

半导体激光束整形器的设计与分析

余大英 胡玉禧 张 亮

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系 合肥 230026)

摘 要

随着加工技术的不断发展,特殊曲面的光学加工已成为可能,它可以采用由特殊曲面构成的光束整形器来实现任意波面的变换。本文根据能量平衡和光程相等的原理,导出一组非平行入射光束的整形器面形设计公式。根据这组公式,设计了用于准直与均匀半导体激光束的整形器。通过计算机模拟,给出了光束整形结果,并具体分析了整形器厚度和折射率对整形光束性能的影响。

关键词 半导体激光器, 高斯光束, 准直化, 均匀化, 光束整形器

1 引 言

激光光束在其横截面内光场强度的非单值性大大影响了它的使用,故长期以来许多科研人员致力于光束均匀化方法的研究。他们采用非球面透镜法^[1],计算全息法^[2,3],以及现在正兴起的二元光学法^[4~6]等。早在 80 年代初由 Shealy 等提出的非球面透镜法,它具有能量转换率高、可实现任意波前变换及同轴等优点。但当时的技术条件难以实现复杂面形的加工,故基本上只适用于旋转对称的面形。近来随着数控加工技术的发展,由计算机精密控制机床,可以加工多坐标自由形体,结合光学塑料注模工艺的日趋成熟,将改变传统透镜单一形状的限制,能够按照我们的要求设计出任意面形的透镜。

本文基于文献[1]的非球面透镜法,用一块透镜整形器前后两个不同的表面形状取代两块非球面透镜。根据入瞳与出瞳之间能量平衡、光线光路追迹及等光程原理,推导出一组非准直入射光的面形设计公式,给出用于准直与均匀化半导体激光束的整形器设计结果,并分析了整形器的性能。

2 设计原理

建立笛卡尔坐标系,原点设在光源处。入射光束投射到整形器的第一面(记为面 1)上,然后发生折射,通过控制整形器表面形状,使得传播到整形器第二面(记为面 2)上的能量均匀分布,

收稿日期: 1996-12-02

修改日期: 1997-01-03

经过面 2 将发散光束变成平行光输出。所要解决的问题是, 求出整形器两个表面的面形表达式 $z = f(x, y)$ 和 $Z = F(X, Y)$ 。但是求分析解非常困难。本文采用数值分析方法。

如图 1 所示, 轴上 O 点为光源所在点。光源发出的一条入射光线 A 在面 1 上的投影点坐标为 (x, y, z) , 折射光线 B 在面 2 上的投影点坐标为 (X, Y, Z) 。入射光截面的单位面积能量为 $\sigma(x, y)$, 出射光截面的单位面积能量为 $\Sigma(X, Y) = \text{常数}$ 。入瞳 ($z = z_0$ 的平面) 与出瞳 ($z = Z_0$ 的平面) 之间能量平衡, 即

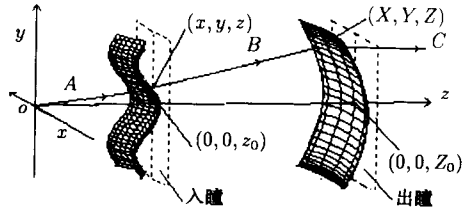


图 1 整形器光束变换示意图

$$\int_0^{x_{\max}} \int_0^{y_{\max}} \sigma(x, y) dx dy = \int_0^{X_{\max}} \int_0^{Y_{\max}} \Sigma(X, Y) dX dY = X_{\max} \cdot Y_{\max} \Sigma \quad (1)$$

其中 $x_{\max}, y_{\max}$ 是面 1 上入射光斑的大小; $X_{\max}, Y_{\max}$ 是面 2 出射光斑的大小。当这四个值已知, 则 Σ 由方程 (1) 可求

$$\Sigma = \frac{\int_0^{x_{\max}} \int_0^{y_{\max}} \sigma(x, y) dx dy}{X_{\max} \cdot Y_{\max}} \quad (2)$$

设入瞳上高度为 y , 宽度为 $x_{\max}$ 的光斑与出瞳上高度为 Y , 宽度为 $X_{\max}$ 的光斑能量相等, 则

$$Y = \frac{\int_0^{x_{\max}} \int_0^y \sigma(x, y) dx dy}{\Sigma \cdot X_{\max}} \quad (3)$$

同样入瞳上高度为 y , 宽度为 x 的光斑与出瞳上高度为 Y , 宽度为 X 的光斑能量相等, 则

$$X = \frac{\int_0^x \int_0^y \sigma(x, y) dx dy}{\Sigma \cdot Y} \quad (4)$$

由等光程原理, 从发光点到出瞳每条光线必经过相等的光程 (OPL), 即

$$\text{OPL} = nz_0 + n'(Z_0 - z_0)$$

$$\text{OPL} = n(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + Z_0 - Z) + n'\sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2}$$

其中 n 为入射介质折射率, n' 为折射介质折射率, 以上两式的右边相等。令

$$nz_0 + n'(Z_0 - z_0) - n(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + Z_0) \equiv K$$

$$\text{则有 } K = n'\sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} - nZ,$$

解此一元二次方程得

$$Z = \frac{(n'^2 z - nK) \pm \sqrt{(nK - zn'^2)^2 - (n^2 - n'^2)\{K - n'^2[(X - x)^2 + (Y - y)^2 + z^2]\}}}{n^2 - n'^2} \quad (5)$$

Z 取两根中较大值。由方程 (1)~(5), 任意入射点 (x, y, z) 可以唯一确定出射点 (X, Y, Z) 。设 $A = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $B = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2}$ 。则入射光线单位矢量 $\vec{a} = \left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}, \frac{z}{A}\right)$,

折射光线单位矢量 $\tilde{b} = \left(\frac{X-x}{B}, \frac{Y-y}{B}, \frac{Z-z}{B} \right)$, 曲面在入射点的切平面的法线方向矢量为 $\tilde{r} = (m, l, -1)$ 。由折射定律

$$nQ \times N = n'Q' \times N \quad (6)$$

其中 N 为法线单位矢量; Q 为入射光线单位矢量; Q' 为折射光线单位矢量。将代入方程 (6), 得

$$m = \frac{n'A(X-x) - nBx}{nBz - n'A(Z-z)}, \quad l = \frac{n'A(Y-y) - nBy}{nBz - n'A(Z-z)}, \quad (7)$$

由空间解析几何^[7]可知, 对形如 $z = f(x, y)$ 的曲面方程, 在任意点 (x_0, y_0, z_0) 的切面方程为

$$z - z_0 = f_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f_y(x_0, y_0)(y - y_0)$$

$$\text{法线方程为 } \frac{x - x_0}{f_x(x_0, y_0)} = \frac{y - y_0}{f_y(x_0, y_0)} = \frac{z - z_0}{-1}$$

法线方向矢量为 $(f_x, f_y, -1)$, 所以 z 在 (x_0, y_0, z_0) 处的偏导数

$$\frac{\partial z}{\partial x} = f_x(x_0, y_0) = m, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = f_y(x_0, y_0) = l \quad (8)$$

采用迭代算法, 选定步长 h , 初始迭代条件为 $x = 0, y = 0$ 时, $z = z_0, Z = Z_0$ 。将入瞳上入射点坐标 (x, y, z) 代入方程 (1)~(5) 求得出瞳上的出射点坐标 (Z, Y, Z) , 再代入方程 (7)、(8) 求得面形梯度, 即可由当前点得知邻近点的函数值。

由上述一系列的方程可以确定入射面上任一点 (x, y) 对应面 1 的函数值 z 及 z 的偏导数, 同时可得面 2 的函数值 Z , 而 Z 在某点的偏导数可用相同的方法求出。只是入射光线是 B , 折射光线是 C , 单位矢量 $\tilde{c} = (0, 0, 1)$ 。

3 设计结果

我们运用上述公式完成了半导体激光束整形器的设计。通常光束半径定义为强度下降到中央强度 e^{-2} 处的半径。由于半导体激光束是发散的椭圆高斯光束^[8], 在 XOZ, YOZ 两个主截面上半径不相等, 且传播距离越远, 光束半径越大。在距离发光点 z 处的半导体激光束横截面的单位面积能量为

$$\sigma(x, y) = \exp\left(\frac{-x^2}{2\alpha_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\alpha_y^2}\right)$$

其中 α_x, α_y 分别为 XOZ 和 YOZ 主截面上的高斯常数。高斯常数等于光束半径的二分之一^[1]。设 $\sigma_x = \exp\left(\frac{-x^2}{2\alpha_x^2}\right), \sigma_y = \exp\left(\frac{-y^2}{2\alpha_y^2}\right)$, 则

$$X = \frac{X_{\text{MAX}} \int_0^x \sigma_x dx}{\int_0^{x_{\text{max}}} \sigma_x dx}, \quad Y = \frac{Y_{\text{MAX}} \int_0^y \sigma_y dy}{\int_0^{y_{\text{max}}} \sigma_y dy}$$

选取东芝 TOLD9200 半导体激光器为设计对象。该激光器垂直发散角 34° , 水平发散角 7° , 选取 $z_0 = 20, z_0 = 40, x_{\text{max}} = 6, y_{\text{max}} = 8, X_{\text{MAX}} = 10, Y_{\text{MAX}} = 20, n = 1, n' = 1.55$; 可知 $\alpha_x = 0.6, \alpha_y = 3$ 。整形器面 1 形状如图 2 所示。整形器面 2 形状如图 3 所示。从图 4 可见整形器总体结构。

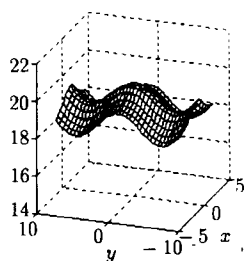


图2 整形器面1

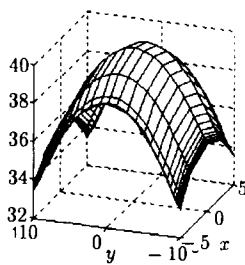


图3 整形器面2

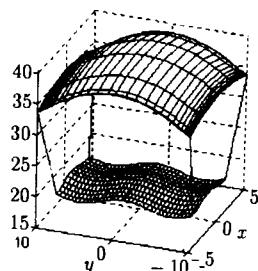


图4 整形器总体结构

中心厚度 d 取 15、20、25 时, 分别计算了整形器的面形。图 5 为整形器面形相对于中心厚度 d 的变化情况。曲线 (1) 表示面 1 的最大面形变化量, 即 z 的最大值与最小值之差随 d 的变化; 曲线 (2) 表示面 2 的最大面形变化量随 d 的变化。显而易见, 中心厚度越小, 面形起伏越大。需要指出的是, 由于在设计中, 我们近似地将入瞳上的能量分布当成面 1 的能量分布, 当面形起伏过大时, 这种近似会带来较大面形误差, 影响整形效果。中心厚度加大, 面形起伏变小, 但会使整形器体积重量增加, 同时可能导致衍射效应明显, 使理想的平顶能量曲线上出现细小的毛刺, 影响均匀程度。因此必须全面考虑来选取合适的中心厚度。如果只整形不扩束, 面形起伏会减小, 则可适当减小中心厚度, 优化均匀效果。

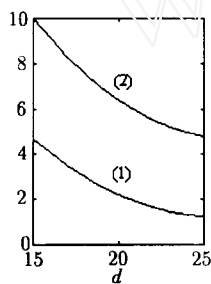
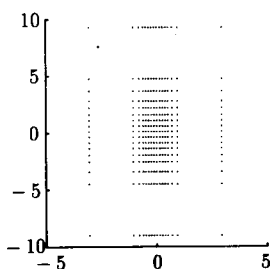
图5 面形随 d 的变化

图6 入瞳面点列图

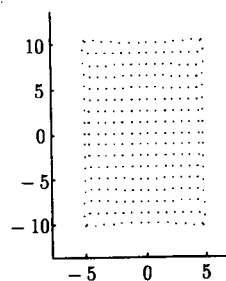


图7 出瞳面点列图

4 性能分析

采用迭代算法得到的是整形器面形的离散值, 如果步长选的足够小, 或采用插值算法便可以计算得到非常逼近的真实面形。为便于处理, 我们对面形沿 x, y 方向分别采用多项式 $f(x), g(y)$ 近似拟合, 面形方程可表示为 $z = f(x) + g(y) - z_0$ 。利用计算机可以模拟整形器的光束变换情况(忽略衍射效应)。

在入瞳上等能量划分矩形区域, 选取区域中心一条光线进行光路追迹, 这样每条光线携带相等的能量。该光线在入瞳上的投射点位置在图中用一点表示, 得到一幅点列图。点列图直观地反映了光能分布情况。图 6 为入瞳面点列图; 图 7 为出瞳面点列图; 图 8 所示为整形前后沿 y 轴方向的相对能量分布曲线; 图 9 所示为整形前后沿 x 轴方向的相对能量分布曲线。从曲线可

见, 经过整形后的光束实现了均匀化。计算还表明, 光束经过整形器后在 $34^\circ \times 7^\circ$ 光束范围内发散角小于 $5'$ 。

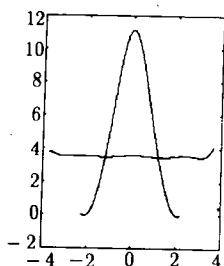


图 8 X 方向能量分布曲线

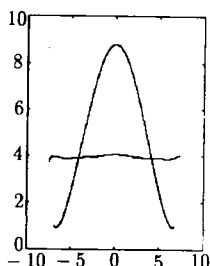
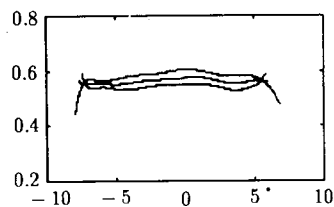


图 9 Y 方向能量分布曲线

图 10 不同折射率 Y 方向
能量分布曲线

对于图 4 所示的整形器, 折射率换为 1.5 和 1.6 时, 整形光束在 Y 方向的能量分布如图 10 所示, 中间一条曲线为设计值, 最上面及最下面一条曲线分别为 $n' = 1.5$ 和 $n' = 1.6$ 时的能量分布曲线。当折射率在 1.5~1.6 范围内时, 能量分布的均匀程度基本保持不变。通过实际计算还表明, 整形厚度改变 ± 2 mm 时对光束变换的影响也甚微。因此这种半导体激光束整形器对材料和厚度的公差要求都是不高的。

参 考 文 献

- 1 Patrick W.Rhodes, David L.Shealy. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation:their design and analysis. *Appl.Opt.*,1980,19(20):3545
- 2 Michael T.Eismann, Tai A M, Cederquist J N. Iterative design of a holographic beamformer. *Appl.Opt.*,1989,28(13):2641
- 3 Han Changyuan,Yukihiro Ishii, Kazumi Murata. Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profile.*Appl.Opt.*, 1983,22(22):3644
- 4 杨国桢, 顾本源, 董碧珍. 衍射光学元件的设计方法. *光子学报*, 1994, 23(Z2):7
- 5 许超, 张静娟, 陈俊本. 用于圆对称光束波前变换的位相型光学系统. *物理学报*, 1993,42(8):1245
- 6 包红春, 邹敏贤等. 二元光学波面变形器件的研究. *光学学报*, 1994,14(9):987
- 7 方德植. 解析几何. 北京: 高等教育出版社, 1986,127~140
- 8 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992,116~120

Design and Analysis of Semiconductor Laser Beam Shaper

Yu Daying Hu Yuxi Zhang Liang

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China Hefei 230026)

Abstract

This article refers to the design of beam shaper that converts an incident divergent light beam with arbitrary energy profile into collimated radiation with uniform energy distribution. Based on the principle of energy balance and equivalent optical length, a series of formulas have been derived. As an example, the design of shaper for laser diode of TOLD9200 is given in this paper. The computer simulating shows the shaping result. The effects of thickness and refractive index of a shaper on the profile of output beam are also analyzed.

Key words: semiconductor laser, Gaussian beam, collimating, uniform energy, beam shaper

余大英 女, 1970 年 12 月生。1992 年毕业于电子科技大学电子机械系。1994 年考入中国科学技术大学精密机械与精密仪器系机械电子工程专业攻读硕士学位至今。