双曲柱面-平面透镜准直的误差分析*

罗亚梅[1,2],梁一平[1],熊玲玲[1]
(1. 重庆师范大学 物理学与信息技术学院,重庆 400047;2. 泸州医学院 现代教育技术部,四川 泸州 646000)

摘 要 根据光线传播基本原理,通过计算和推导,用解析式表达并讨论了半导体激光器快轴方向发散光束通过有偏心率误差的双曲柱面-平面透镜后的准直效果,为正确认识、纠正误差,尽可能发挥双曲柱面-平面透镜的准直作用,改善半导体激光快轴方向光束的发散,提高光束质量提供了理论依据。

关键词 半导体激光器;双曲柱面-平面透镜;准直;误差分析
中图分类号 O435 **文献标识码** A **文章编号** 1672-6693(2006)04-0058-03

The Error Analysis of Collimation of Hyperboloid Cylinder-plane Lens

LUO Ya-mei[1,2], *LIANG Yi-ping*[1], *XIONG Ling-ling*[1]
(1. College of Physics and Information Techonology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047;
2. Dept. of the Modern Education Computer Center of Technology, Luzhou Medical College, Luzhou Sichuan 646000,China)

Abstract: According to the basic principle of light-ray propagation, through calculations and deduction,the collimating effects of semiconductor laser in fast axis direction of hyperboloid cylinder-plane with eccentricity error are analytically showed and discussed. The consequence in this paper may be used to design a collimating system with micro- hyperboloid cylinder-plane lens that will considerably decrease the diverging angle of diode laser in fast axis and will be build up high quality beam.

Key words: semiconductor laser; hyperboloid cylinder-plane lens; collimation; error analysis

从理论分析知道[1~4],对于可视为沿慢轴方向延伸的线光源激光二极管条,如果用一个偏心率严格等于材料相对折射率的双曲柱面-平面透镜对其快轴方向的发散光束进行准直,在准确满足理论要求的安装条件下,应该能得到良好的准直效果。但在实际运用双曲柱面-平面透镜的过程中却往往达不到理想的准直效果,原因在于实际制作的透镜本身和透镜在光路中的位置都可能存在各种相对于理论要求的偏差[5,6]。由于安装位置引起的偏差可以通过精细调节光路来解决,而透镜本身透光面相对理论曲面的偏差则是制作工艺所引起的,必须在工艺过程中纠正。实践表明,在双曲柱面-平面透镜的制作过程中,最容易产生也最难于掌握的是双曲柱面的偏心率对透镜材料相对折射率的偏离。本文拟对双曲柱面偏心率误差给双曲柱面-平面透镜准直性能带来的影响作出详细的分析,以便根据实际准直效果对误差的性质、大小等作出判断和相应的修正。

1 偏心率误差对双曲折射面准直性能的影响

图 1 为双曲折射面准直线光源光束的光路剖面图。图中,双曲折射面的偏心率为 e,Z 为主光轴,双曲面的焦点 O 到其顶点的距离为 ρ_0。

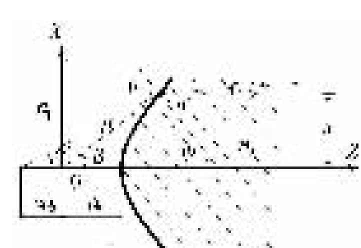

图 1 光束经过双曲柱面 - 平面透镜的准直图

* 收稿日期:2006-04-05
资助项目:重庆市科技攻关项目(No. 8180)
作者简介:罗亚梅(1978-),女,四川自贡人,助教,硕士研究生,研究方向为光学工程。

双曲面在此剖面上以 O 为原点,Z 为极轴的平面极坐标方程为

$$\rho = \frac{(e-1)\rho_0}{e\cos\beta - 1} \tag{1}$$

双曲面左边介质折射率为 n_1,右边介质折射率为 n_2,相对折射率 $n = \frac{n_2}{n_1} > 1$。位于 Z 轴上双曲面的焦点 O 左方 $S(SO = a\rho_0)$ 可视为线光源的激光二极管条,发出倾角为 α 的光线,经折射后与主轴有一夹角 α',且在双曲面上的入射角为 θ,折射角为 θ'。双曲线在折射点的法线与 Z 轴的交角为 ϕ。根据解析几何理论知道,ϕ 应满足

$$\tan\phi = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x} \tag{2}$$

再根据极坐标与直角坐标的关系 $z = \rho\cos\beta$,$x = \rho\sin\beta$,并联合(1)、(2)式可得

$$\phi = \arctan\frac{\sin\beta}{e - \cos\beta} \tag{3}$$

由三角关系

$$\frac{\sin\alpha}{\rho} = \frac{\sin(\beta-\alpha)}{a\rho_0} \tag{4}$$

联合(1)、(4)式,求得 $\cos\beta$ 和 $\sin\beta$ 的表达式,并展开成 α 的幂级数,保留到 α^3 项,则有

$$\cos\beta \approx 1 - \frac{(a+1)^2}{2}\alpha^2,$$

$$\sin\beta \approx (a+1)\alpha + \left[\frac{a+1}{3} - \frac{(ea+e-1)(a+1)^2}{2(e-1)}\right]\alpha^3$$

将以上两式代入(3)式,经计算将 ϕ 展开成 α 的幂级数,保留到 α^3 项,可得

$$\phi \approx \left(\frac{a+1}{e-1}\right)\alpha + \left[\frac{a+1}{3(e-1)} - \frac{a(a+1)^3}{2(e-1)} + \frac{(a+1)^2}{2(e-1)^2} - \frac{(a+1)^3}{3(e-1)^3}\right]\alpha^3 \tag{5}$$

根据折射定律

$$\sin\theta = n\sin\theta' \tag{6}$$

由图的三角关系

$$\theta = \alpha + \phi,\ \theta' = \alpha' + \phi' \tag{7}$$

联立(6)、(7)式并根据 $\sin x$ 和 $\arcsin x$ 的幂级数展开式,得

$$\alpha' \approx \frac{1}{n}\left[(\alpha+\phi) - \frac{1}{6}(\alpha+\phi)^3\right] + \frac{1}{6n^3}(\alpha+\phi) - \phi \tag{8}$$

把(5)式代入(8)式并保留到 α^3,可得

$$\alpha' = A\alpha - B\alpha^3 \tag{9}$$

式中

$$A = \left[\frac{\triangle - (n-1)a}{n(n-1)}\right]\left(1 - \frac{\triangle}{n-1}\right)$$

$$B = \frac{n-1}{6n^3(n-1+\triangle)}\{(n+\triangle)[(n+1)(n+\triangle)^2 - n^2(n+1+\triangle)] + [3(n+1)(n+\triangle)^2 - n^2(7(n+\triangle)^2 - 2(n+\triangle)+1)]a + 3(n+\triangle)[n+1-n^2(3n-1+3\triangle)]a^2 + [n+1-n^2(3(n+\triangle)^2-1)]a^3\} \tag{10}$$

其中 $\triangle = e - n$。

由(9)式可见,如果 $e = n$,即 $\triangle = 0$,且 $\alpha = 0$,则有 $A = B = 0$,这时 $\alpha' = 0$,表示当双曲面偏心率严格与相对折射率相等,且线光源恰好位于双曲柱面的焦线上时,折射光是理想的平行光[7]。事实上,在这种条件下,α' 展开成 α 的幂级数式中的每一项系数都为 0,$\alpha' = 0$ 是严格的,这也是双曲折射面具有理想准直效果的理论依据。由于实际制作双曲柱面透镜存在偏心率误差,半导体激光在快轴方向又有较大的发散角(至少 α^3 不能略去)。(9)式表明,这种情况下的双曲柱面透镜相当于一个球差透镜,不能达到理想双曲柱面透镜的准直效果,只能在参数 $\triangle$ 和 a 容许范围内调整,尽量减小出射光束的发散角。下面讨论在 α' 的展开式满足一次项为 0(即 $A = 0$)情况下,α' 与 $\triangle$ 的关系。

在(9)式中,令 $A = 0$,即线光源位于透镜的近轴光学焦点处,可解出

$$a = \frac{\triangle}{n-1} \neq 0 \tag{11}$$

可见这种情况下双曲柱面透镜的近轴光学焦点与双曲柱面的几何焦点并不重合,偏离量由(11)式确定。相应的由(9)式得

$$\alpha' = -B\alpha^3 \tag{12}$$

由此可知,虽然线光源安置于透镜的近轴光学焦点消去了一次发散,但是由于 $B \neq 0$,出射光束的 3 次发散总是存在(除 $\alpha = 0$ 的光线外)。设半导体激光光束快轴方向发散的半角宽为 α_M,在调试安置得最好的情况下,出射光束的远场发散半角宽也有 $\alpha'_M = |-B\alpha_M^3|$。

(9)式还说明,出射光线的倾角是入射光线倾角的单调函数,其值与 B 的值相关。将(11)式代入(10)式可得

$$B = \frac{n-1}{6n^3(n-1+\Delta)}\left\{\frac{(n+\Delta)(n-1)}{(n-1)}[(n+1)(n+\Delta)^2 - n^2(n+1+\Delta)] + [3(n+1)(n+\Delta)^2 - n^2(7(n+\Delta)^2 - 2(n+\Delta)+1)]\frac{\Delta}{n-1} + 3(n+\Delta)[n+1-\right.$$

$n^2(3n-1+3\Delta)]\dfrac{\Delta^2}{(n-1)^2}+[n+1-n^2(3(n+\Delta)^2-1)]\dfrac{\Delta^3}{(n-1)^3}\Big\}\approx-\dfrac{(n-1)(5n^2-1)\Delta}{6n^2(n-1+\Delta)}$　(13)

上式最后一步是考虑到 Δ 很小,而在分子部分只保留到其一次项的结果。

从上述分析可知,如果当实际磨制出透镜的偏心率与相对折射率有一定偏差时,应把激光二极管阵列置于近轴光学焦点上,满足 $a=\dfrac{\Delta}{n-1}$,即此时应放置在 $\rho'_0=\rho_0(1+a)$ 处。结合(12)、(13)式的结果可得出关于偏心率误差影响的下列结论。

1)当双曲柱面的偏心率 e 相对 n 偏小时,$\Delta<0$,$a<0$,在这种情况下对半导体激光二级管光束准直达到最小发散角时,二极管线阵安放的位置相对理论值 ρ_0 要小,即位置距离双曲柱面透镜要近一些。同时由于 $B>0$,由(9)式知,输入光束经过双曲柱面折射后,出射光束一开始就为发散光束,其发散半角宽为 $\alpha'_M=|-B\alpha^3|$。

2)当双曲柱面的偏心率 e 相对 n 偏大时,$\Delta>0$,$a>0$,说明半导体激光二级管光束准直达到最小发散角时,二极管线阵安放的位置相对理论值 ρ_0 要大,即位置距离双曲柱面透镜要远一些。同时由于 $B<0$,且 $\alpha'=-B\alpha^3$,输入光束经过双曲柱面透镜后,出射光束先汇聚再发散,其发散半角宽为 $\alpha'_M=|-B\alpha^3|$。

上述结论为从实际准直效果反过来判断偏心率误差的性质和大小提供依据。

2　准直指标对偏心率允许误差要求

在实际运用中,往往要根据运用目的对准直指标预先提出要求,即对所允许的 α'_M 大小有一定限制。从上述结论也可以得出制作透镜时的偏心率与相对折射率的允许偏差。假设光束的发散半角宽 $\alpha_M=40°$,相对折射率 $n=1.510\ 565\ 945$,由(13)式可计算出不同 α'_M 的 Δ,进而算出 a 的大小。

若 $\alpha'_M=1°$,$\Delta=\pm1.5625\times10^{-5}$,$a=\pm3.0603\times10^{-5}$;

若 $\alpha'_M=2°$,$\Delta=\pm3.125\times10^{-5}$,$a=\pm6.1207\times10^{-5}$;

若 $\alpha'_M=4°$,$\Delta=\pm6.25\times10^{-5}$,$a=\pm1.2241\times10^{-4}$;

若 $\alpha'_M=10°$,$\Delta=\pm1.5625\times10^{-4}$,$a=\pm3.0603\times10^{-4}$;

假设再给定 ρ_0,就可以算出激光二极管所应放置的位置。由以上例子可以看出要使准直效果好,则要求偏心率允许误差非常小。

参考文献:

[1] 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.

[2] 戴特力. 半导体激光二极管泵浦全固态激光器[M]. 成都:四川大学出版社,1993.

[3] 杨石泉,李朝晖,丁镭. 由 LD 和高双折射光纤环镜构成的可调谐锁模光纤激光器[J]. 中国激光,2003,30(2):106-108.

[4] 梁一平,戴特力. 双曲线和椭圆焦点的光学意义[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2004,21(3):26-28.

[5] 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,2001,28(4):347-350.

[6] 李琦,王骐,高惠德. 输入光束光斑半径变化对 BOE 整形环的影响[J]. 激光技术,2002,26(1):35-37.

[7] 熊玲玲,罗亚梅,梁一平. 双曲柱面-平面透镜对半导体激光束的准直性能[J]. 激光杂志,2006,27(2):33-35.

(责任编辑　欧红叶)