功的方法是平行平面镜法和阶梯反射镜法<sup>[4,5]</sup>。图 5 给出了阶梯反射镜的基本工作原理。第二种光束对称化的方法是采用一组对称轴方向与入射光光轴方

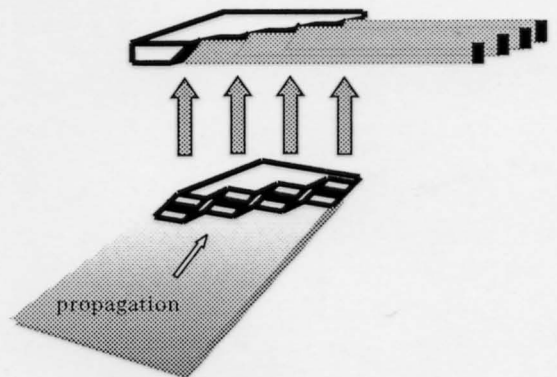


图 5 阶梯反射镜示意图

Fig.5 Scheme of step mirror used for symmetrization

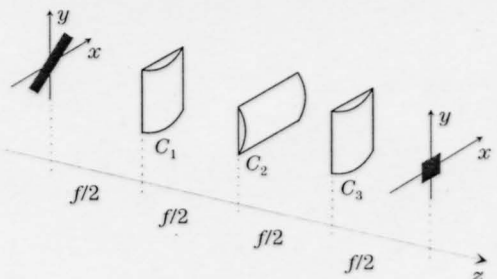


图 6 扭转柱面镜系统图

Fig.6 Scheme of a rotated three cylindrical lens system used for symmetrization

向成一定转角的柱面镜光学系统,当各个柱面镜的焦距和它们之间的间隔与入射光束的束腰位置和瑞利长度之间满足一定的关系时,任何像散光束可被变换为旋转对称光束,图6给出了可进行此类变换的一个扭转柱面镜系统图。

参 考 文 献

1 A. E. Siegman. New developments in laser resonators[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1224**: 2-4

2 Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor 1999 [S]. ISO 11146  
 3 C. Gao, G. Wei. Beam quality of uncoupled laser diode array[J]. *Chinese J. Lasers (B)*, 2001, **10**(4): 241-245  
 4 W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Two-mirror beam-shaping technique for high-power diode bars[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**: 375  
 5 B. Ehlers, K. Du, M. Baumann *et al.*. Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3097**: 639-644

... 柱面镜... 光束... 束腰... 瑞利长度... 旋转对称光束... 扭转柱面镜系统图... 图6

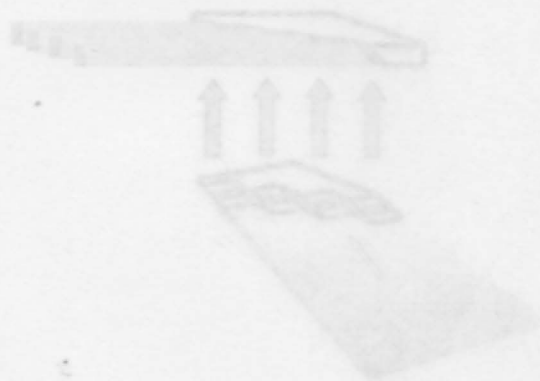


图6 扭转柱面镜系统图



图7 光束传播示意图

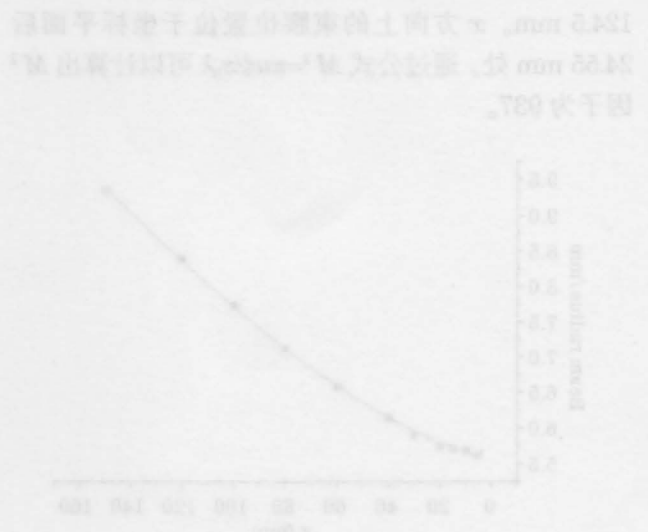


图8 二阶矩传播示意图

3 改善光束特性的讨论

直光束... 柱面镜... 光束... 束腰... 瑞利长度... 旋转对称光束... 扭转柱面镜系统图... 图6