

衍射光学半导体激光器线阵消像散准直器系统误差分析

周崇喜

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室 成都 610209)

提要 分析了衍射光学半导体激光器线阵消像散准直器误差的来源, 推导了相应的计算公式, 并对设计制作的准直器进行了误差计算与分析, 指出减小误差的措施。

关键词 衍射光学, 消像散, 半导体激光器, 准直器, 误差

1 半导体激光器线阵消像散准直器设计制作

衍射光学元件的性能参数主要包括衍射级方向和衍射效率。衍射光学半导体激光器线阵消像散准直器的主要性能参数为准直度和衍射效率。我们所用的半导体激光器为线阵型, 单元数为 5, 每一单元的尺寸为 $25.4 \mu\text{m} \times 625 \mu\text{m}$, 间距为 $101.6 \mu\text{m}$, 子午和弧矢方向的发散角分别为 52° 和 18° , 即存在着像散, 其发光面如图 1 所示^[1]。

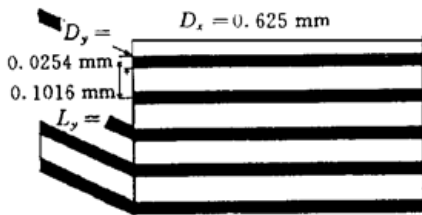


图 1 半导体激光器线阵发光面示意图

Fig. 1 Diagram of the emitting light cross surface of the linear laser diode

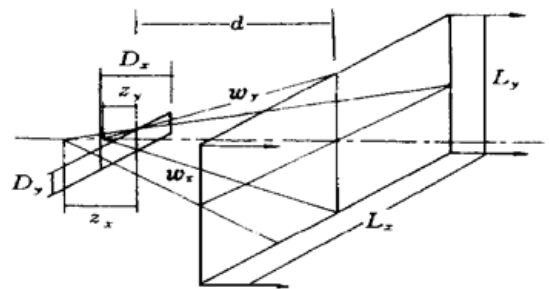


图 2 半导体激光器发光模型

Fig. 2 Light emitting model of laser diode

如采用传统的透镜准直, 必须制作两个相互垂直放置的不同焦距的柱面透镜。这样, 一方面这么小的光学透镜线阵是非常难以加工的, 另一方面两个柱面透镜线阵也是很难对准的。为此, 我们采用衍射微透镜列阵来进行光束准直。如图 2 所示, 设半导体激光器出射光斑尺寸为 $D_x \times D_y$, 远场发散角为 $2w_x \times 2w_y$, 扩束面积为 $L_x \times L_y$, 则应满足以下方程

$$\frac{L_x/2}{d + z_x} = \frac{D_x/2}{z_x} = \tan w_x \quad \frac{L_y/2}{d + z_y} = \frac{D_y/2}{z_y} = \tan w_y \quad (1)$$

解得 $z_x = D_x/2 \tan w_x$ $z_y = D_y/2 \tan w_y$ (2)

由(3)式可求出子午和弧矢方向的焦距 f_x 和 f_y ,

$$\begin{cases} f_x = z_x + d \\ f_y = z_y + d \end{cases} \quad (3)$$

这里 L_y 为相邻两发光面中心线间距。根据(1)式即可求得 d (d 为发光面到准直输出面之间的距离)。进而由(3)式得到子午和弧矢方向的焦距 f_x 和 f_y ,那么总的透镜的复振幅透过率函数为

$$t(x, y) = t(x) \cdot t(y) = \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2}{2f_x} + \frac{y^2}{2f_y} \right)\right] \quad (4)$$

$$\text{合成相位函数为 } \Phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2}{2f_x} + \frac{y^2}{2f_y} \right) \quad (5)$$

从(5)式可以看出,等相位面为一系列椭圆。由于该准直器的数值孔径较大,因而使得边缘线宽较小,故我们采用线宽匹配的方法,在不同区域采用不同的量化台阶数来制作。图3(a)为采用激光直写第一次曝光、显影后的微透镜单元部分区域放大图,(b)为反应离子刻蚀后通过Alpha-500台阶仪得到的表面浮雕轮廓图。从图中可以看出,曝光、显影、刻蚀过程中各个环节控制得相当好。图4(a)为采用激光直写第二次曝光、显影后的微透镜部分区域放大图,(b)为反应离子刻蚀后通过Alpha-500台阶仪得到的表面浮雕轮廓图。

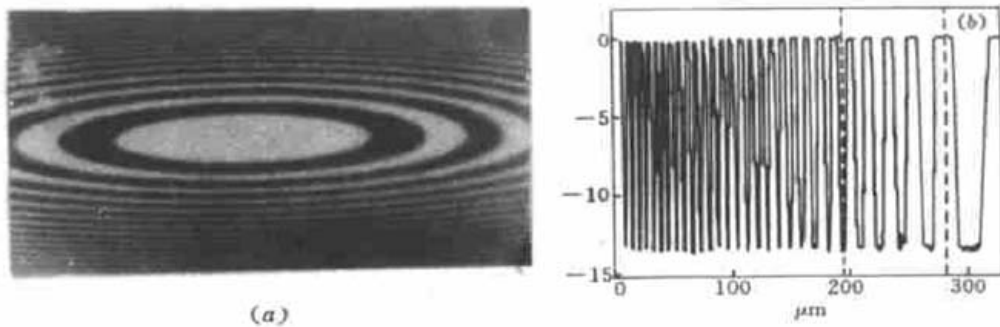


图3 第一次显影、刻蚀后的俯视图(a)及浮雕轮廓图(b)

Fig. 3 Enlarged plane-view image of the collimator (a) and cameo profile (b) after developed and etched for the first time

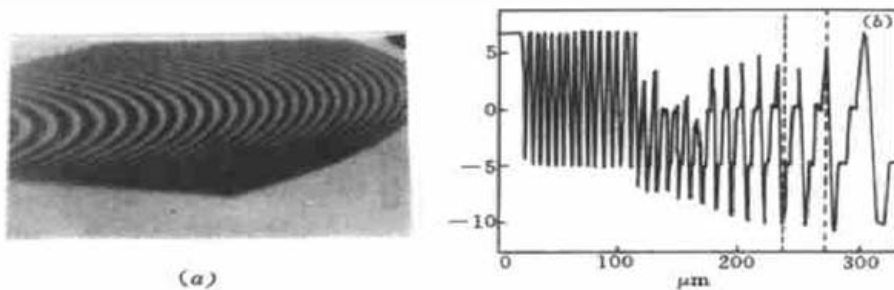


图4 第二次显影、刻蚀后的俯视图(a)及浮雕轮廓图(b)

Fig. 4 Enlarged plane-view image of the collimator (a) and cameo profile (b) after developed and etched for the second time

2 消像散准直器参数误差的分析计算

衍射光学半导体激光器线阵消像散准直器的主要性能参数为准直度和衍射效率。准直度

决定出射光束的平行程度,而衍射效率是决定有多少入射光能量能沿光轴方向出射。相应这两个参数就有准直误差和衍射效率误差。

2.1 准直误差

准直度是决定半导体激光器列阵消像散准直器的最主要参数,故准直误差是非常重要的。通常用绝对误差来衡量。准直误差分为纵向误差和横向误差。纵向误差指因离焦而引起的误差因此也称为离焦误差。横向误差指在焦平面内微透镜中心偏离光轴的距离,即离轴误差。

2.1.1 离焦误差

如图 5(a) 所示,设焦距为 f ,无离焦时其波面应满足以下方程

$$(z - f)^2 + x^2 + y^2 = f^2 \quad (6)$$

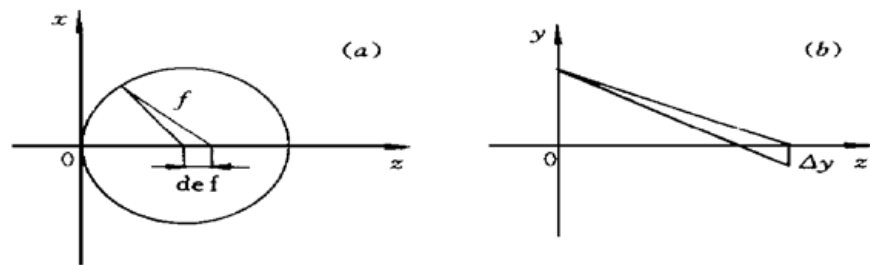


图 5 离焦波差(a)和横向波差(b)示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the wavefront errors
(a) afocus wavefront error; (b) lateral wavefront error

由此得到

$$z(x) = (x^2 + y^2)/2f \quad (7)$$

其中假定 $z^2 \ll x^2 + y^2$ 。若离焦量为 def ,那么由此产生的波面方程应写为

$$z(x, def) = (x^2 + y^2)/2(f + def) \quad (8)$$

经过 Taylor 级数展开,由离焦 def 引起的波像差函数为

$$w(x, y, def) = -\frac{2\pi def}{\lambda} \left[\frac{x^2 + y^2}{f^2} \right] \quad (9)$$

其中 λ 为发射激光的中心波长。

2.1.2 离轴误差

如图 5(b) 所示,由于装调不准或激光器各个发光单元本身不均匀使得准直器的中心偏离半导体激光光束的中心。设子午面内偏离量为 Δy ,那么横向波差为

$$w_v(y) = \left| \sqrt{(y - \Delta y)^2 + f_y^2} - f_y \right| - \left| \sqrt{y^2 + f_y^2} - f_y \right| \quad (10)$$

$$\text{因为 } (\Delta y)^2 \ll f_y, \text{ 所以 } w_v(y) = \sqrt{y^2 + f_y^2} \left[\sqrt{1 - \frac{2y\Delta y}{f_y^2 + f_y^2}} - 1 \right] \quad (11)$$

2.1.3 实验结果

采用计算频谱面的光强分布,确定准直误差。频谱面的光强分布可表示为^[2]

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} w_H(x, y, def) \right] \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (12)$$

其中, $u = x'/f\lambda, v = y'/f\lambda, x', y'$ 分别为频谱面空间函数的坐标, f 为傅里叶变换透镜的焦距。从频谱的分布即可确定准直角及准直误差。图 6(a) 为准直角随离焦量的变化曲线, (b) 为准直角随离轴量 Δy 的变化曲线。从图中可以看出,若要求准直精度控制在 3 mrad 以内,那么

离焦量应控制在 $\pm 10.0 \mu\text{m}$, 垂直方向的离轴量应控制在 $\pm 5.0 \mu\text{m}$ 。对于单衍射透镜而言, 垂直误差可以大一些, 而对于阵列型器件, 垂直误差必须严格控制。

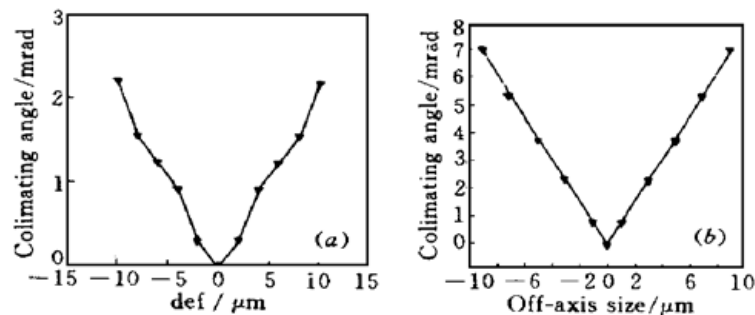


图 6 激光束的准直度与装配误差的关系

Fig. 6 Collimating angle vs equipment errors

(a) collimating angle vs defocus; (b) collimating angle vs the off-axis distance

2.2 衍射效率的计算及误差分析

图 3, 图 4 中的准直器的理论衍射效率为

$$\eta = [\eta \cdot \pi ab + \eta \cdot (L \times W - \pi ab)] / (L \times W) \quad (13)$$

$\eta = 81\%$, $\eta = 40.5\%$, a, b 分别为第二次刻蚀部分面积最大椭圆的长、短半轴。在图 4 中, $a = r_{x25} = \sqrt{2\mathcal{N}_x} \cdot \sqrt{25}$, $b = r_{y3} = \sqrt{2\mathcal{N}_y} \cdot \sqrt{3}$, 代入公式(13) 得 $\eta \approx 55\%$ 。

影响衍射效率下降的主要误差有对准误差和深度误差^[3]。对准误差是由于在前后两次套刻过程中对不准而引起的。而纵向误差是由于刻蚀深度不够或过深而引起的。这两种误差的大小主要由线宽决定, 一般来说, 线宽越宽, 误差越小。由于采用激光直写系统中的对准装置, 直接在基片上曝光, 因此, 主要误差为深度误差。这是由于特征尺寸太小, 使得第二次刻蚀时把第一次刻蚀以后该保留部分也刻蚀掉了, 四台阶部分变成了三台阶。

参 考 文 献

- 1 Sharp Laser Diode, Laser Diode User's Manual. Japan: SHARP Corporation, 1992. 10
- 2 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. USA: McGraw-Hill Co., 1966. 83
- 3 Xu Ping, Zhang Xiaochun, Guo Lurong *et al.*. Fabrication errors analysis and simulation of binary optical element. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, 16(6): 833~ 838 (in Chinese)

Error Analysis to Linear Laser Diode Astigmatism-free Collimator of Diffractive Optical Elements

Zhou Chongxi

(State Key Lab of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics & Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

Abstract Errors of the diffractive linear laser diode astigmatism-free collimator are analyzed in the paper. The errors of the home made collimator are calculated. The ways for reducing the errors are proposed.

Key words diffractive optics, astigmatism-free, laser diode, collimator, errors analysis