

文章编号: 1001-3806(2015)04-0458-04

## 基于像散曲面微透镜的半导体激光准直研究

殷智勇<sup>1,2</sup>, 强希文<sup>1</sup>, 汪岳峰<sup>3</sup>, 江钰<sup>1</sup>, 徐云岫<sup>1</sup>, 宗飞<sup>1</sup>, 封双连<sup>1</sup>, 胡月宏<sup>1</sup>

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 中国人民解放军装备指挥技术学院 航天指挥系, 北京 101416; 3. 军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为了实现半导体激光器的光束准直, 分析了半导体激光器光束沿快、慢轴方向的准直原理。采用单个半导体激光器作为被准直单元, 提出了基于像散曲面微透镜的半导体激光器光束准直方法。讨论了半导体激光器填充因子对像散曲面微透镜准直性能的影响。对填充因子 0.5 的半导体激光器进行模拟验证。准直后, 快轴方向剩余发散角约为  $0.34^\circ$ , 慢轴方向剩余发散角约为  $2.69^\circ$ 。结果表明, 像散曲面微透镜不但可以对高填充因子的半导体激光器光束进行准直, 而且准直后出射光斑面积小。该研究为高功率半导体激光器堆栈光束的准直提供了可行性方案。

**关键词:** 激光器; 光束准直; 微透镜; 像散; 剩余发散角; 填充因子

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.006

## Research of laser diode beam collimation based on astigmatism surface microlens

YIN Zhiyong<sup>1,2</sup>, QIANG Xiwen<sup>1</sup>, WANG Yuefeng<sup>3</sup>, JIANG Yu<sup>1</sup>, XU Yunxiu<sup>1</sup>, ZONG Fei<sup>1</sup>,  
FENG Shuanglian<sup>1</sup>, HU Yuehong<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 2. Department of Space and Command, Academy of Equipment, Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China; 3. Department of Optics &amp; Electrics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to collimate laser beam of laser diodes, the principle of beam collimation was analyzed in the fast and slow axis directions. Based on astigmatic surface microlens, one method was proposed to collimate the laser beam by regarding one laser diode as the collimated unit. The effect of filling factor of laser diode on collimation performance was discussed. As an example of laser diode of 0.5 fill factor, the remaining divergence angle of the fast axis reaches about  $0.34^\circ$  and the remaining divergence angle of the slow axis reaches about  $2.69^\circ$ . The results indicate that the microlens can collimate the laser diodes beam with high fill factor and the spot area of the collimated light is very small. The research can provide the new feasible collimation method for high power laser diodes.

**Key words:** lasers; beam collimation; microlens; astigmatism; remaining divergence angle; fill factor

### 引言

半导体激光器又称激光二极管, 具有体积小、寿命长、重量轻等特点, 在激光测距、光通信及材料加工等许多领域中具有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。半导体激光器的发散角度在垂直与水平方向上极不对称。在平行于 P-N 结的方向, 发散角为  $8^\circ \sim 10^\circ$  左右, 而在垂直于 P-N 结的方向, 发散角为  $40^\circ \sim 60^\circ$  左右<sup>[3-5]</sup>。半导体激光器光束的大发散角制约其直接使用, 必须对其发散的光束进行准直。目前半导体激光器快轴方向的准直一般

采用光纤、圆柱透镜、双圆柱透镜等<sup>[4-7]</sup>, 而在实际应用中更多用的是非球面微柱透镜<sup>[8-10]</sup>, 如 SUSS 公司、LI-MO 公司等, 光束经准直后剩余角度通常小于  $0.5^\circ$ 。慢轴方向的光束准直, 则采用在快轴准直透镜后面再增加一组微柱透镜对慢轴方向光束准直, 如 Axetris 公司。但这要求半导体激光器发光单元的填充因子要小于 0.3。而对于高功率半导体激光器而言, 发光单元的填充因子一般为 0.5, 这就会导致经快轴准直后的来自不同半导体激光器的光束在慢轴方向彼此重叠, 不能再用一组微柱透镜对每一束光束独立进行准直。

作者提出以基于像散曲面的微透镜用于高功率半导体激光器光束的快慢轴方向光束同时准直。沿光轴方向上, 像散微透镜可以在快慢轴方向上实现不同的数值孔径分别与半导体激光器两个方向光束的数值孔径相匹配。在垂直光轴平面内, 像散微透镜的最大通

作者简介: 殷智勇(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事固体激光和激光光束整形技术的研究工作。

E-mail: yzy8465@163.com

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-11-12

光孔径等于半导体激光器发光单元快慢轴方向上最大孔径的乘积。所以准直后的光斑大小与半导体激光器堆栈发光面轮廓尺寸相等,这样有利于后续光学系统的小型化,减小整个光路中各光学元件的孔径。

### 1 准直原理

在高功率半导体激光器堆栈中,每个发光单元的长径比都达到 100 以上。沿快轴方向上,发光区域约为  $1\mu\text{m}$ 。而沿慢轴方向上,发光区域通常在  $100\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$  之间。两个方向上光束的发散角度不同且存在一定的像散距离。针对半导体激光器的光束特性,将出射光束按快轴、慢轴两个方向分别进行准直分析。准直微透镜快轴方向上的最大孔径  $P_f$ ,这是由半导体激光器堆栈中 bar 条的间距决定的。而慢轴方向最大孔径  $P_s$  是由相邻两个发光单元中心距离决定的。

首先沿快轴方向上看,如图 1a 所示。像散曲面微透镜是一个平-凸的厚透镜,半导体激光光源的中心位于微透镜的物方焦点处,由于微透镜在快轴方向上的孔径通常为毫米量级,远远大于  $1\mu\text{m}$  发光区域,因此可以将快轴方向上的发光区域视为理想的点光源。半导体激光器输出光束首先在空气中传播,然后经过微透镜进行光束准直,最后平行光轴出射。根据等光程原则,快轴方向微透镜曲面的坐标  $C(z,y)$  应满足下式:

$$\frac{f_{\text{BFL}}}{\cos\alpha_1} + n \sqrt{(W+z)^2 + (y - f_{\text{BFL}}\tan\alpha_1)^2} = f_{\text{BFL}} + z + nW \quad (1)$$

式中,  $n$  是微透镜的折射率,  $\alpha_1$  为光束入射角,  $f_{\text{BFL}}$  为微透镜的后焦距,  $W$  为微透镜厚度。不同的  $f_{\text{BFL}}$  和  $W$ , 可以得到不同非球面的微透镜,以满足快轴方向光束准直精度的需要。

其次,沿慢轴方向上面微透镜是双凸厚透镜,如图 1b 所示。利用两表面曲率半径与厚度之间的关系,实现两个长焦曲面等效为一个短焦透镜,以完成慢轴方向光束发散角的压缩。

如图 2 所示,慢轴方向透镜的设计必须满足 3 个条件:首先,保持准直透镜与光源存在一定间隔,即

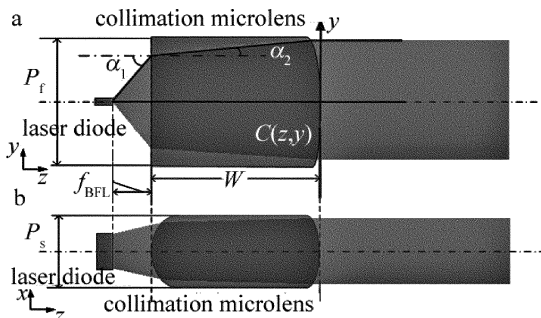


Fig. 1 Schematic of astigmatism surface microlens

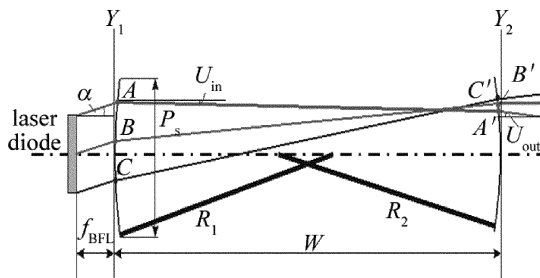


Fig. 2 Transmission of the beam along the slow axis direction

$f_{\text{BFL}} > 0$ ;其次,入射光束达到透镜前表面形成的光斑直径小于透镜孔径,即  $A$  的高度值小于  $P_s$  的一半;再次,光束出射透镜时不得溢出,即  $A'$  与  $C'$  的高度值都不大于  $P_s$  的一半;最后,准直后光束剩余发散角度小于光束远场发散半角,即  $U_{\text{out}} < \alpha$ 。光束经透镜前表面的折射角  $U_{\text{in}}$  与光束出射透镜的剩余发散角  $U_{\text{out}}$  的表达式如下两式所示:

$$U_{\text{in}} = \arcsin\{\sin[\alpha + \arcsin(Y_1/R_1)]/n\} - \arcsin(Y_1/R_1) \quad (2)$$

$$U_{\text{out}} = \arcsin(Y_2/R_2) - \arcsin\{\sin[\arcsin(Y_2/R_2) - U_{\text{in}}] \times n\} \quad (3)$$

式中,  $Y_1, Y_2$  分别为光束与微透镜前后表面相交时的高度,  $R_1, R_2$  分别为微透镜前后表面的曲率半径。

经上述分析可知,微透镜的第一表面则为慢轴方向上的柱面。微透镜的第二表面则为自由曲面,不但快慢轴方向上的孔径不同,即  $P_s \neq P_f$ ,而且两个方向上的曲率半径也不相同,即  $R_s \neq R_f$ ,如图 3 所示。这就造成各自方向上曲率半径的对应的圆心  $S_1, S_2$  不重合,与像散现象相吻合,因此,也将此自由曲面微透镜称之为像散曲面微透镜。

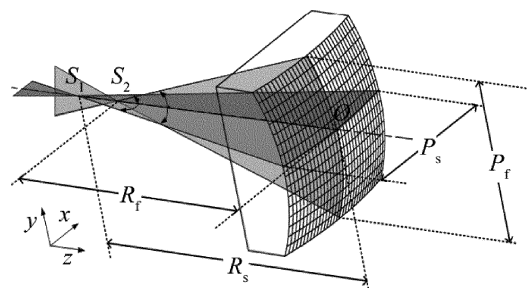


Fig. 3 Free-form surface with astigmatism

### 2 仿真与讨论

以波长为  $808\text{nm}$  的半导体激光器为例进行仿真验证,快轴发散角约为  $40^\circ$ ,慢轴发散角约为  $10^\circ$ ,填充因子 0.5,发光单元尺寸  $200\mu\text{m}$ 。虽然在原理分析过程中将准直微透镜按快慢轴方向上进行独立分析,但是在实际设计过程中两个方向上的参量依然会相互制约。微透镜与光源的间距就是由慢轴方向上的光学参量制约,而最大的准直距离又是由快轴方向的光学参

量制约。在以上两个制约条件下,寻找最小剩余发散角度的准直微透镜慢轴方向初始参量,如表1所示,从而可以确定后焦距 $f_{BFL} \approx 0.1\text{mm}$ ,通过(2)式和(3)式,可得到最小剩余发散角度为 $2.65^\circ$ ,相对于慢轴方向光束发散半角而言角度减小接近一半。

Table 1 Optical parameters of collimating microlens along the slow axis direction

	value
material	S-TIH(Ohara)
aperture	$P_f = 1.6\text{mm}, P_s = 0.2\text{mm}$
curvature radius	$R_1 = 0.9\text{mm}, R_2 = 1\text{mm}$

准直微透镜快轴方向曲面为非球面,面型数据由(1)式可得。将面型数据进行拟合,其二次项系数为 $-0.5173$ ,一次项系数为 $0$ ,常数项为 $0.0852$ 。如图4所示,拟合曲线与计算的面型曲线完全重合。利用Rhino软件绘制准直微透镜实体,再导入ZEMAX软件非序列模式下进行光学仿真。

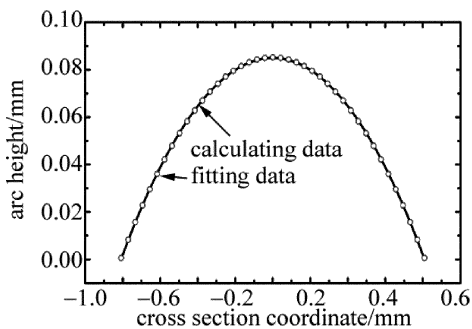


Fig. 4 Data fitting of microlens surface

在距离光源 $20\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$ 处分别放置矩形探测器,将半导体激光器光束自由传输与光束经准直后传输得到的两组光斑进行对比。图5a和图5b为光束不经准直在 $20\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$ 处得到的光斑图样。由于光束

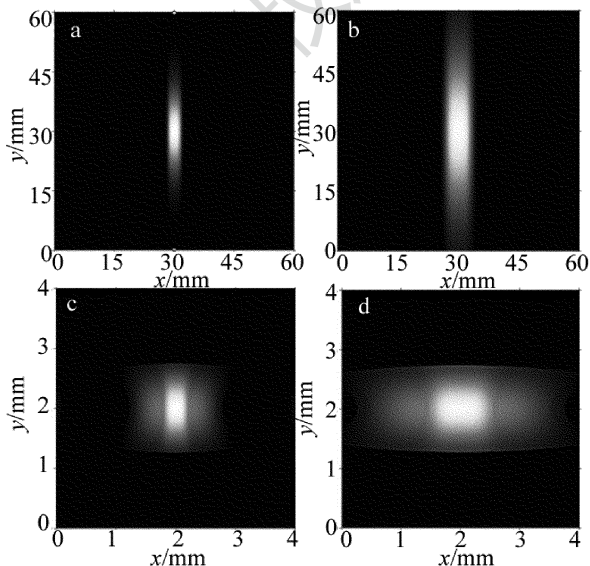


Fig. 5 Effect of collimation microlens on beam transmission

具有一定的发散角度,形成的光斑面积增大很快,尤其是在快轴方向。图5c和图5d为光束经像散曲面微透镜准直后在 $20\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$ 处得到的光斑图样。通过对比发现,光束准直后光斑轮廓在快慢轴方向上都得到了较好的保持,快轴方向剩余发散角约为 $0.34^\circ$ ,慢轴方向剩余发散角约为 $2.69^\circ$ ,与计算值非常接近。这是因为用于准直的微透镜自身 $F$ 数较大,且又增加了非球面的使用,进一步减小了像差对微透镜准直的影响,这一点与大透镜设计过程中不同。通过以上对比证明了基于像散曲面微透镜具有光束准直特性。

对不同孔径的像散曲面微透镜做进一步准直性能的分析。如图6所示,随着半导体激光器填充因子的降低,光束经像散曲面微透镜后剩余发散角度将随之降低。当填充因子为 $0.1$ ,微透镜的孔径选为 $0.5\text{mm}$ 时,可实现半导体激光器慢轴方向光束最小剩余发散角 $0.1^\circ$ 。

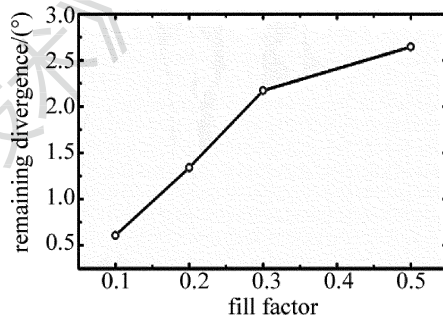


Fig. 6 Relationship of fill factor of laser diode and remaining divergence angle

### 3 小结

提出了将像散曲面微透镜用于半导体激光器的光束准直。介绍了基于像散曲面微透镜同时实现快慢轴双向光束的准直原理及设计方法。以 $0.5$ 填充因子的半导体激光器为例,设计了准直微透镜,实现了快轴方向剩余发散角约为 $0.34^\circ$ ,慢轴方向剩余发散角约为 $2.69^\circ$ ,检验了像散曲面微透镜对半导体激光光束的准直性能。相比原有准直系统,像散曲面微透镜结构简单、能量传输效率高、准直后光斑面积小、具有很强的实用性,有效解决了高填充因子的半导体激光器的光束准直问题。像散曲面微透镜的加工与装调将作为今后工作的重点,需要进一步做深入的研究。

### 参考文献

[1] XIE H B, LU E Y, ZHU X Ch, et al. Shaping and collimation of LD beam with astigmatism[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 551-555 (in Chinese).  
 [2] CHEN G, ZHAO Ch M, JI R Y, et al. Simulation design of semiconductor laser collimation based on ZEMAX[J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 318-321 (in Chinese).

- [3] JIA W W, WANG Y F, LEI Ch Q, *et al.* Effect of assembling error in LD array on homogeneity of hollow ducts [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 93-98 (in Chinese).
- [4] DING P, CAO Y H, QI J F, *et al.* Collimation and focus characteristics of slow-axis beams of diode laser array [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2010, 36(3): 429-432 (in Chinese).
- [5] DENG Q H, PENG H Sh, SUI Zh, *et al.* Coupling method for laser-diode-array end-pumped solid-state amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(31): 5908-5915.
- [6] LIU Zh H, YANG H, SHI Zh D, *et al.* Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive microlens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0102005 (in Chinese).
- [7] ROLAND D. *High-power diode lasers Fundamentals, technology, applications* [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000: 121-138.
- [8] DANIEL V M, MARIO G M, ANTONIO A, *et al.* High-efficiency light-emitting diode collimator [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(12): 123001.
- [9] WANG G Zh, WANG L L, LI F L, *et al.* Collimating lens for light-emitting-diode light source based on non-imaging optics [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(11): 1654-1659.
- [10] XU Q, HAN Y P, CUI Zh W. Characteristic of laser diode beam propagation through a collimating lens [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 549-553.

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©