

文章编号:1001-5078(2007)09-0818-03

多波长透射式扩束器设计

吴金才,陈结祥,张毅,戚俊,涂碧海,赵平建,王相京
(中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

摘要:从像差理论出发,通过实例介绍了扩束器的具体设计过程,并给出了物镜通光口径为200mm、焦距400mm、视场为2mrad、放大倍率为40倍和主工作波长为0.6328 μm 的扩束器结构参量,通过改变目镜与物镜间距还可以对波长0.532 μm 和1.064 μm 的激光进行同倍率的扩束,在应用时不必重新设计扩束器或目镜系统即可以对这三种波长进行扩束,使用方便,也节约成本。

关键词:光学设计;多波长激光扩束器;像差理论;非球面

中图分类号:O435.2

文献标识码:B

Design of Transmitting Beam Expander for Different Waves

WU Jin-cai, CHEN Jie-xiang, ZHANG Yi, QI Jun, TU Bi-hai, ZHAO Ping-jian, WANG Xiang-jing
(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on aberration theory, the design method of beam expander is detailed through an example. A beam expander is presented; the entrance pupil diameter of its objective is 200mm, focal length is 400mm, the field of view is 2mrad, the magnification ratio is 40 and the primary working wavelength is 0.6328 μm . The results of optical design have been given. When the distances between the objective and eyepiece are adjusted reasonably, the beam expander can be also used laser with wavelengths of 0.532 μm or 1.064 μm with the same magnification ratio. It is no use to design new beam expander systems or eyepiece systems for these 3 waves. It can be used easily and save a lot of costs.

Key words: optical design; laser beam expander for different waves; aberration theory; aspheric surface

1 引言

激光扩束器在激光雷达、激光测距与光通讯等领域中有着十分广泛的应用。在激光发射系统中,为了增大作用距离,就要提高发射系统的精度,利用扩束器来压缩空间发散角即可,扩束器的倍率越高,发射系统的精度也越高。由于扩束器的设计、加工和装配所花费的成本较高,就有必要设计应用于多波长的扩束器。本文设计出主波长为 $\lambda_2 = 0.6328\mu\text{m}$,放大倍率 $\Gamma = 40$,发散角 $\alpha = 2\text{mrad}$,通光

口径为 $\Phi_0 = 200\text{mm}$,相对口径 $\frac{\Phi_0}{f'} = \frac{1}{2}$ 的扩束器,精度达到轴外波像差优于 $\frac{\lambda}{5}$,轴上波像差优于 $\frac{\lambda}{10}$,改变

目镜和物镜间距即可对波长为 $\lambda_1 = 0.532\mu\text{m}$ 和 $\lambda_3 = 1.064\mu\text{m}$ 的激光进行同倍率扩束,精度也达到同样要求。

2 光学系统设计

考虑到减小扩束器的体积和质量,采用了伽里略型扩束器,初始结构的确定按照主波长 $\lambda_2 = 0.6328\mu\text{m}$ 来进行计算,整个设计过程包括物镜设计、目镜设计以及目镜与扩束器设计,具体设计步骤如下。

作者简介:吴金才(1983-),男,中国科学院安徽光学精密机械研究所在读硕士研究生,主要从事光学设计与光学检验方面的工作。
E-mail: wjc609@sohu.com

收稿日期:2007-03-02;修订日期:2007-04-02

2.1 物镜设计

由于系统的通光口径与相对口径都比较大,采用球面光学系统是难以满足设计指标要求的,所以本文采用非球面系统,另外再加上一个球面透镜构成双透镜结构即可以满足物镜设计要求。设计方法如下:采用等偏角的原则求解结构参数,为了加工方便,对于非球面镜我们采用平凸镜的结构,系统在归一化的条件下满足:

$$\begin{aligned} h &= h_1 = h_2 & f' &= 1 \\ \phi &= \phi_1 = \phi_2 = 0.5 & J &= 1 \end{aligned}$$

其中, h 为系统口径半高度; f 为系统焦距; ϕ 为系统光焦度; J 为拉格朗日不变量。初级球差 S_1 为:

$$S_1 = h_1^4 \phi_1^3 P_1 + h_2^4 \phi_2^3 P_2 + h_1^4 K_1 \quad (1)$$

其中, ϕ_1, ϕ_2, h_1, h_2 和 P_1, P_2 分别为非球面镜和球面镜的光焦度半口径高度(取 $h_1 = h_2$) 和基本像差参量(与形状系数 Q 有关); K_1 为非球面引起的像差,且 $K_1 = -\frac{e_1^2(n-1)}{r_1^3}$, 要消除球差,要求 $S_1 = 0$, 则:

$$e_1^2 = \frac{\phi^3 r_1^3 (P_1 + P_2)}{(n-1)} \quad (2)$$

由于非球面镜采用平凸镜形式,有 $Q_1 = -1$, 按照等偏角和球差极小值原则得出曲率半径 $\rho (\rho = \frac{1}{r})$:

$$\rho_1 = Q_1 + \frac{n_1}{n_1 - 1} = \frac{1}{n_1 - 1}; \quad \rho_2 = Q_1 + 1 = 0 \quad (3)$$

由双分离透镜 P^∞, W^∞ 像差参量公式可以推导出球差最小时 $Q_2 = \frac{4n_2^2 - 3n_2 - 4}{2(n_2 + 2)(n_2 - 1)}$, 则有:

$$\rho_3 = Q_2 + \frac{n_2}{n_2 - 1}; \quad \rho_4 = Q_2 + 1 \quad (4)$$

根据玻璃的供应情况以及考虑到成本问题,物镜的材料都选用 K9 玻璃,即有 $n_1 = n_2 = n$, 折射率 n 确定后,根据公式(3)和(4),求出形状系数 Q , 从而求得半径 r 。再根据 Q 求解系统的 P^∞ :

$$P^\infty = P_1 + P_2 = A_1 Q_1^2 + B_1 Q_1 + A_2 Q_2^2 + B_2 Q_2 + C \quad (5)$$

式中, $A_1 = \phi^3 \frac{n_1 + 2}{n_1}; A_2 = \phi^3 \frac{n_2 + 2}{n_2}; B_1 = \phi^3 \frac{3}{n_1 - 1}$

$$B_2 = \phi^3 \frac{3}{n_2 - 1} - 4\phi^3 \frac{n_2 + 1}{n_2};$$

$$C = \phi_1^3 \frac{n_1}{(n_1 - 1)^2} + \phi_2^3 \frac{n_2}{(n_2 - 1)^2} - \phi_1 \phi_2^2 \left(\frac{4}{n_2 - 1} + \right.$$

$$\left. 4\phi_1^2 \phi_2 \left(3 + \frac{2}{n_2} \right) \right)$$

将已知量代入公式(2)求解二次曲面的偏心率 e_1^2 。在归一化参数的基础上将半径放大到实际要求的大小($r_{\text{实际}} = \frac{f'}{\rho} = f' r$), 再将透镜合理加厚, 进行光线追迹和像差平衡来完成物镜初始设计。

2.2 目镜设计

由设计要求可知: 物镜的通光口径 $\Phi_0 = 200\text{mm}$, 焦距 $f' = 400\text{mm}$, 视场角 $2\omega = 2\text{mrad}$ 。由于放大倍率 $\Gamma = 40$, 则目镜参数要求如下: 通光口径 $\Phi = 5\text{mm}$, 焦距 $f' = -10\text{mm}$, 视场角 $2\omega = 80\text{mrad}$ 。孔径光阑位于物镜上, 目镜的设计与物镜设计方法相似, 由于目镜的视场角比较大, 在设计时要适当的将目镜复杂化, 合理分配光焦度(通常采取等光焦度分配), 然后进行光线追迹和像差平衡, 使得达到最后设计要求。

2.3 扩束器设计

将扩束器物镜和目镜进行对接, 考虑多波长情况, 利用 ZEMAX 软件对整个扩束器进行光线追迹和像差平衡, 最终设计的扩束器系统如图 1 所示, 光学系统的结构参数如表 1 所示。

表 1 光学系统数据

Tab. 1 surface data summary

Surf	Type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Conic
OBJ	STANDARD	Infinity	Infinity		0
STO	STANDARD	334.8521	30	K9	-0.5680693
2	STANDARD	Infinity	2		0
3	STANDARD	263.429	30	K9	0
4	STANDARD	499.8808	343.3456 346.5402 352.8747	$\lambda_1 = 0.532\mu\text{m}$ $\lambda_2 = 0.6328\mu\text{m}$ $\lambda_3 = 1.064\mu\text{m}$	0
5	STANDARD	24.79794	1	K9	0
6	STANDARD	9.271951	1.5		0
7	STANDARD	-7.254867	1	ZF2	0
8	STANDARD	-7.867453	2		0
9	STANDARD	-21.12081	0.8	K9	0
10	STANDARD	-13.02099	0.3		0
11	STANDARD	8.902864	0.8	K9	0
12	STANDARD	10.82301	10		0
13	PARAXIAL	-	100		-
IMA	STANDARD	Infinity			0

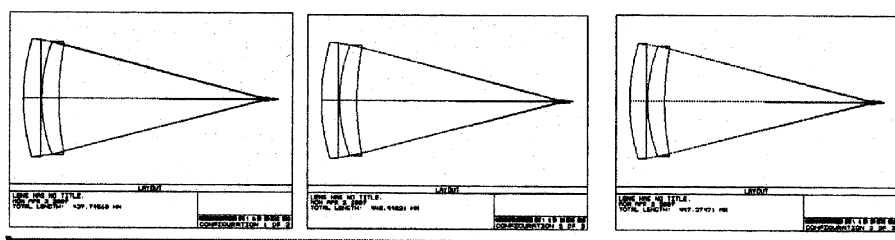
(a) $\lambda_1 = 0.532 \mu\text{m}$ (b) $\lambda_2 = 0.6328 \mu\text{m}$ (c) $\lambda_3 = 1.064 \mu\text{m}$

图1 适用于不同波长的扩束器系统

Fig. 1 optical system of the beam expander for different waves

由数据分析可知,此三个系统之间存在的唯一不同即目镜与物镜的间隔,其他的结构参数均相同,在具体使用时,只需要通过机械结构来调节目镜与物镜的间隔就可以实现对这三种不同波长的激光进行扩束,使用起来方便简洁,而且三个系统的像差都比较小,波像差均小于 $\lambda/4$,达到使用要求,系统的波前图(从 ZEMAX 中导出)如图2所示。

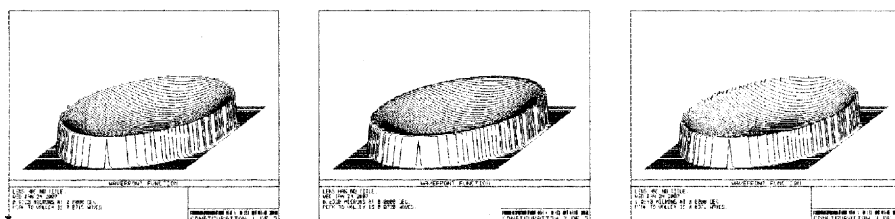
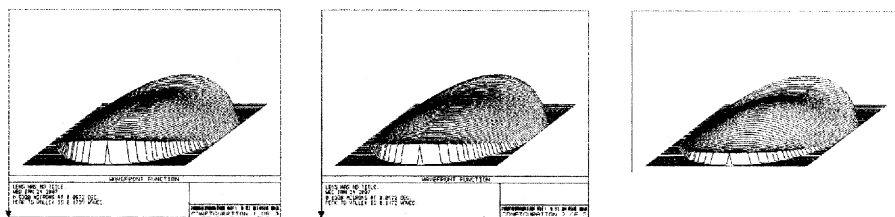
(a) $0.532 \mu\text{m}$ at 0.0000deg
peak to valley is 0.0715waves(b) $0.6328 \mu\text{m}$ at 0.0000deg
peak to valley is 0.0720waves(c) $1.064 \mu\text{m}$ at 0.0000deg
peak to valley is 0.0376waves(d) $0.532 \mu\text{m}$ at 0.0572deg
peak to valley is 0.1739waves(e) $0.6328 \mu\text{m}$ at 0.0572deg
peak to valley is 0.1472waves(f) $1.064 \mu\text{m}$ at 0.0572deg
peak to valley is 0.0899waves

图2 三种波长不同视场的波前图

Fig. 2 wavefront functions for three waves

3 结论与分析

由图2可以看出,轴上点即视场为 0deg 时波像差都优于 $\frac{\lambda}{10}$ (0.1λ),3个系统波相差分别对应为 0.0715λ , 0.0720λ , 0.0376λ , 均小于 $\frac{\lambda}{10}$, 轴外点 2mrad 即视场为 0.0572deg 时波像差都优于 $\frac{\lambda}{5}$ (0.2λ),3个系统波相差分别对应为 0.1739λ ,

0.1472λ , 0.0889λ , 均小于 $\frac{\lambda}{5}$, 已经达到了设计的要求; 而对于波长 $\lambda_3 = 1.064 \mu\text{m}$ 系统轴上点波像差优于 $\frac{\lambda}{20}$ 且接近 $\frac{\lambda}{30}$; 轴外点波像差优于 $\frac{\lambda}{10}$, 效果比另外两系统更好, 分析发现主要原因在于系统的场曲和畸变都相对较小, 差不多只有另外两个系统的一半, 所以效果更好些。如果合理分配光焦度, 系统效果还能进一步优化, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 郝沛明, 纪玉峰, 冯玉萍. 伽利略非球面透镜扩束器[J]. 量子电子学报, 1997, 11(4): 380-384.
- [2] 郝沛明, 王鹏, 王占山. 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.
- [3] Smith W J. Modern optical engineering [M]. New York: McGraw Hill Book Company, 2000.
- [4] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工和检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [5] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 510-535.
- [6] 胡明勇. 非球面扩束器的设计[J]. 量子电子学报, 2000, 19(5): 419-421.
- [7] Hao Peiming, Yuan Liyin, Li Weiwei, et al. Design of optical system for $\Phi 300$ laser beam expander[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(6): 850-853.
- [8] Joseph M Geary. Introduction to lens design with practical ZEMAX examples. Richmond: Willmann-Bell. Inc., 2002.