

文章编号: 0258-7025(2006)07-0937-04

双半圆柱透镜准直半导体激光光束

马 华, 曾晓东, 安毓英

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 柱透镜被广泛运用于准直半导体激光光束, 而普通圆柱透镜准直能力并不高, 为了克服这一不足, 提出一种新的柱透镜结构: 双半圆柱透镜(DHCL); 基于光线传输理论导出该结构柱透镜准直激光光束的基本公式并给出数值模拟的结果。理论分析和数值模拟均表明: 在用于准直半导体激光器输出光束方面, 双半圆柱透镜突破了普通圆柱透镜在最佳准直时对透镜材料折射率的限制, 提高了结构设计和材料选择的灵活性; 特别是在高折射率条件下, 双半圆柱透镜对光束的准直能力远远超过了普通圆柱透镜。理论上可以将半导体激光光束快轴方向发散角压缩到 0.1 mrad 的量级。

关键词 激光技术; 半导体激光器; 双半圆柱透镜; 准直; 光线光学

中图分类号 O 435.1 **文献标识码** A

Double Half-Cylindrical Lens Collimate the Beam of Laser Diode

MA Hua, ZENG Xiao-dong, AN Yu-ying

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Cylindrical lenses have been widely used for collimating laser diode beam, but the collimating performance is usually not high. A new collimating element-double half-cylindrical lens (DHCL) was proposed. The theoretical expressions of the collimated beam of a DHCL are derived by transmission theory, and the numerical results are also given. Both theoretical and numerical results indicate that a DHCL can be made from the high refractive index material but a normal cylindrical lens cannot, and the collimating performance of a DHCL is much better than that of a normal cylindrical lens. The divergence angle of the collimated beam could be as small as 0.1 mrad.

Key words laser technique; semiconductor laser; double half-cylindrical lens; collimate; ray optics

1 引 言

在多种用来准直半导体激光光束的方法中, 利用圆柱透镜来压缩快轴方向光束发散角被认为是一种经济实用而又高效的方法^[1~4]。文献[2, 3]对圆柱透镜的准直特性进行了系统的分析, 结果表明: 用圆柱透镜准直半导体激光光束, 其准直效果随透镜材料折射率的增大而提高; 但是, 要达到最佳的准直效果, 圆柱透镜折射率的值又不允许过大, 而是有一个范围: $1 < n < 2$ 。本文结合文献[2, 3]的结果, 在进一步分析圆柱透镜准直光路的基础上^[5~9], 提出

一种新的柱透镜结构: 双半圆柱透镜(DHCL)。这种结构的柱透镜, 在最佳准直时, 其材料的折射率允许高于 2; 当折射率在一定的范围内变化时, 其准直效果也随折射率的增加而提高。理论上, 可以将半导体激光器输出光束快轴方向发散角压缩到 0.1 mrad 量级。

2 光路分析与公式推导

双半圆柱透镜由两个折射率相同、半径不同的平凸柱面透镜对靠在一起构成, 如图 1 所示。将透

收稿日期: 2005-08-26; 收到修改稿日期: 2005-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(60277004)资助项目。

作者简介: 马 华(1974—), 男, 甘肃会宁人, 西安电子科技大学光学工程专业硕士研究生, 主要从事半导体激光器光束质量处理方面的研究。E-mail: gshnmh@163.com

导师简介: 曾晓东(1956—), 男, 吉林长春人, 西安电子科技大学技术物理学院院长, 博士生导师, 主要从事激光器光学、光纤传感与测量技术以及远轴光传播等方面的研究工作。E-mail: xdzens@xidian.edu.cn

镜与激光器以一定的距离放置,使透镜的中轴与激光器慢轴平行,快轴方向的发散光束可以入射到小圆柱面,经两次折射后,在大圆柱面上出射从而得到在快轴方向发散角被压缩的准直光束。

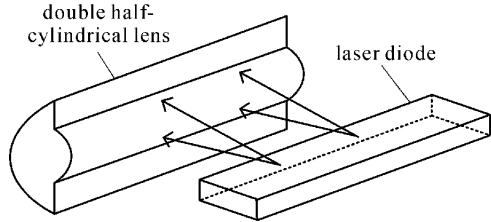


图 1 准直系统示意图

Fig. 1 Sketch for collimation system

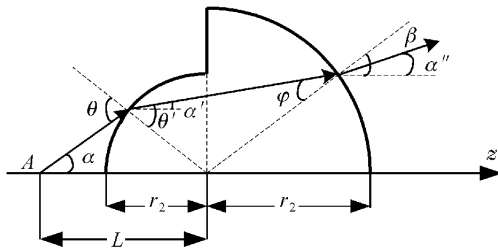


图 2 准直光路示意图

Fig. 2 Sketch for collimation light path

半导体激光器有源区在快轴方向的厚度很小,约 $0.1 \mu\text{m}$,因此可以近似看作是沿慢轴方向的线光源。图 2 是双半圆柱透镜横截面上部分的光路示意图,图中, A 为光源位置, r_1 和 r_2 分别表示小半圆柱透镜和大半圆柱透镜的半径, L 为透镜轴心到光源的距离, α 和 α'' 分别表示入射光线和出射光线与 z 轴的夹角, θ 和 θ' 分别为光线在小半圆柱面上的入射角和折射角, φ 为光线在大半圆柱面内的入射角, β 为大半圆柱面上光线出射处柱面法线与 z 轴的夹角。由于光束沿传播方向具有角对称性,所以只需考虑上半部分的光线即可。当倾角为 α 的光线入射到透镜,经两次折射后以倾角 α'' 在大半圆柱面出射,根据几何关系和光线光学知识,可以推导出 α'' 的表达式

$$\sin\theta' = \frac{1}{n} \sin\theta = \frac{k_1}{n} \sin\alpha, \tag{1}$$

$$\sin\varphi = \frac{k_2}{n} \sin\alpha, \tag{2}$$

$$\sin\theta = k_1 \sin\alpha, \tag{3}$$

$$\sin\beta = k_2 \sin\alpha, \tag{4}$$

$$\alpha'' = \alpha + \theta' - \theta + \varphi - \beta, \tag{5}$$

$$\alpha'' = \alpha + \arcsin\left(\frac{k_1}{n} \sin\alpha\right) - \arcsin(k_1 \sin\alpha) +$$

$$\arcsin\left(\frac{k_2}{n} \sin\alpha\right) - \arcsin(k_2 \sin\alpha), \tag{6}$$

(6) 式即我们所要求的结果,式中 n 为透镜材料的折射率; $k_1 = L/r_1, k_2 = L/r_2$, 称之为离心率,是表征透镜结构参数和系统装配位置相互关系的物理量。由(6)式不难发现, α'' 是 α 的函数,其压缩效果依赖于 n, k_1, k_2 等参数的取值,因此,透镜材料的合理选择、结构参数的优化设计以及提高系统装配位置的精度成为准直效果好坏的关键。

3 数值模拟

由于(6)式的解析分析非常困难,需要采用数值模拟的方法进行分析和设计。

3.1 $\alpha \sim \alpha''$ 曲线

先给定透镜材料折射率值 n , 运用数值方法,就可以计算出当准直效果最好时参数 k_1, k_2 的值,该取值称之为对应折射率 n 时 k_1, k_2 的理论最佳值。选择两种典型折射率:低折射率 ($n = 1.52$) 和高折射率 ($n = 2.30$), 对圆柱透镜 ($k_1 = k_2$) 和双半圆柱透镜 ($k_1 \neq k_2$) 在 k_1, k_2 取理论最佳值的情况下进行模拟并绘制 $\alpha \sim \alpha''$ 曲线,结果如图 3 所示,其中 α 的范围为 $0^\circ \sim 20^\circ (0 \sim 0.35 \text{ rad})$ 。

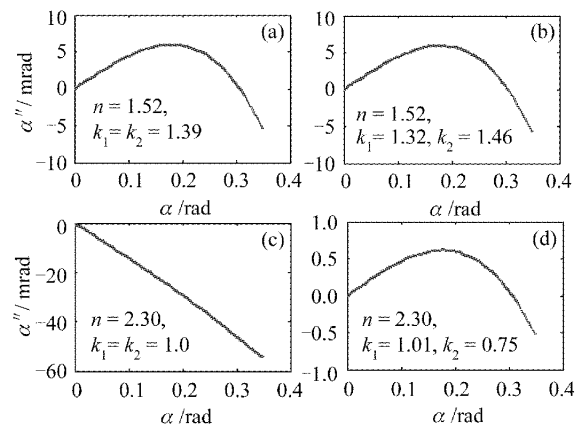


图 3 $\alpha \sim \alpha''$ 曲线

Fig. 3 $\alpha \sim \alpha''$ curve

图 3(a), (b) 表明,在低折射率 ($n = 1.52$) 情况下,圆柱透镜和双半圆柱透镜的 $\alpha \sim \alpha''$ 曲线相似,压缩效果也相当;图 3(c), (d) 表明,当取高折射率 ($n = 2.30$) 时,圆柱透镜和双半圆柱透镜的 $\alpha \sim \alpha''$ 曲线差别较大,其压缩效果也相差甚远:圆柱透镜的 $|\alpha''|_{\text{max}}$ 约为 50 mrad , 双半圆柱透镜的 $|\alpha''|_{\text{max}}$ 可达 0.6 mrad 。

3.2 折射率对准直效果的影响

选取不同的折射率分别进行模拟,计算了 k_1, k_2 的理论最佳值以及代表准直效果的 $|\alpha''|_{\max}$ 值,其结果如表 1 所示。

表 1 不同折射率透镜的准直结果

Table 1 Collimation results from lens with different refractive indexes

n	Cylindrical lens		Double half-cylindrical lens		
	$k_1 = k_2$	$ \alpha'' _{\max} / \text{mrad}$	k_1	k_2	$ \alpha'' _{\max} / \text{mrad}$
1.52	1.39	5.9	1.32	1.46	5.9
1.77	1.12	3.3	1.12	1.13	2.6
1.85	1.07	2.0	1.07	1.07	2.0
2.00	1.00	5.4	1.00	0.98	1.6
2.25	1.00	43.9	1.00	0.79	0.7
2.30	1.00	50.5	1.01	0.75	0.6
2.60	1.00	85.2	1.01	0.61	0.4
3.50	1.00	153.3	1.00	0.40	0.3

观察表 1 可以发现,就两种不同结构的透镜,透镜材料的折射率是影响准直效果的关键因素。对圆柱透镜,当折射率 $n < 2.0$ 时,准直效果随 n 值的增大而提高;而当 $n > 2.0$ 时,准直效果随 n 值的增大则降低。对双半圆柱透镜,其准直效果随 n 值的增大而持续变好。两种结构之所以有如此的不同结果,是因为:对圆柱透镜,由于 $L \geq r_1$ (参见图 2),所以必有 $k_1 = k_2 \geq 1$;对双半圆柱透镜,只要求 $k_1 \geq 1$ 且 $k_2 > 0$ 即可,这样,双半圆柱透镜就会在设计上有更大的自由度从而使其准直效果在 $n > 2.0$ 时远比圆柱透镜优越。

理论分析和数值模拟均表明: $n = 2.0$ 是这两种结构在准直效果差异上的转折点,事实上,双半圆柱透镜的优势只有在高折射率 ($n > 2.0$) 的情况下才得以体现,而在折射率较低 ($n < 2.0$) 时二者相差不大。从材料选择和加工工艺难易的角度考虑,如果对准直度要求不高,宜采用低折射率圆柱透镜准直;如果要达到将发散角压缩到 0.1 mrad 量级的高度准直,则应当采用高折射率双半圆柱透镜。数值结果表明,当 $n = 4.33, k_1 = 1.00, k_2 = 0.30$ 时,理论上, $|\alpha''|_{\max}$ 的值可达 0.03 mrad ,这样,就可以将发散角为 40° 的激光束准直到 0.06 mrad 。

4 位置容差

透镜在加工、装配等过程中,结构参数和位置参数的实际值与理论值之间必然存在误差,从而使出

射光线的实际倾角与理论值有一定的偏差,因此有必要讨论容差问题。一般而言,容差越大,表示系统对加工或装配的精度越不敏感,从而系统相对器件尺寸或位移的稳定性就越好。根据前面的分析, k_1, k_2 集中体现了结构参数和位置参数对压缩效果的影响(参见(6)式),因此,可以通过分析 k_1, k_2 的误差对 α'' 的影响来讨论位置容差。由(6)式对 α'' 求偏导

$$\frac{\partial}{\partial k_1} \alpha'' = \left(\frac{1}{\sqrt{n^2 - k_1^2 \sin^2 \alpha}} - \frac{1}{\sqrt{1 - k_1^2 \sin^2 \alpha}} \right) \sin \alpha, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial k_2} \alpha'' = \left(\frac{1}{\sqrt{n^2 - k_2^2 \sin^2 \alpha}} - \frac{1}{\sqrt{1 - k_2^2 \sin^2 \alpha}} \right) \sin \alpha. \quad (8)$$

通过表 1 可以看出,当 $n > 2.0$ 时,对双半圆柱透镜,总有 $k_1 \approx 1, k_2 < 1$;取 $0 \leq \alpha \leq 20^\circ$,则(7),(8)式可进一步简化为

$$\frac{\partial}{\partial k_1} \alpha'' \approx \left(\frac{1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} - \frac{1}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial k_2} \alpha'' \approx \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \sin \alpha, \quad (10)$$

因此,当 k_1, k_2 存在 $\Delta k_1, \Delta k_2$ 的误差时,由此引起的 α'' 的偏差约为

$$\Delta \alpha'' = \frac{\partial}{\partial k_1} \alpha'' \cdot \Delta k_1 + \frac{\partial}{\partial k_2} \alpha'' \cdot \Delta k_2, \quad (11)$$

(9),(10)式表明,系统的容差与透镜材料的折射率有关:折射率越靠近 1,其容差能力越好;但对双半圆柱透镜而言,主要是利用高折射率对光束的压缩能力来达到准直效果的,所以系统的高容差与高准直能力之间存在着矛盾。在实际设计中,需要综合考虑这两方面的要求,在现有的加工和装配精度下使总的准直效果最好。

5 结 论

双半圆柱透镜从结构上突破了圆柱透镜在准直半导体激光光束时对透镜材料折射率范围的限制,将准直效果 $|\alpha''|_{\max}$ 提高到 0.1 mrad ,与同等准直水平的其他二次或高次曲面柱透镜相比,双半圆柱透镜更易设计和加工,所以在激光光束准直及相关领域具有更高的应用价值。但也存在一些问题,如:透镜材料在高折射率时对光的吸收增加、出射光束光斑尺寸随小半圆柱半径 r_1 的增大而增大、折射率较高时系统的容差较低等等,这无疑会限制双半圆柱透镜的广泛使用,因此需要作进一步的研究和改进。

参 考 文 献

- 1 Ji Xiaoling, Lü Baida. Effect of spherically aberrated lens on beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):347~350
季小玲,吕百达. 球差透镜对高斯光束质量的影响[J]. 中国激光, 2001, **A28**(4):347~350
- 2 Liang Yiping, Dai Teli. Analyses about the beam of laser diode bar collimated by a cylindrical lens [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(3):26~28
梁一平,戴特力. 用圆柱透镜准直半导体激光光束的分析[J]. 激光杂志, 2004, **25**(3):26~28
- 3 Liang Yiping, Dai Teli. Improving on the collimating performance of cylindrical lens to the beam of laser diode bar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1305~1311
梁一平,戴特力. 圆柱透镜对半导体激光光束准直性能的改进[J]. 中国激光, 2004, **31**(11):1305~1311
- 4 Luo Shirong, Lü Baida, Zhang Bin. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9):1213~1216
罗时荣,吕百达,张彬. 平顶高斯光束的传输特性[J]. 光学学报, 2000, **20**(9):1213~1216
- 5 Jia Wei, Hu Yongming, Li Mingzhong *et al.*. Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):939~942
贾伟,胡永明,李明中等. 空心透镜导管的模拟与设计[J]. 中国激光, 2004, **31**(8):939~942
- 6 Zhang Xiangdong, Wang Xiaofang. Analysis of propagation of light in fiber media [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):29~32
张向东,王晓方. 光在纤维介质中传播的研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(1):29~32
- 7 Hao Peiming, Wang Peng, Wang Zhanshan *et al.*. Lens design for high power and wide-aperture beam expander [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):494~496
郝沛明,王鹏,王占山等. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(6):494~496
- 8 Xu Xueke, Tang Zhaosheng, Fan Zhengxiu *et al.*. Compression effect of angular width for polarization beam splitter under tilted incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7):881~884
徐学科,汤兆胜,范正修等. 倾斜入射时偏振分束镜的角宽压缩效应[J]. 光学学报, 2004, **24**(7):881~884
- 9 Shi Peng, Li Xiaoli, Zhang Guifen *et al.*. Micro-prism stack beam shaper for high power laser diode array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(11):1544~1547
石鹏,李小利,张贵芬等. 大功率激光二极管的微片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出[J]. 光学学报, 2000, **20**(11):1544~1547