

校正半导体激光束像散的波像差方法*

郭福源

(福建师范大学激光研究所, 福州, 350007)

摘要: 利用波像差方法研究半导体激光束的传输变换特性, 推导出用于校正半导体激光束像散的柱面透镜的正确设计公式。

关键词: 半导体激光束 校正像散 波像差 光程差

The method of wave-front aberration for correcting astigmatism in semiconductor laser beams

Guo Fuyuan

(Institute of Laser, Fujian Normal University, Fuzhou, 350007)

Abstract: In this paper, the method of wave-front aberration is employed to study the transformation properties of semiconductor laser beams. Using the optical system composed of a cylinder lens and a collimation lens is a useful method to correct the astigmatism of the semiconductor laser beam. This paper presents the exact design formulas of cylinder lens, which respectively correspond to two arrangements of the cylinder lens placed in front of or behind the object lens. And this paper points out if the waist position of semiconductor laser beam meets the condition of $x_w^2 > -fif'_L$, the cylinder lens should be placed in front of the object lens, reversely the cylinder lens should be placed behind the object lens and simultaneously the position of the cylinder lens should meet the condition of $x'_C < -fif'_L$. Finally, the optimum position of the cylinder lens in the correction astigmatism system for the semiconductor laser beam is derived.

Key words: semiconductor laser beam correcting astigmatism wave-front aberration optical path difference

引 言

半导体激光器因具有众多优点, 已逐步取代 He-Ne 激光器而获得广泛应用, 但是, 由于半导体激光束为像散椭圆高斯光束, 在半导体激光器输出端面的夫琅和费衍射区中, 光束等相面为椭球面, 子午和弧矢光束等相面之间存在波像差, 因此, 半导体激光束必须经过校正像散变换之后方可应用。实质上, 校正半导体激光束的像散就是校正波像差, 经过校正像散变换之后的光束等相面为球面或平面, 子午和弧矢光束等相面之间的波像差为零, 光束的性质为共腰椭圆高斯光束, 或称无像散高斯光束, 其中, 光束等相面为球面的聚焦共腰椭圆高斯光束在光纤通信、材料加工、激光打印、条码扫描、光存储及激光束扫描显微成像等领域中有实际应用意义; 光束等相面为平面或近似平面的准直共腰椭圆高斯光束在激光束准直测量、测绘及科学研究等领域中有实际应用意义。校正半导体激光束像散的光学系统可以由单个柱面透镜实现, 但是, 由于半导体激光束的远场半发散角 θ_0 为 $0.1\mu\text{m}$ 数量级, 实用的校正半导体激光束像散

* 福建省自然科学基金资助。

的光学系统均由柱面透镜和物镜组合而成,分别为柱面透镜位于物镜之前和之后两种结构形式。校正半导体激光束像散的方法可以采用校正波像差方法,即根据半导体激光束的波像差由子午、弧矢光束在柱面透镜中的光程差校正这一概念可以推导用于校正半导体激光束像散的柱面透镜参数^[1~3]。作者分别推导出柱面透镜位于物镜之前和之后两种结构形式的柱面透镜参数的正确设计公式,修正和扩展了文献[1~3]中相应的表达式,同时,详细分析柱面透镜位于物镜之前和之后两种光学结构的适用条件,给出半导体激光束准直系统中实现校正半导体激光束像散的最佳光学结构形式。

一、半导体激光束的波像差

半导体激光束为像散椭圆高斯光束,它的描述可以分别正交于子午、弧矢平面内,子午、弧矢平面内的光束参数分别以下标 t, s 标注,如图 1 和图 2 所示,弧矢平面内的曲线已被旋转 90° 之后绘制于子午平面内,由于子午或弧矢平面内的光束形状均关于束轴 z 轴对称,本文中仅绘出束轴 z 轴上方的一支曲线,其中,图 1 为校正半导体激光束像散的光束变换示意图,图 2 为其相应的波像差分析示意图,图中,柱面透镜 C 的母线均与弧矢平面重合,仅用于变换子午平面内的光束参数。

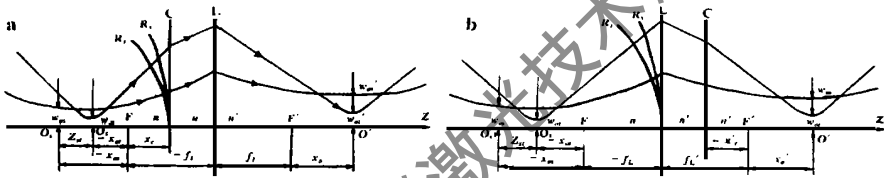


Fig. 1 The sketch diagram a and b show the Gaussian beam transformation procedure for correcting astigmatism of semiconductor laser beams
a—the cylinder lens is in front of the collimating lens b—the cylinder lens is behind the collimating lens

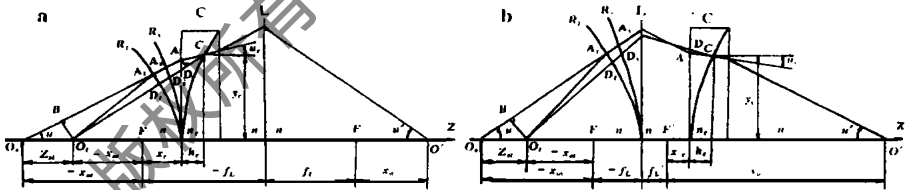


Fig. 2 The sketch diagram a and b show the wave-front aberration analysis for correcting astigmatism in semiconductor laser beams
a—the cylinder lens is in front of the collimating lens b—the cylinder lens is behind the collimating lens

作者以弧矢光束束腰 O_s 为原点,将弧矢、子午光束束腰分离量 $O_s O_t$ 定义为像散量,以 Z_{st} 表示,则在物镜 L 的物方空间中任一参考平面位置,以束腰为原点的子午、弧矢传播距离 Z_t, Z_s 的关系为:

$$Z_s - Z_t = Z_{st} \tag{1}$$

根据高斯光束基本性质,以曲率中心为原点的高斯光束等相面曲率半径 R 的表达式为:

$$R = Z + Z_R^2 / Z \tag{2}$$

式中, $Z_R = \pi w_0^2 / \lambda$ 为高斯光束瑞利长度, w_0 为光束束腰半径, λ 为光束波长。

由于半导体激光束的子午、弧矢瑞利长度 Z_{Rt}, Z_{Rs} 和像散量 Z_{st} 均为 μm 数量级,除了临近半导体激光器输出端面外,其它位置均为端面的夫琅和费衍射区,则当 $Z \gg Z_R$ 时,由(2)式知,

$R \cdot Z$, 由(1)式知, 子午、弧矢光束的等相面曲率半径 R_t, R_s 的关系为: $R_s - R_t = Z_{st}$ (3)

在图2中, 对于某一半孔径角为 u 的半线 OA , 弧矢与子午光束等相面之间的光程差被定义为波像差, 以 ΔW_{st} 表示, 即
$$\Delta W_{st} = n(A_s A_t) \quad (4)$$

式中, n 为光束所在空间的介质折射率, $(A_s A_t)$ 为有向线段 $A_s A_t$ 的数值, 令 $O_t B \perp O_s A$, 有

$$(A_s A_t) = - [(O_s A_s) - (O_s B) - (B A_t)] \quad (5)$$

从图2知, $(O_s A_s) = R_s, (O_s B) = (O_s O_t) \cos u = Z_{st} \cos u, (B A_t) = (O_t A_t) = R_t$, 则(4)式化成:

$$\Delta W_{st} = - n Z_{st} (1 - \cos u) \quad (6)$$

由于等相面曲率半径 R_s, R_t 均为近轴区光束参数, (6)式仅在近轴区中有实际意义, 在近轴区中, 由于 $1 - \cos u \approx u^2/2$, 则(6)式化成:
$$\Delta W_{st} = - n Z_{st} u^2/2 \quad (7)$$

由(7)式知, 波像差 ΔW_{st} 与半孔径角 u 的平方成正比, 则经过物镜 L 边缘的光线的波像差 ΔW_{st} 为最大值:
$$(\Delta W_{st})_{\max} = - Z_{st} (\text{NA})^2 / (2n) \quad (8)$$

式中, $\text{NA} = n \sin u$ 为物镜 L 的数值孔径。

二、校正半导体激光束像散的光程差

当半导体激光束经过由物镜 L 和柱面透镜 C 组成的光学系统变换之后, 如图2所示, 弧矢与子午光束的波像差 $\Delta W'_{st}$ 为:
$$\Delta W'_{st} = \Delta W_{st} + \Delta L_{st} + \Delta C_{st} \quad (9)$$

式中, $\Delta L_{st}, \Delta C_{st}$ 分别为半导体激光束在物镜 L, 柱面透镜 C 中的光程差。

由于物镜 L 为旋转对称结构, $\Delta L_{st} = 0$, 则当柱面透镜 C 实现校正半导体激光束像散时, $\Delta W'_{st} = 0$, (9)式化成:
$$\Delta W_{st} + \Delta C_{st} = 0 \quad (10)$$

由(10)式知, 在校正半导体激光束像散的光学系统中, 半导体激光束在柱面透镜 C 中的光程差 ΔC_{st} 与半导体激光束固有的波像差 ΔW_{st} 互为相反数。

在实际应用的光学系统中, 为了便于加工, 柱面透镜被设计成平凸或平凹结构, 如图2所示, 柱面透镜 C 与子午、弧矢平面的相关线分别为扇形 PNQ 、矩形 $PMNQ$, A 为弧矢光线 $O_s A$ 与平面界面 PM 的交点, C 为子午光线 $O_t C$ 与曲面界面 PN 的交点, 由于 $A_t D_t \perp O_t C$, 令 $AD \perp O_t C$, 则线段 $(A_t A) = (D_t D)$, 据此导出半导体激光束在柱面透镜 C 中的光程差 ΔC_{st} 为:

$$\Delta C_{st} = n_c(AC) - n(DC) \quad (11)$$

式中, n_c 为柱面透镜 C 的介质折射率, 线段 $(AC) = h_c \sec u_c, (DC) = (AC) \cos(u - u_c), u_c$ 为柱面透镜 C 中的折射光线 AC 与束轴 z 轴的夹角。根据折射定律: $n_c \sin u_c = n \sin u$ (12)

$$(11) \text{ 式化成: } \Delta C_{st} = (n_c \cos u_c - n \cos u) h_c \quad (13)$$

$$\text{在近轴区中, 由于 } \cos u \approx 1, \cos u_c \approx 1, (13) \text{ 式化成: } \Delta C_{st} = (n_c - n) h_c \quad (14)$$

由(12), (13)式知, 当 $u = 0$ 时, (14)式为精确计算公式。由(12)~(14)式知, 当 $u \neq 0$ 时, 光程差 ΔC_{st} 由于近轴近似引起的相对误差:
$$\delta = (\Delta C_{st}' - \Delta C_{st}) / \Delta C_{st} = (n/2n_c) u^2 \quad (15)$$

由(15)式知, 光程差 ΔC_{st} 由于近轴近似引起的相对误差 δ 与半孔径角 u 的平方成正比。

三、柱面透镜参数的设计公式

1. 柱面透镜位于物镜之前

如图2a所示, 当柱面透镜 C 对半孔径角为 u 的光线 OA 校正波像差 ΔW_{st} 时, 由(6), (10), (14)式知, 描述柱面透镜形状的坐标参数 y_c, h_c 分别为:
$$y_c = (x_c - x_{os}) \tan u \quad (16)$$

$$h_c = nZ_{st}(1 - \cos u)/(n_c - n) \quad (17)$$

式中, x_c, x_{os} 分别为以物镜 L 物方焦点 F 为原点的柱面透镜 C 的物方主面位置、半导体激光束的弧矢束腰位置。

由于柱面透镜 C 的柱面曲率半径 $R_c = y_c^2/(2h_c)$, 则由(17)式知, 柱面曲率半径 R_c 的表达式为:

$$R_c = (n_c - n)y_c^2/[2nZ_{st}(1 - \cos u)] \quad (18)$$

在近轴区中, 由于 $\text{tg } u \cdot u$, 由(7), (10), (14), (16)式知, (18)式化成:

$$R_c = (n_c - n)(x_c - x_{os})^2/(nZ_{st}) \quad (19)$$

由于柱面透镜 C 的焦距 $f'_c = nR_c/(n_c - n)$, 由(19)式知, 柱面透镜焦距 f'_c 的表达式为:

$$f'_c = (x_c - x_{os})^2/Z_{st} \quad (20)$$

(18)~(20)式修正和扩展了文献[1]中柱面透镜的柱面曲率半径 R 的表达式, 即文献[3]中(5)式。

2. 柱面透镜位于物镜之后

如图 2b 所示, 由(14), (15)式知, 在近轴区中, 半导体激光束在柱面透镜 C 中的光程差 ΔC_{st} 和光程差 ΔC_{st} 由于近轴近似引起的相对误差 δ 分别为:

$$\Delta C_{st} = (n_c - n')h_c \quad (21)$$

$$\delta = [n'/(2n_c)]u'^2 \quad (22)$$

式中, n', u' 分别为物镜 L 像方空间的介质折射率、光线 AO' 的半孔径角, 有:

$$u' = (n/n')(-x_{os}/f_L)u = (x_{os}/f'_L)u \quad (23)$$

式中, f_L, f'_L 分别为以主面为原点的物镜 L 的物、像双方焦点。

由(23)式知, (22)式化成: $\delta = [-x_{os}^2/(f_L f'_L)] [n/(2n_c)] u^2$ (24)

当柱面透镜 C 对像方半孔径角为 u' 的光线 AO' 校正波像差 ΔW_{st} 时, 由(6), (10), (21), (23)式知, 描述柱面透镜形状的坐标参数 y_c, h_c 分别为:

$$y_c = -(f_L - x_{os}x'_c/f'_L)\text{tg } u \quad (25)$$

$$h_c = nZ_{st}(1 - \cos u)/(n_c - n') \quad (26)$$

式中, x'_c 为以物镜 L 像方焦点 F' 为原点的柱面透镜 C 的物方主面位置。

在近轴区中, 由于 $\text{tg } u \cdot u$, 由(25), (26)式知, 柱面透镜 C 的参数 y_c, h_c, R_c, f'_c 分别为:

$$y_c = -(f_L - x_{os}x'_c/f'_L)u \quad (27)$$

$$h_c = nZ_{st}u^2/[2(n_c - n')] \quad (28)$$

$$R_c = (n_c - n')(f_L - x_{os}x'_c/f'_L)^2/(nZ_{st}) \quad (29)$$

$$f'_c = (-f_L f'_L/Z_{st})(1 - x_{os}x'_c/f_L f'_L)^2 \quad (30)$$

当 $x_{os} = 0$ 或 $x'_c = 0$ 时, (30)式化成: $f'_c = -f_L f'_L/Z_{st}$ (31)

(26), (28)式修正和扩展了文献[2]中(5~37)式; (30), (31)式修正和扩展了文献[1]中柱面透镜焦距 F_{cLy} 的表达式, 即文献[3]中(6)式。

四、误差分析

1. 光程差 ΔC_{st} 因近轴近似引起的误差

对于柱面透镜 C 位于物镜 L 之前和之后的校正半导体激光束像散的光学系统, 如图 2a 和 2b 所示, 半导体激光束在柱面透镜 C 中的光程差 ΔC_{st} 由于近轴近似引起的相对误差 δ 分别

以下标 a, b 标注, 由(15), (24)式知: $\delta_b = (-x_{os}^2/f_L f'_L) \delta_a$ (32)

由(32)式知:当 $x_{os}^2 > -f_l f'_L$ 时, $\delta_b > \delta_a$, 柱面透镜位于物镜之前时光程差 ΔC_{st} 因近轴近似引起的误差较小; 当 $x_{os}^2 < -f_l f'_L$ 时, $\delta_b < \delta_a$, 柱面透镜位于物镜之后时光程差 ΔC_{st} 因近轴近似引起的误差较小; 当 $x_{os} = 0$ 时, $\delta_b = 0$, (21) 式为精确计算公式。

2. 位置调校误差

由(20), (30)式知, 实现校正半导体激光束像散的柱面透镜焦距 f'_c 均与位置因子 M 的平方成正比, 即

$$f'_c = M^2 / Z_{st} \quad (33)$$

对于柱面透镜 C 位于物镜 L 之前和之后的位置因子 M , 文中以下标 a, b 标注, 有:

$$M_a = x_c - x_{os} \quad (34)$$

$$M_b = \sqrt{-f_l f'_L} - x_{os} x'_c / \sqrt{-f_l f'_L} \quad (35)$$

若对(33)式求偏导数, 有: $\partial f'_c / \partial x = (\partial M / Z_{st}) (\partial M / \partial x)$ (36)

由(36)式知, $\partial M / \partial x$ 为光学系统的位置调校误差, 其中, $\partial M / \partial x_{os}$ 为半导体激光束束腰位置的调校误差; $\partial M / \partial x_c, \partial M / \partial x'_c$ 为柱面透镜物方主面位置的调校误差。分别对(34), (35)求偏导数, 有:

$$\partial M_a / \partial x_c = 1 \quad (37)$$

$$\partial M_b / \partial x'_c = -x_{os} / \sqrt{-f_l f'_L} \quad (38)$$

$$\partial M_a / \partial x_{os} = -1 \quad (39)$$

$$\partial M_b / \partial x_{os} = -x'_c / \sqrt{-f_l f'_L} \quad (40)$$

由(37), (38)式知, 当 $x_{os}^2 > -f_l f'_L$ 时, $(\partial M_b / \partial x'_c)^2 > (\partial M_a / \partial x_c)^2$, 柱面透镜位于物镜之前时, 柱面透镜位置调校误差较小; 当 $x_{os}^2 < -f_l f'_L$ 时, $(\partial M_b / \partial x'_c)^2 < (\partial M_a / \partial x_c)^2$, 柱面透镜位于物镜之后时, 柱面透镜位置调校误差较小; 当 $x_{os} = 0$ 时, $\partial M_b / \partial x'_c = 0$, 柱面透镜位于物镜之后时柱面透镜位置调校误差为零。

由(39), (40)式知, 当 $x'^2_c > -f_l f'_L$ 时, $(\partial M_b / \partial x_{os})^2 > (\partial M_a / \partial x_{os})^2$, 柱面透镜位于物镜之前时半导体激光束束腰位置调校误差较小; 当 $x'^2_c < -f_l f'_L$ 时, $(\partial M_b / \partial x_{os})^2 < (\partial M_a / \partial x_{os})^2$, 柱面透镜位于物镜之后时半导体激光束束腰位置调校误差较小; 当 $x'_c = 0$ 时, $\partial M_b / \partial x_{os} = 0$, 柱面透镜位于物镜之后时半导体激光束束腰位置调校误差为零。

五、结 论

当半导体激光束束腰位置 $x_{os}^2 > -f_l f'_L$ 时, 校正半导体激光束像散的柱面透镜 C 应位于物镜 L 之前; 当 $x_{os}^2 < -f_l f'_L$ 时, 校正半导体激光束像散的柱面透镜 C 应位于物镜 L 之后, 且柱面透镜 C 的位置应满足 $x'^2_c < -f_l f'_L$; 对于半导体激光束准直系统, $x_{os} = 0$, 校正半导体激光束像散的柱面透镜 C 应位于物镜 L 之后, 其中, 柱面透镜 C 的最佳位置为 $x'_c = 0$ 。

参 考 文 献

- 1 Lang M. Lasers & Optronics, 1989, 8(9): 51~ 55
- 2 王 本, 沈树群. 激光扫描和光盘技术. 北京: 北京邮电学院出版社, 1990: 322~ 325
- 3 韩劲松, 赵 洋, 李达成 *et al.* 中国激光, 1995; A22(6): 471~ 474

作者简介: 郭福源, 男, 1965 年出生。讲师, 硕士。从事激光光学理论研究和光电子仪器研制工作。