

文章编号: 0258-7025(2007)12-1607-05

大功率半导体激光束非球面准直系统的优化设计

杨华军, 胡 渝, 谢 康

(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要 为实现空间激光束的远距离传输, 利用矢量折射定理研究了大功率半导体激光器发散光束经非球面、非轴对称准直系统的光传输特性。对空间光线传输得出了矩阵传递公式, 并针对大功率线源半导体激光器的发散光束进行了高精度的准直优化设计。为实现对激光束的进一步准直, 利用光学设计软件 CODE-V 设计了卡塞格伦光学天线。利用两点法对发散角进行了实验测试, 结果表明优化设计的准直系统发散角为 1.924 mrad, 经光学天线进一步准直后的发散角为 96.2 μ rad。本空间光线追迹方法对复杂光学系统的精确计算具有一定参考意义, 所设计的大功率线源激光束准直系统能广泛应用于远距离激光通信系统中。

关键词 激光器; 准直系统; 光学天线; 大功率半导体激光器; 高精度; 优化设计

中图分类号 TN 012; O 435 **文献标识码** A

Optimization Design for Aspheric Collimation System of High-Power Semiconductor Laser Beam

YANG Hua-jun, HU Yu, XIE Kang

(College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Based on the law of refraction in vector form, the laser beam propagation in an aspheric and asymmetrical laser beam collimation system from high-power semiconductor laser has been researched for spatial laser beam long-distance propagation. The matrixes transfer formulas for spatial rays have been obtained. For the high-power semiconductor laser with line emitting source, the divergent angle of the converted laser beam has been diminished by the optimization design of high precision collimation system. Cassegrain optical antenna has been designed by optical design software CODE-V to collimate the laser beam further. Based on the two-point algorithm, the divergent angle for the collimation system has been measured. The measured results indicate that the divergent angle of the optimization collimation system is less than 1.924 mrad, and the divergent angle collimated by the optical antenna is less than 96.2 μ rad. The spatial rays method possesses reference meaning for accurate counting of complex optical systems. The collimation system designed for high-power semiconductor laser with line emitting source can be widely used in long-distance spatial laser communication.

Key words lasers; collimation system; optical antenna; high-power semiconductor laser; high precision; optimization design

1 引 言

由于半导体激光器具有体积小、重量轻等特点, 因此在光通信技术领域有着广泛的应用前景。半导体激光器采用非对称激活通道, 由端面发射的激光束具有较大的发散角, 在子午面及弧矢面内的发散

角差别较大, 为了适用于远距离空间激光通信, 必须对半导体激光器的发散光束进行准直^[1~4]。特别是对于大功率半导体激光器, 其纵横方向的激光束非对称输出特性极为明显^[5]。本文针对中心波长为 $\lambda = 778$ nm (带宽为 2 nm), 功率为 1.5 W 的半导体激光器的激光发散特性进行准直优化设计。该激光器

收稿日期: 2007-05-15; 收到修改稿日期: 2007-06-26

基金项目: 国家杰出青年基金(60588502)资助项目。

作者简介: 杨华军(1966—), 男, 四川人, 教授, 主要从事光通信技术、计算机光学、信息存储方面的研究。

E-mail: yanghj@uestc.edu.cn

具有线源 $1\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$ 发光特性, 子午面内发散角范围为 $\alpha_1 = 0^\circ \sim 28^\circ$, 弧矢面内发散角范围为 $\alpha_2 = 0^\circ \sim 15^\circ$ 。

2 理论分析

为了实现高精度准直的要求, 首先需要对准直系统进行优化设计, 然后需要设计卡塞格伦光学天线以实现激光束进一步准直(压缩)。如图 1 所示, 非球面、非轴对称的准直系统由柱透镜组所构成, 其中第一平凸型柱透镜实现对子午面即 xoz 平面(也称为快轴方向)准直, 第二平凸型柱透镜实现对弧矢面即 $yozy$ 平面(也称慢轴方向)的准直。

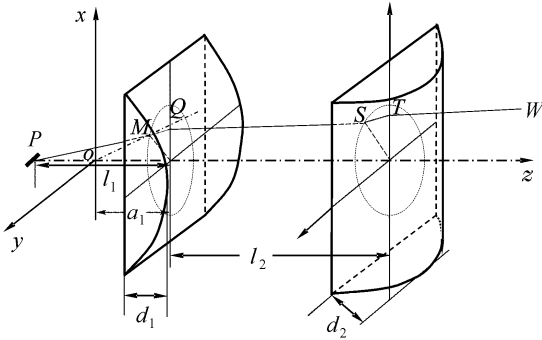


图 1 激光束非球面准直系统结构示意图

Fig. 1 Structure of aspheric collimation system for laser beam

下面分别就柱透镜组的横截面为椭圆面(特殊情形为圆面)、双曲面、抛物面(部分)情形进行讨论, 并给出一般性设计理论。

2.1 矢量形式折射定理推导

设某一入射光线的单位矢量为

$$\mathbf{A}^0 = \cos\alpha \mathbf{i} + \cos\beta \mathbf{j} + \cos\gamma \mathbf{k}. \quad (1)$$

折射面的法线单位矢量为

$$\mathbf{N}^0 = \cos\alpha_N \mathbf{i} + \cos\beta_N \mathbf{j} + \cos\gamma_N \mathbf{k}. \quad (2)$$

若折射光线的单位矢量为 $\mathbf{A}^{0'}$, 利用折射定理 ($n \sin I = n' \sin I'$) 和矢量叉乘定义, 可得

$$n(\mathbf{A}^0 \times \mathbf{N}^0) = n'(\mathbf{A}^{0'} \times \mathbf{N}^0), \quad (3)$$

折射定理中 n, I 为入射空间介质折射率、入射角; n', I' 为折射空间介质折射率、折射角。由(3)式得

$$(n'\mathbf{A}^{0'} - n\mathbf{A}^0) \times \mathbf{N}^0 = 0, \quad (4)$$

(4)式说明矢量 $(n'\mathbf{A}^{0'} - n\mathbf{A}^0)$ 与 \mathbf{N}^0 方向一致, 故可写为

$$(n'\mathbf{A}^{0'} - n\mathbf{A}^0) = \Gamma \mathbf{N}^0, \quad (5)$$

即

$$n'\mathbf{A}^{0'} = n\mathbf{A}^0 + \Gamma \mathbf{N}^0, \quad (6)$$

(6)式中的 Γ 称为偏向常数。由(6)式可得

$$\Gamma = n' \cos I' - n \cos I, \quad (7)$$

讨论: 对于折射情形, 利用折射定理由(7)式可得

$$\Gamma = \sqrt{n'^2 - n^2 + (n \cos I)^2} - n \cos I, \quad (8)$$

其中入射角 I 由 $\cos I = \mathbf{A}^0 \cdot \mathbf{N}^0$ 给出。

对于反射情形, 根据(7)式, 取值 $n' = -n, I' = -I$ 即可。

2.2 准直系统的折射光线空间追迹

由光源位置 $P(x_0, y_0, z_0)$ 、入射光线 PM 方向余弦和第一折射面方程可确定在第一面上的折射点 M , 及折射光线 MQ 方向余弦。

注意: 由图 1 易见, 对于子午面内发光源位于点 $(0, 0, -l_1 + a_1 - d_1)$, 而对于弧矢面内的线源长度为 $0.120\ \text{mm}$, 故发光源取 $(0, -0.06, -l_1 + a_1 - d_1)$ 至 $(0, 0.06, -l_1 + a_1 - d_1)$ 线源之间的点进行仿真设计。

设入射光线 PM 方程为

$$\begin{cases} x = x_0 + t \cos\alpha_0 \\ y = y_0 + t \cos\beta_0 \\ z = z_0 + t \cos\gamma_0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ 分别表示光线 PM 与 x, y, z 轴正方向的夹角, 即该光线的方位角。

设折射面方程为 $F(x, y, z) = 0$, 则由折射面方程和入射光线方程即可确定出参数 t , 从而能确定出第一折射面上的折射点位置 $M(x_1, y_1, z_1)$ 。再根据空间解析几何与矢量理论, 可得该折射点法线方向余弦为

$$\begin{cases} \cos\alpha_{N_1} = \pm F'_x / \sqrt{F'^2_x + F'^2_y + F'^2_z} \\ \cos\beta_{N_1} = \pm F'_y / \sqrt{F'^2_x + F'^2_y + F'^2_z} \\ \cos\gamma_{N_1} = \pm F'_z / \sqrt{F'^2_x + F'^2_y + F'^2_z} \end{cases}, \quad (10)$$

其根式前的符号, 可根据常规光线追迹中对折射角的正、负规定, 来进行计算机自动计算(仿真)。 F'_x, F'_y, F'_z 是指对折射点 $M(x_1, y_1, z_1)$ 的偏导数。

由公式(8)得到第一折射面的偏向常数为

$$\Gamma_1 = \sqrt{n_1^2 - n_0^2 + (n_0 \cos I_0)^2} - n_0 \cos I_0, \quad (11)$$

由公式(6), 即可得出经第一折射面的折射光线方向余弦。

类似地, 第二折射面上的折射点可以作为新的“源”进行光线追迹。根据准直系统共有四个面, 即得到矩阵传递公式

$$n_4 \begin{pmatrix} \cos\alpha_4 \\ \cos\beta_4 \\ \cos\gamma_4 \end{pmatrix} = n_0 \begin{pmatrix} \cos\alpha_0 \\ \cos\beta_0 \\ \cos\gamma_0 \end{pmatrix} + \sum_{k=1}^4 \Gamma_k \begin{pmatrix} \cos\alpha_{N_k} \\ \cos\beta_{N_k} \\ \cos\gamma_{N_k} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

其中 $(\alpha_4, \beta_4, \gamma_4)$ 代表最后折射光线方位角。显然折射光线发散角由折射光线与光轴夹角 γ_4 来进行表征。

2.3 多元函数的最优化理论分析

考虑到准直系统小型化的要求,需对柱透镜的筒长(包括厚度、间距)、直径等作适当限制。因此构成有约束条件(subject to 简化为 s. t.)下的最优化问题^[6]

$$\begin{cases} \min_x f(x) \\ \text{s. t. } g_i(x) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k) \end{cases} \quad (13)$$

设计中优化变量 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 为准直系统结构参数,如激光源与准直系统距离,准直系统结构参数(折射率、厚度、柱透镜结构)等,优化目标 $f(x)$ 为经准直系统后的发散角(即光线与光轴夹角 γ)。为实现远距离传输,则要求发散角愈小愈好。

根据准直系统要求,给出约束条件^[6]: $g_i(x) \leq 0$ 的具体表达式(单位 mm)

$$x_1 \leq 10; x_2 + x_3 + x_4 \leq 25; x_5 \leq 8; x_6 \leq 18, \quad (14)$$

其中 $x_1 = l_1, x_2 = d_1, x_3 = d_2, x_4 = l_2, x_5 = \phi_1, x_6 = \phi_2$ 。而 ϕ_1, ϕ_2 分别代表第一、二柱透镜的通光孔径。其通光孔径必须保证所有激光束全部通过。为使整个准直系统小型化,因此通光孔径为保证激光束全部通过条件下的最优通光孔径。根据装配经验,需保证柱透镜边缘厚度 ≥ 1 mm。

编程中利用 MATLAB 最优化工具箱提供的优化函数,实现约束条件的多元函数最优化问题求解。

上述方法也可讨论更一般的三次、高次非球面准直系统的准直特性。

3 计算机仿真

3.1 多种二次曲面准直效果比较

分别就柱透镜组横截面为圆面、椭圆面、双曲面、抛物面(部分)情形,利用约束条件最优化求解方法,对空间光线进行仿真,优化结果表明椭圆准直效果最好。其中子午面的仿真结果如图 2 所示。

3.2 椭圆准直系统结构仿真

柱透镜横截面为椭圆的准直效果优于其他情形,因此主要基于椭圆情形进行优化仿真。由图 3 易见,其柱透镜横截面椭圆的短、长轴之比为 $e = a/b = 0.65$ 时准直效果最佳。设计中取 $a_1 = 5$ mm, $b_1 = 7.69$ mm, $a_2 = 9$ mm, $b_2 = 13.85$ mm, $d_1 = 3$ mm, $d_2 = 3$ mm, $l_1 = 7.5$ mm, $l_2 = 10$ mm。前、

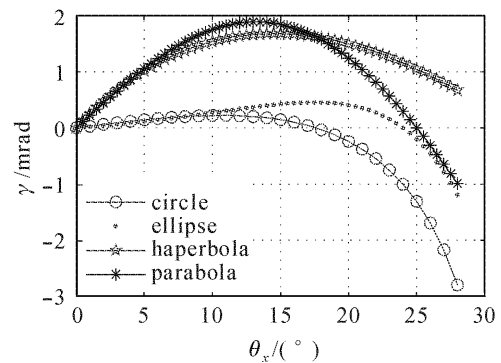


图 2 子午平面内光束发散角随入射角的变化曲线
Fig. 2 Divergent angle versus incident angle in meridional plane

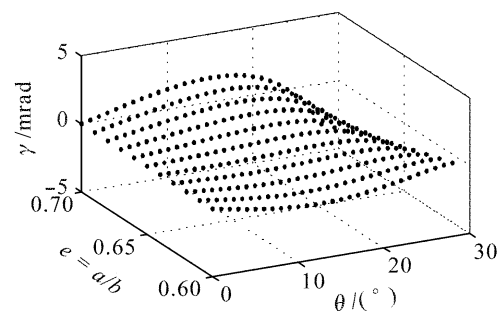


图 3 发散角随椭圆结构与入射角的变化曲线
Fig. 3 Divergent angle versus ellipse structure and incident angle

后柱透镜均采用 K9 玻璃材料, $n = 1.51$ 。

3.3 三维空间任意光线发散角仿真

根据空间光线追迹的矩阵公式(12),对经过准直系统的发散角 γ 随横截面坐标变化进行了优化仿真,得发散角随横截面坐标的变化曲线如图 4 所示。仿真结果表明所设计的大功率线源半导体激光器所发出的空间光束经准直系统后的所有发散角(在出射面处)均 ≤ 1.5 mrad,且愈靠近光轴其发散角愈小。

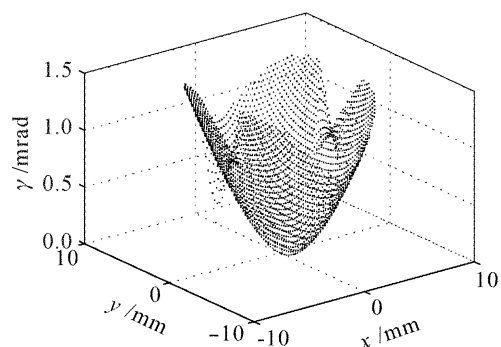


图 4 准直激光束发散角随横截面坐标变化曲线
Fig. 4 Divergent angle of spatial laser beam after collimation versus cross-section coordinates

3.4 准直系统与光学天线结构

利用光学设计软件 CODE-V 对大功率激光器的光束准直系统和卡塞格伦天线进行了光束传输仿真,如图 5 所示。卡塞格伦天线用于实现对经过准直系统后的光束进行进一步的准直,即实现对发散角进一步压缩。

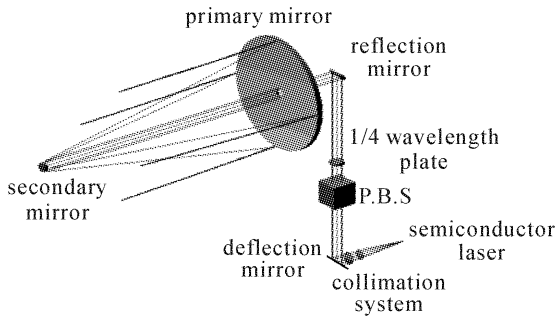


图 5 准直系统和光学天线结构
Fig. 5 Structure of collimation system and optical antenna

其中,所设计的反射式卡塞格伦天线由主镜(孔径 25 cm)和副镜(孔径 5 cm)构成,主镜反射面选择为旋转抛物面,副镜选择为旋转双曲面,设计使得天线放大倍数为 20 倍,且副镜焦点与主镜焦点重合。所设计的光学天线具有发射、接收功能,其中 1/4 波片和偏振分光镜构成光束隔离器,主要是阻止反射回来的激光束进入半导体激光器。

4 实验测试

实验测得未准直情况下,距离半导体激光器 10 cm 处的激光束发散特性如图 6 所示。

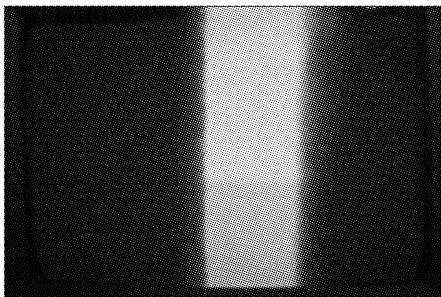


图 6 未准直的半导体激光束发散特性
Fig. 6 Laser beam divergent characteristic for non-collimated semiconductor laser

经准直系统和光学天线进一步准直后的光斑如图 7 所示。其中光斑被次镜及三个支撑架略有遮挡。

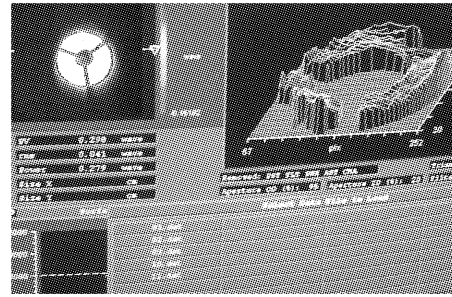


图 7 经准直系统和光学天线后的光斑分布
Fig. 7 Laser beam spot distribution after collimation system and optical antenna

利用波像差测试仪直接测得整个光学系统波像差均方根误差(rms)小于 0.041λ (其测试中使用激光器中心波长为 $\lambda = 778 \text{ nm}$)。

利用光斑定义^[7]和两点法测试发散角原理,多次测得不同方位下距离光源 10 m 处 (L_1) 光斑直径分别为

$$\begin{aligned} D_1 &= 257.3 \text{ mm}; D_2 = 257.4 \text{ mm}; \\ D_3 &= 257.2 \text{ mm}; D_4 = 257.4 \text{ mm}; \\ D_5 &= 257.3 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (15)$$

则第一测试点处光斑平均直径为

$$\bar{D}_1 = 257.32 \text{ mm}, \quad (16)$$

并测试距离光源 60 m (L_2) 处第二点的光斑平均直径为

$$\begin{aligned} D'_1 &= 266.1 \text{ mm}; D'_2 = 265.9 \text{ mm}; \\ D'_3 &= 266.1 \text{ mm}; D'_4 = 265.9 \text{ mm}; \\ D'_5 &= 265.7 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (17)$$

则第二测试点处光斑平均直径为

$$\bar{D}_2 = 266.94 \text{ mm}. \quad (18)$$

根据两点法测试原理求得经过卡塞格伦光学天线压缩后的平均发散角(对应于半角)为

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{D}_2 - \bar{D}_1}{2(L_2 - L_1)} = \frac{266.94 - 257.32}{2 \times 50 \times 10^3} = 96.2 \mu\text{rad}. \quad (19)$$

准直系统发散角计算:

由于已设计天线压缩倍数为 20,故进入光学天线前,即(预)准直系统发散角为

$$\gamma = 96.2 \times 10^{-3} \times 20 = 1.924 \text{ mrad}. \quad (20)$$

实验测试结果表明,准直系统发散角为 1.924 mrad;经过光学天线进一步准直后的发散角为 $96.2 \mu\text{rad}$ 。对于大功率线源半导体激光器能达到这一量级,对光通信系统的远距离传输具有实用意义。

误差原因分析:

实际测试结果与仿真结果(仿真值1.5 mrad)的误差主要来源于:1) 光学系统实际加工误差;2) 光学系统的装配误差;3) 光学系统调试误差;4) 光学系统像差;5) 系统测试误差等因素。在设计、加工和调试中应尽可能地避免这些因素。

5 结 论

利用矢量形式的折射定理,对大功率线源激光器的激光束准直性能进行了研究。针对非球面、非轴对称的激光束准直系统光束传输进行了严格的理论推导,得出了光束发散角的传递矩阵公式,并对激光束的发散角进行了优化设计。

参 考 文 献

- 1 B. Stefano. Compact beam-shaping system for high-power semiconductor laser bars [J]. *J. Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, **9**:380~386
- 2 Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Ma Hongwen *et al.*. Laser collimation method based on the drift feedback control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):373~377
- 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
- 4 Liang Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):909~913
- 5 Li Yuquan, Zhu Yong, Wang Jiangping. Principle and Technology for Optical Communication [M]. Beijing: Science Press, 2006. 327~328
- 6 Li Lin, An Liansheng. Theory and Application of Computer Aided Optical Design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 178
- 7 Li Junchang. Counting for Laser Diffraction and Hot Effects [M]. Beijing: Science Press, 2003. 223~224