

共轴双半椭圆柱透镜准直半导体激光光束特性研究

高全华¹, 曾晓东²

(1. 长安大学理学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要:基于光线传输理论对椭圆柱透镜及共轴双半椭圆柱透镜准直半导体激光光束的特性进行了研究。结果表明:这两种柱透镜的准直效率随折射率的变化不大,这在一定程度上提高了透镜材料选择的灵活性;并且理论上,共轴双半椭圆柱透镜可以将半导体激光光束快轴方向的发散角压缩到0.1 mrad量级。

关键词:半导体激光器;共轴双半椭圆柱透镜;准直;光线追迹

中图分类号:0435.1 **文献标识码:**A

Study on collimating characteristic of coaxial double half-ellipse lens

GAO Quan-hua¹, ZENG Xiao-dong²

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Using ray-tracing method, the performance of the ellipse lens and the coaxial double half-ellipse lens (CD-HEL) used to collimate laser diode beams are discussed. The numerical results indicate that the collimating performances of two lens changed little as the increasing of the refractive index and this made it possible to choose the material of the lens in more field. Theoretically, the radiation angle of laser diode beams in the quick axis can be compressed under 0.1 mrad.

Key words: laser diode; coaxial double half-ellipse lens; collimate; ray-tracing

1 引言

近年来,大功率半导体激光器的研究和应用出现了快速发展的趋势。半导体激光器效率高,体积小,可靠性好,具有很强的竞争力,但由于半导体激光器波导结构的特点,输出光波发散角大,尤其是垂直于结平面方向,这造成了应用中的瓶颈。目前,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又高效的方法^[1-5],但对于大角度光波,圆柱镜的球差又常常导致准直性能变坏,为了获得更好的准直性能,文献[3]在综合研究各种准直系统的基础上,提出了椭圆柱透镜系统的设想:共轴双半椭圆柱透镜,但该文献仅对这种透镜系统的性能

作了初步的介绍。本文深入分析研究了这两种柱透镜的准直特性,数值模拟得出了一些有用的结论,这对实际应用具有一定的指导意义。

2 光路分析及公式推导^[3]

如图1所示,透镜由两个半椭圆柱面构成,将透镜的轴线与激光器慢轴平行,快轴方向的发散光束可以入射到一个半椭圆柱面,经两次折射后,在另一个半椭圆柱面上出射而得到在快轴方向发散角被压缩的准直光束。

作者简介:高全华(1976-),女,硕士,讲师,主要从事半导体激光光束整形研究。E-mail:gaoquanhua@yahoo.com.cn

收稿日期:2009-02-23

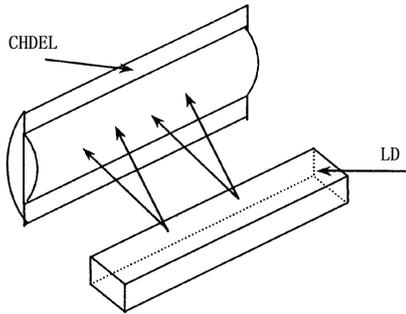


图1 共轴双半椭圆柱透镜结构示意图

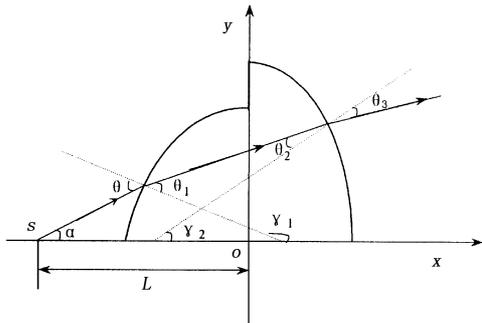


图2 共轴双半椭圆柱透镜光路示意图

半导体激光器有源区在快轴方向的厚度很小,约为 $1\ \mu\text{m}$,故而沿慢轴方向可近似看作线光源。由于光束沿传播方向具有对称性,所以只需考虑上半部分的光线即可。图2是共轴双半椭圆柱透镜横截面上半部分的光路示意图。图中, o 为两半凸半椭圆柱透镜的轴心线位置; s 是光源位置; x 表示光轴方向; a_1, a_2 和 b_1, b_2 分别表示左、右半椭圆柱透镜的两个半轴; L 是左半椭圆柱透镜轴心到光源的距离; α, β 和 μ 分别为入射光线、出射光线和折射光线与 x 轴的夹角; θ 和 θ_1 分别为光线在左半椭圆柱面上的入射角和折射角; θ_2 和 θ_3 分别为光线在右半椭圆柱面上的入射角和折射角; γ_1, γ_2 为对应点法线与 x 轴的夹角。当倾角为 α 的光线入射到透镜上,经两次折射后以倾角 β 在右半椭圆柱面出射,根据几何关系和光线光学知识,可以得到 β 的表达式,即:

$$\theta = \alpha - \arctan\left(\frac{a_1^2}{b_1^2} \times \frac{y_1}{x_1}\right) \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin\theta\right) \quad (2)$$

$$\gamma_1 = \pi + \arctan\left(\frac{a_1^2}{b_1^2} \times \frac{y_1}{x_1}\right) \quad (3)$$

$$\mu = \theta_2 + \arctan\left(\frac{a_1^2}{b_1^2} \times \frac{y_1}{x_1}\right) \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \arctan\left(\frac{a_2^2}{b_2^2} \times \frac{y_2}{x_2}\right) \quad (5)$$

$$\theta_2 = \gamma_2 - \mu \quad (6)$$

$$\theta_3 = \arcsin(n \times \sin\theta_2) \quad (7)$$

$$\beta = \gamma_2 - \theta_3 \quad (8)$$

其中, (x_1, y_1) 是入射线与左半椭圆的交点,由下面的方程组确定:

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} = 1 \quad (9)$$

$$y = x \tan\alpha + L \tan\alpha \quad (10)$$

(x_2, y_2) 是折射线与右半椭圆的交点,由下面的方程组确定:

$$\frac{x^2}{a_2^2} + \frac{y^2}{b_2^2} = 1 \quad (11)$$

$$y = x \tan\mu + y_1 - x_1 \tan\mu \quad (12)$$

当 a_1, b_1, a_2, b_2, d 分别取不同值时,分别表示不同的柱透镜准直半导体激光光束的光路公式:

1) 当 $a_1 = b_1 = a_2 = b_2$ 时,即为普通圆柱透镜;

2) 当 $a_1 = a_2 \neq b_1 = b_2$ 时,即为椭圆柱透镜;

3) 当 $a_1 \neq b_1, a_2 \neq b_2$ 时,即为共轴双半椭圆柱透镜。

3 两种柱透镜准直效果比较

文献[3]对提出的椭圆柱透镜准直性能进行了简单的研究,给出了折射率为1.52时的光束准直情况,并给出了 $n < 2$ 时材料的折射率对准直效果的影响,认为在取折射率时并不一定是越大越好,而是在不同参数下要取相应的值。对于椭圆柱透镜的结构特性,用参数 $k_1 = \frac{l}{a}, f_1 = \frac{a}{b}$ 来描述;准直特性仍用参数 $|\beta|_{\max}/\text{mrad}$ 描述。在文献[3]中,只是提出了共轴双半椭圆柱透镜,而对其准直特性并没有进行研究。对于共轴双半椭圆柱透镜的结构特性,用参数 $k_1 = \frac{l}{a_1}, k_2 = \frac{l}{a_2}, f_1 = \frac{a_1}{b_1}, f_2 = \frac{a_2}{b_2}$ 来描述;准直特性也用参数 $|\beta|_{\max}/\text{mrad}$ 描述。表1给出了三种柱透镜在特定的折射率情况下,在最佳准直条件下的准直效果。

从表1可以看出,对于圆柱透镜,当 $n > 2$ 时, $|\beta|_{\max}/\text{mrad}$ 随着 n 的增大而迅速增大;对于椭圆柱透镜和共轴半椭圆柱透镜, $|\beta|_{\max}/\text{mrad}$ 随着折射率的变化都不大,且共轴半椭圆柱透镜比椭圆柱透镜的准直性能更优,准直效果提高了一个量级,达到了0.1 mrad量级。由于这两种透镜准直性能对材料的折射率不敏感,故而在实际应用中可以根据具体要求选取器件材料,使得器件材料的选取具有更大的灵活性。

表1 不同折射率不同结构柱透镜的准直比较

refractive index <i>n</i>	cylindrical lens		ellipse lens			coaxial double half-ellipse lens				
	$k_1 = k_2$	$ \beta _{\max} / \text{mrad}$	k_1	f_1	$ \beta _{\max} / \text{mrad}$	k_1	k_2	f_1	f_2	$ \beta _{\max} / \text{mrad}$
1.52	1.39	5.90	1.05	1.17	3.20	1.03	0.76	1.00	1.28	1.01
1.77	1.12	3.30	1.03	1.05	2.60	1.03	0.68	1.96	1.16	0.65
1.85	1.07	2.00	1.05	1.01	2.00	1.02	0.60	1.96	1.16	0.49
2.00	1.00	5.40	1.01	0.99	2.10	1.03	0.68	1.96	1.08	0.62
2.25	1.00	43.9	1.02	0.93	2.50	1.02	0.64	1.68	1.04	0.41
2.30	1.00	50.5	1.01	0.93	1.37	1.03	0.60	1.92	1.04	0.38
2.60	1.00	85.2	1.01	0.89	1.83	1.02	0.60	1.00	1.00	0.39
3.50	1.00	153.3	1.12	0.74	2.34	1.03	1.08	1.24	0.80	0.69

4 两种柱透镜光斑尺寸比较

在实际应用中,透镜准直后的光斑尺寸是必须考虑的又一重要问题。根据前面的分析,知道倾角为 α 的光线在半椭圆面上出射处距 x 轴的距离为 y_2 , $|y_2|_{\max}$ 就是系统的出射光斑半径,而 $|y_2|_{\max}$ 是依赖于柱透镜的结构。图3是在透镜准直性能最佳的、不同折射率的情况下对两种透镜准直后,光斑尺寸的比较。

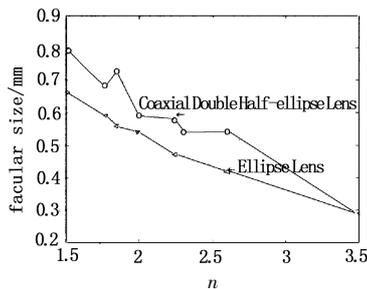


图3 两种透镜光斑尺寸比较

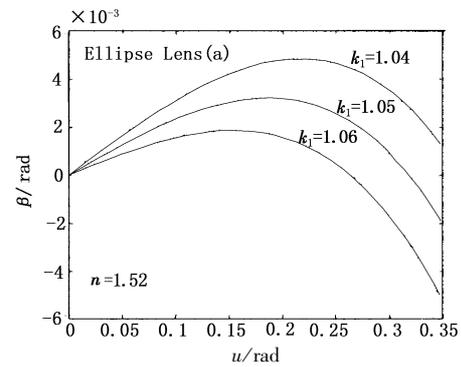
从图3中可以看出,在准直性能最佳的情况下,共轴双半椭圆柱透镜光斑尺寸比椭圆柱透镜稍大。可见,准直效果的提高是以增大光斑尺寸为代价的,两种柱透镜各有优势。

5 位置容差

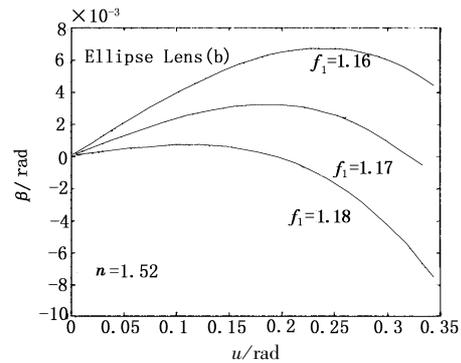
透镜系统的稳定性是实际应用和设计中都必须考虑的又一重要问题。在制作透镜的过程中,总不可避免地存在这样或那样的误差,这对透镜准直性能的影响程度,就是所谓的透镜

系统的位置容差问题。一般而言,容差越大,系统对加工或装配的精度越不敏感,系统的稳定性就越好。同样是在准直效果最佳的情况下,对于椭圆柱透镜系统及共轴双半椭圆柱透镜系统,由于坐标 (x_1, y_1) 及 (x_2, y_2) 中也包含着描述系统结构的参量,故而对位置容差进行理论分析比较困难。这里仅用数值模拟的方法进行简要的分析。

先研究椭圆柱透镜系统的稳定性,仅改变一个参数而其他参数不变,来看透镜系统的准直效率的变化情况。图4(a)、图4(b)分别表示仅改变参数 k_1 或 f_1 而其他参数不变时 ($n = 1.52$),透镜系统准直性能的变化情况。表2给出了 n 为其他值时,参



(a) 改变 k_1



(b) 改变 f_1

图4 各参数对系统准直性能的影响

表2 不同折射率时各参数对准直性能的影响

n	$ \beta _{\max} / \text{mrad}$	$k_1 (\pm 0.01)$	$f_1 (\pm 0.01)$	$ \beta _{\max} / \text{mrad}$ Optimal parameter	$ \beta _{\max} / \text{mrad}$ Departure from optimal parameter	$ \beta _{\max} / \text{mrad}$ Departure from optimal parameter
1.77	6.08	9.34	2.60	3.48	6.74	
	3.33	5.50				0.73
1.85	5.20	8.41	2.00	3.20	6.41	
	3.95	6.21				1.95
2.25	3.03	6.18	2.50	0.53	3.68	
	5.60	8.48				3.10
2.30	4.72	7.90	1.37	3.35	6.53	
	4.22	7.00				2.85

数 k_1, f_1 对透镜系统的影响情况。从图中可见, f_1 对透镜系统的影响较大, k_1 对透镜系统的影响较小; 从表 2 中可见, 随着 n 的增大, 各参数对透镜系统的影响也增大, 并且, 参数对系统的影响出现了不对称性。

再看共轴双半椭圆柱透镜系统, 与上面的方法类似, 仅改变一个参数而其他参数不变, 来看透镜系统的准直效率有怎样的变化。图 5(a) ~ (d) 分别表示仅改变参数 k_1 或 k_2 或 f_1 或 f_2 而其他参数不变时 ($n = 1.52$), 透镜系统准直性能的变化情况。

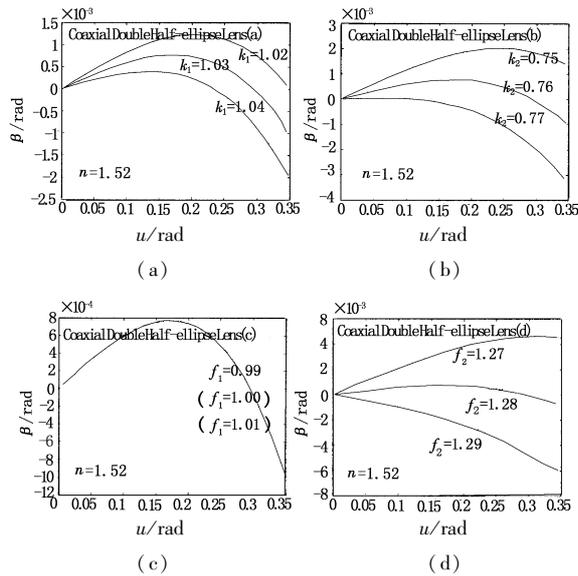


图 5 各参数对系统准直性能的影响

表 3 不同折射率时各参数对准直效率的影响

n	$k_1 (\pm 0.01)$	$k_2 (\pm 0.01)$	$f_1 (\pm 0.01)$	$f_2 (\pm 0.01)$
1.77	1.82	2.27	0.65	5.73
	1.59	2.00	0.66	5.20
1.85	1.41	2.03	0.49	5.49
	1.61	2.30	0.50	5.70
2.25	2.53	2.45	0.41	6.60
	1.76	1.78	0.42	5.72
2.30	2.88	2.30	0.39	6.00
	2.05	1.68	0.39	5.20

从图中可以看出, f_1 对系统的影响最小, 而 f_2 对系统的影响最大, k_1 和 k_2 对系统的影响程度类似。表 3 给出了 n 为其他值时, 各参数对透镜系统的影响情况。从表 3 可见, 对于各种折射率的透镜系统, 参数 f_1 对系统稳定性的影响最小, f_2 影响最大。随着折射率的增大, 系统稳定性对各参数的依赖也随着增大。

6 结 论

以光线追迹理论为基础, 对椭圆柱透镜系统及共轴双半椭圆柱透镜系统的准直特性进行了比较深入的分析。结果表明: 这两种透镜系统的准直效率随材料折射率的变化不大, 这提高了在选择透镜材料时的灵活性; 并且理论上, 共轴双半椭圆柱透镜可以将半导体激光光束快轴方向的发散角压缩到 0.1 mrad 量级; 在准直效率相当的情况下, 共轴双半椭圆柱透镜系统的光斑尺寸比椭圆柱透镜系统稍大。这些结果无论对于理论研究还是实际应用都具有一定的指导意义。当然, 在实际应用中严格的椭圆面是不易加工的, 可以用分段折线近似代替椭圆, 既可以大大降低加工的难度, 又可很好地保证准直性能。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马华, 曾晓东. 双半圆柱透镜准直半导体激光光束[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 937-940.
- [3] 周睿. 半导体激光器光束准直技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [4] 马华, 曾晓东. 异轴双半圆柱透镜准直半导体激光光束[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 281-481.
- [5] 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.