

文章编号:1001-5078(2013)12-1384-05

· 光学技术 ·

基于 ZEMAX 的半导体激光器非球面准直透镜设计

杜彬彬,高文宏,李江澜,石云波,徐美芳,赵鹏飞,王艳红
(中北大学电子测试技术国家重点实验室,山西太原 030051)

摘要:为了解决半导体激光器出射光束发散角大的问题,根据几何光学原理,分别针对半导体激光器弧矢和子午方向的不同发散角度建立数学模型,设计出了在两个相互垂直的方向上具有不同非球面面型的非球面透镜,并在 ZEMAX 光学设计软件中进行了仿真。经非球面准直透镜准直之后,半导体激光器快慢轴方向的发散角分别从 35° 和 7.5° 压缩到了 1.8 mrad 和 0.84 mrad ,在距离光源 10 m 处接收面上的总光功率为 0.497 W ,光能利用率高达 99.4% 。结果表明,在相互垂直的方向上具有不同面型的非球面准直透镜对半导体激光器的准直具有良好的效果。

关键词:半导体激光器;非球面透镜;ZEMAX;准直

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.15

Design of aspherical lens for laser diode collimation based on ZEMAX

DU Bin-bin, GAO Wen-hong, LI Jiang-lan, SHI Yun-bo, XU Mei-fang, ZHAO Peng-fei, WANG Yan-hong
(National key laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem of big beam divergence of laser diode, according to the principle of geometrical optics, mathematical models are built respectively for the different divergence in the sagittal and radial directions, and an aspherical lens with two different orthogonal aspherical surface type is designed. Simulations are carried out with the ZEMAX optical design software. After passing through the designed aspherical lens, the divergence angles 35° and 7.5° of the fast and slow axis directions of the laser diode are compressed to 1.8 mrad and 0.84 mrad respectively. The total power received 10 m from the light source is 0.497 W , light energy utilizing efficient is as high as 99.4% . The results show that the aspherical lens with a different face in mutually perpendicular directions has a good effect on laser diode collimation.

Key words: laser diode; aspherical lens; ZEMAX; collimation

1 引言

半导体激光器(Laser diode, LD)具有体积小、成本低、波长范围宽、易于集成等优点,已被广泛应用于医疗、军事、材料加工、激光模拟、光信息处理以及生命科学研究等领域^[1-3]。但由于其自身量子阱波导结构的限制,半导体激光器出射光束存在不对称的较大发散角、输出光束不均衡、存在固有像散等缺点,尤其在大功率半导体激光器阵列的集成应用中,由于半导体激光器单管发散角

太大,造成了严重的光能量损失,大大降低了耦合效率。因此,对单颗半导体激光器的发散光束进行准直整形以解决光能损耗严重、耦合效率低等问题具有重要意义。

基金项目:国家自然科学基金(No. 61078036);山西省重大专项(No. 20111101045)资助。

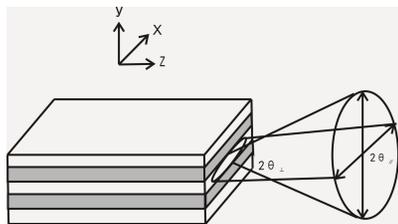
作者简介:杜彬彬(1988-),女,硕士研究生,主要从事光学设计以及红外气体传感器气室结构设计等方面研究。E-mail: dubinbin_nuc@163.com

收稿日期:2013-05-06

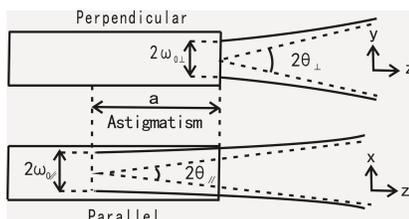
本文采用非球面透镜准直法,针对三菱公司型号为 ML501P73 半导体激光器设计了单片非球面准直透镜。由于非球面曲面在空间上每一点具有不同的曲率,可以有效地消除各种像差,减少光能损失,极大的改善了半导体激光器的光束质量,从而提高了大功率半导体激光器的光能利用率以及耦合效率^[4]。

2 半导体激光器的光束特性

半导体激光器有源层很薄,在垂直于和平行于结平面的两个方向上发光面尺寸不同, y 方向远小于 x 方向的发光面尺寸,LD 远场辐射图如图 1 所示。由矩孔衍射^[5]原理可知,半导体激光器的远场光强分布为 x,y 两个方向上单缝衍射效应的叠加,沿 x,y 方向中央亮斑的扩张与半导体激光器发光面长和宽的线度成反比变化。 y 方向发光面尺寸较小,光的衍射效应较明显,衍射图样较宽,对应较大的发散角; x 方向发光面尺寸较大,光的衍射效应不明显,衍射图样较窄,对应较小的发散角,即 $\theta_{\perp} > \theta_{//}$ 。因而,LD 输出光束为具有一定像散的椭圆高斯光束。



(a) LD的远场辐射图
(a) The far field radiation pattern of LD



(b) 在相互垂直的两个方向上光束发散特性
(b) The beam divergence characteristics in two directions perpendicular to each other

图1 半导体激光器的发散光束性质

Fig.1 Divergent beam properties of laser diode

其中, x 和 y 方向的发散角为:

$$\theta_{//} = \frac{\lambda}{\pi\omega_{0//}} \quad (1)$$

$$\theta_{\perp} = \frac{\lambda}{\pi\omega_{0\perp}} \quad (2)$$

式(1)、(2)为半导体激光器的远场发散角,其中 $\omega_{0//}$ 、 $\omega_{0\perp}$ 分别为 x,y 方向的束腰半径。在设计准直整形系统时,为充分利用能量,取高斯光束光强

$1/e^2$ 处定义发散角,此时光束能量占总能量的 86.4%,光束截面半径^[6] $r = \omega$ (ω 为一个与光束截面半径有关的常数)。

设半导体激光器峰值半宽发散角为 $\theta_{fwhm//,\perp}$, $1/e^2$ 光强处对应的发散角为 $\theta_{//,\perp}$,二者之间的转换关系为:

$$\begin{aligned} \theta_{//,\perp} &= \theta_{fwhm//,\perp} / \sqrt{2 \cdot \ln 2} \\ &= (0.8493218) \cdot \theta_{fwhm//,\perp} \end{aligned} \quad (3)$$

光学系统数值孔径 $NA_{//,\perp}$ 为:

$$NA_{//,\perp} = n \cdot \sin(\theta_{//,\perp}) \quad (4)$$

取半导体激光器的最大发散角来确定系统的数值孔径 NA。

取准直后的光束半径为 d ,则系统焦距可表示为:

$$f = d \cdot \tan(\theta_{//,\perp}) \quad (5)$$

实际设计过程中,综合考虑光束收集率与结构体积大小,取透镜的通光口径为透镜表面上光束半径 ω 的三倍,确保通过光学系统的光能占激光束总光能的 98.8% 以上。

3 非球面准直透镜的设计

ML501P73 半导体激光器标准波长为 638 nm,弧矢方向上峰值半宽发散角 $\theta_{fwhm//} = 7.5^\circ$,子午方向上峰值半宽发散角 $\theta_{fwhm\perp} = 35^\circ$ 。针对 ML501P73 半导体激光器弧矢方向和子午方向的发散角,设计了在相互垂直的两个方向上具有两种不同焦距的非球面透镜^[7-8],实现了半导体激光器在相互垂直的两个方向上的准直。在 2.2 V 标准电压 650 mA 直流驱动下,ML501P73 半导体激光器的功率为 0.5 W。

3.1 非球面方程

设光轴为 z 轴,即非球面的对称轴,坐标原点取在顶点。非球面的标准方程为:

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_{2i}r^{2i} \quad (8)$$

式中, $r^2 = x^2 + y^2$; $Z(r)$ 为镜面的凹陷度; r 为镜面的孔径半径(如图 2); c 为曲率半径的倒数; A 为 r 的各阶系数; k 为曲面的圆锥系数;当 $A = 0$ 时,方程变为二次曲面方程:

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (9)$$

3.2 准直透镜的设计原理

为降低加工难度和成本,设计的非球面透镜一个表面为非球面,另一个表面为平面。选用常见的 K9 玻璃作为透镜材料,其折射率为 $n = 1.5163$ 。

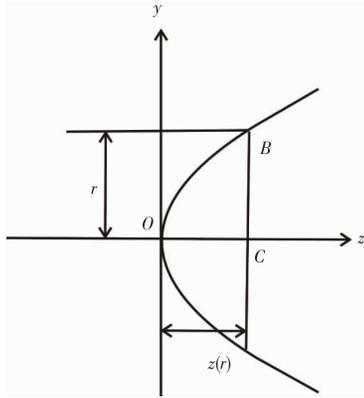


图 2 镜面的凹陷度与半径 r 的示意图

Fig. 2 A schematic representation of the surface sag of different aperture radius

3.2.1 子午方向非球面参数的确定

图 3 中,在 YOZ 平面,主光轴上点光源 R 发出球面光束,照射到非球面透镜的前表面并发生折射,之后平行于光轴传输。点 R 既表示 LD 光源,同时又是透镜表面 z(y) 的焦点。

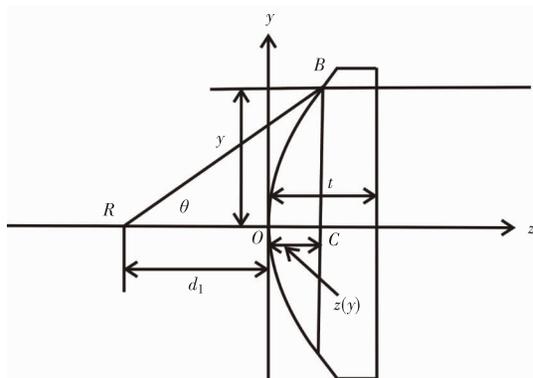


图 3 子午方向光束准直原理图

Fig. 3 A schematic diagram of collimation of radial beam

由费马原理得:

$$d_1 + t \cdot n = \sqrt{y^2 + (d_1 + z(y))^2} + (t - z(y)) \cdot n \quad (10)$$

解得:

$$z(y) = \frac{\frac{1}{d_1(n-1)}y^2}{(1 + \sqrt{1 - (1-n^2)\frac{1}{d_1^2(n-1)^2}y^2})} \quad (11)$$

对比二次曲面方程式(9)与式(11),得出非球面曲面为二次曲面,其中:

$$c_y = \frac{1}{d_1(n-1)} \quad (12)$$

$$R_y = d_1(n-1) \quad (13)$$

$$k_y = -n^2 \quad (14)$$

取子午方向激光束经准直后出射光斑半径为

y。图 3 中,在三角形 RBC 中:

$$\tan(\theta_{\perp}) = \frac{y}{d_1 + z(y)} \quad (15)$$

联立式(10)、(15)得:

$$d_1 = \frac{\sqrt{y^2 + (\frac{y}{\tan(\theta_{\perp})})^2} - n \cdot \frac{y}{\tan(\theta_{\perp})}}{1 - n} \quad (16)$$

在半导体激光器、准直后目标光斑大小以及透镜材料确定的条件下, θ_{\perp} 、y、n 均已知,计算得出 d_1 ,代入式(12)~(14)得到圆锥系数 k_y 、曲率半径 R_y 及其倒数 c_y 。

3.2.2 弧矢方向非球面参数的确定

如图 4 所示,在 XOZ 平面,由于半导体激光器固有像散 Astigmatism 的存在,其像散量为 a,在相互垂直的两个方向上非球面面型的焦点不在同一点,弧矢方向镜面焦点 R'与子午方向镜面焦点 R 相距为 a。

ML501P73 型半导体激光器有源区发光面尺寸在快轴方向为 2 μm,慢轴方向为 40 μm。由图 1(b)可知:

$$a = \frac{20 \mu\text{m}}{\tan(\theta_{//})} = 179.0091 \mu\text{m} \quad (17)$$

由图 4,知:

$$d_2 = d_1 + a = 1.4142 \text{ mm} \quad (18)$$

由于慢轴方向发散角度较小,准直之后光斑会比较小,不考虑子午方向准直后光斑大小。由式(12)~(14)知:

$$c_x = \frac{1}{d_2(n-1)} \quad (19)$$

$$R_x = d_2(n-1) \quad (20)$$

$$k_x = -n^2 \quad (21)$$

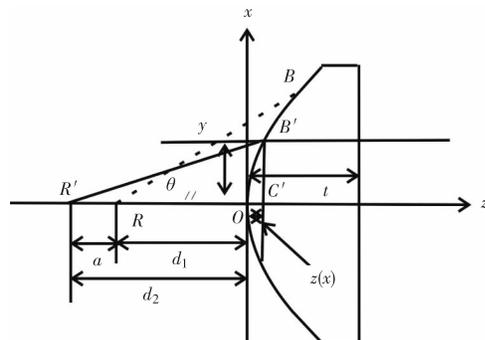


图 4 弧矢方向光束准直原理图

Fig. 4 A schematic diagram of collimation of sagittal beam

由于半导体激光器结构特殊,快轴方向发散角比较大,考虑到耦合系统的数值孔径大小,希望准直后的光斑在垂直方向压缩在 2mm 内,即光斑半径最大取 $y = 1$ 。

代入 θ_1, y, n, d_2 值得:

$$d_1 = 1.2352 \quad (22)$$

$$c_y = 1.5681 \quad (23)$$

$$R_y = 0.6377 \quad (24)$$

$$k_y = -2.2992 \quad (25)$$

$$c_x = 1.3696 \quad (26)$$

$$R_x = 0.7302 \quad (27)$$

$$k_x = -2.2992 \quad (28)$$

3.2.3 非球面准直透镜的曲面方程

设计的非球面准直透镜方程为:

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}} \quad (29)$$

其中, R_x, R_y, k_x, k_y 分别为非球面透镜在 X、Y 方向的曲率半径和圆锥系数。由式(25)和式(28)知,两个方向非球面面型的圆锥系数均小于 -1,不同的圆锥系数代表不同的面型,当圆锥系数小于 -1 时,二次曲面为双曲面^[9-10]。所以非球面透镜在弧矢方向和子午方向的面型均为双曲面,属于常用非球面面型的一种。

4 仿真及结果分析

采用 ZEMAX-EE 光学设计软件进行仿真。根据实际光源资料建立半导体激光器光源模型,在距离光源 100 mm 处测得远场分布如图 5 所示。仿真得半导体激光器光束光斑为椭圆形,接近标准高斯分布。

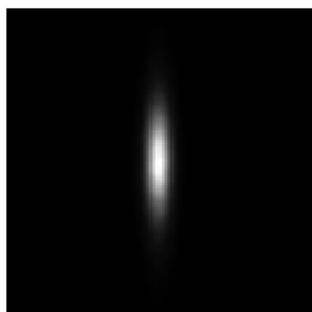


图 5 100 mm 处半导体激光器的光斑
Fig. 5 The beam spot of LD at 100mm

在 ZEMAX 软件非序列模式下,输入非球面准直透镜参数,建立模型得非球面透镜如图 6 所示。

在系统中插入平面探测器,测试光斑图样。图 7 是距离光源 10 mm 和 100 mm 处采集到的光斑图样,其中图 7(a)和图 7(b)为未经非球面准直透镜准直采集到的光斑图样,图 7(c)和图 7(d)为激光束经过非球面准直透镜准直之后接收到的光斑图样,通过比较,可知准直之后光斑图样明显变小,光束质量显著提高。

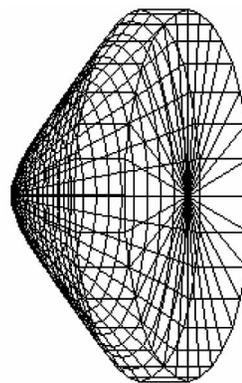


图 6 非球面透镜的 ZEMAX 模型

Fig. 6 The ZEMAX model of aspherical lens

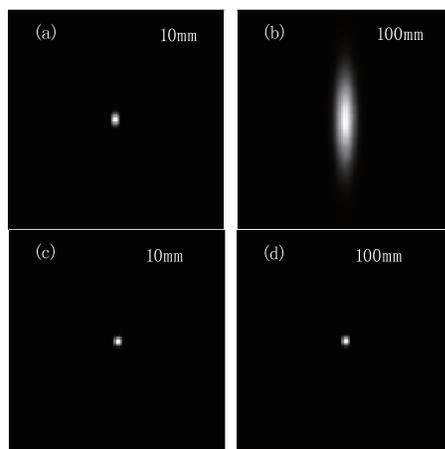


图 7 准直前后光斑比较

Fig. 7 Comparison of spot diagrams before and after collimating

图 8 为经准直透镜准直之后,在距离光源 100 mm, 1 m, 5 m 和 10 m 处,采集到的光斑图样。

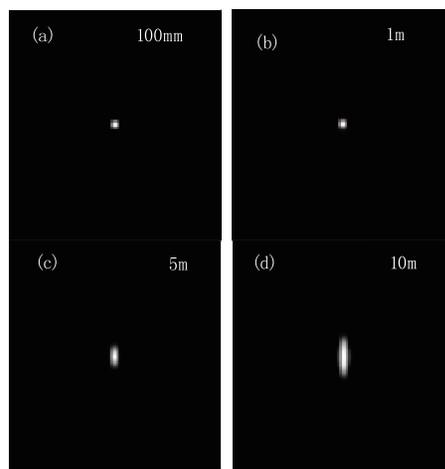


图 8 距离光源不同距离处的准直光斑

Fig. 8 Collimated beam spot of different distance from the source

从图 8 可以看出,光束从 100 mm 处到 10 m 处的传播过程中,光斑大小没有发生很大的变化,说明非球面准直透镜对光束的准直起到了比较好的效果。

在距离光源 5 m 和 10 m 处,查看探测器界面上

的 Text 数据表分别得到 x 方向上的光斑半径 $R_{x1} = 4.5 \text{ mm}$ 、 $R_{x2} = 8.7 \text{ mm}$ ， y 方向上的光斑半径 $R_{y1} = 11.7 \text{ mm}$ 、 $R_{y2} = 20.7 \text{ mm}$ 。计算得到 x 方向上的半发散角： $\theta_{//} = \arctan((R_{x2} - R_{x1}) / (z_2 - z_1)) = 1.8 \text{ mrad}$ ， y 方向上的半发散角： $\theta_{\perp} = \arctan((R_{y2} - R_{y1}) / (z_2 - z_1)) = 0.84 \text{ mrad}$ 。距离光源 10 m 处，探测器接收面上激光束总功率为 0.497 W，光能利用率达到 99.4%。

5 结论

本文从理论出发，设计出了在相互垂直的两个方向上具有不同非球面面型的准直透镜。根据费马原理，计算出了非球面的面型参数，并在 ZEMAX 软件中进行了仿真。经准直后的激光束，在弧矢和子午方向的发散角分别为 1.8 mrad 和 0.84 mrad，距离光源 10 m 处接收到的激光束总光功率为 0.497 W，提高了光能利用率和耦合效率。本文从理论研究的角度出发，设计出了满足工程要求的透镜元件，还可进一步将所设计的透镜加工出来，结合实际光源做进一步的实验验证。

参考文献：

- [1] Zhang Ming. Beam collimation and intensity uniformization of laser diode array using lenslets[D]. Auburn, Alabama; The Graduate Faculty of Auburn University, 2013: 5-6.
- [2] Gao Xuesong, Gao Chunqing, et al. Experimental study by using the micro-cylindrical lens as the fast axis collimator for laser diode array[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(8): 564-565. (in Chinese)
高雪松, 高春清, 等. 光纤微透镜用于阵列半导体激光器快轴准直研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 564-565.
- [3] Wang De, Li Xueqian. The latest progress and its application of laser diode[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 279-283. (in Chinese)
王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3): 279-283.
- [4] Ding Zhizhong. Fabrication of aspherical liquid lens and the application in the collimating of laser diode[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009: 1-6. (in Chinese)
丁志中. 非球面液滴透镜透镜的制作及其在半导体激光器准直中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 1-6.
- [5] Wang Zhijiang, Gu Peisen. Modern optical applications technical manuals Vol1 [M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 34-35. (in Chinese)
王之江, 顾培森. 现代光学应用技术手册上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 34-35.
- [6] Hu Yuxi, An Liansheng. Applied optics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2006. 247-248. (in Chinese)
胡玉禧, 安连生. 应用光学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006. 247-248.
- [7] Ding Zhizhong, Wang Keyi, Zhan Zhenxian. Application of aspherical liquid lens in laser diode beam shaping[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 624-626. (in Chinese)
丁志中, 王克逸, 詹珍贤. 非球面液滴透镜在 LD 光束整形中的应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 624-626.
- [8] Katsumoto IKEDA, Daisuke SEKI. Optical element and illumination device using the same [P]. US 2013/0063952 A1. Nov. 7, 2012.
- [9] Wang Zhijiang, Gu Peisen. Modern optical applications technical manuals Vol2 [M]. Beijing: China Machine Press, 2009. 19. (in Chinese)
王之江, 顾培森. 现代光学应用技术手册: 下册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. 19.
- [10] Gou Zhiyong, Wang Jiang, et al. The summary of aspheric optical design technology [J]. Laser Journal, 2006, 27(3): 1-2. (in Chinese)
勾志勇, 王江, 等. 非球面光学设计技术综述[J]. 激光杂志, 2006, 27(3): 1-2.