

0300 激光扩束器光学系统设计

郝沛明 袁立银 李玮玮 潘宝珠

(同济大学物理系非球面光学实验室, 上海 200433)

摘要 从三级像差理论出发, 分析伽里略 (Galilean) 和开卜勒 (Keplerian) 两种类型扩束器的轴外像差没有得到很好校正的原因. 通过合理的光路分析, 设计出一种轴上和轴外像差都得到很好校正、大口径大相对孔径、视场可增大的、光学性能优于伽里略和开卜勒扩束器的新型扩束器. 并给出了物镜通光口径为 300 mm、物镜焦距为 800 mm、视场为 4 mrad、放大倍率为 30 倍、主工作波长为 0.6328 μm 的非球面扩束器光学系统结构参量, 且进行了像质评价. 调整此扩束器目镜组中各镜片的间隔以及物镜和目镜的间隔可以使该扩束器在三个波长使用.

关键词 光学设计; 扩束器; 三级像差理论; 轴外像差

中图分类号 O439 **文献标识码** A

0 引言

扩束器中物镜的后焦点与目镜的前焦点相重合, 入射和出射的光线都是平行光, 仅是光束放大率的变化. 正因如此, 扩束器在激光传输、激光通信、激光探测和激光干涉测量等领域中得到广泛的应用. 扩束器主要有伽里略和开卜勒两种类型, 这两种类型的扩束器仅轴上像差得到校正, 轴外像差没有得到很好校正. 对于要求用单一石英光学玻璃为材料, 设计出物镜通光口径 $\phi = 300$ mm, 焦距 $f_1 = 800$ mm, 相对孔径 $A_1 = 1/2.67$, 放大率 $\times = 30$, 可换目镜分别使用三种激光器, $\lambda_1 = 0.532$ μm, 主波长 $\lambda_2 = 0.6328$ μm, $\lambda_3 = 1.064$ μm, 视场角 $2w = \pm 4$ mrad (毫弧度), 轴上波像差优于 $\lambda/20$, 轴外波像差优于 $\lambda/10$ 的扩束器, 采用这两种类型的扩束器是不可能实现的. 本文从三级像差理论出发, 分析伽里略和开卜勒型扩束器轴外像差没有得到很好校正的原因, 设计出轴上和轴外像差都得到很好校正的, 大口径、大相对孔径和视场可增大的新型扩束器.

1 设计分析

扩束器物镜的光焦度为 ϕ_1 , 目镜的光焦度为 ϕ_2 必须满足的数学表达式为

$$\begin{cases} h = h_1 \phi_1 + h_2 \phi_2 = 0 \\ h_1 / h_2 = -\phi_2 / \phi_1 \end{cases} \quad (1)$$

按薄透镜三级像差理论进行分析, 单色像差的表示式为^[1,2]

$$\begin{cases} S_1 = hP + h^4 K \\ S_2 = h_p P + jW + h^3 h_p K \\ S_3 = \frac{h_u^2}{h} P - 2j \frac{h_u}{h} W + j^2 \frac{h_u^2}{h^2} + h^2 h_p^2 K \\ S_4 = j^2 \frac{h_u^2}{h^2} - \frac{h_u^2}{h^2} \\ S_5 = \frac{h_u^3}{h^2} P + 3j \frac{h_u^2}{h^2} W + j^2 \frac{h_u}{h} (3 + \frac{1}{n}) + h h_p^3 K \\ C_1 = h^2 / \\ C_2 = h h_p / \end{cases} \quad (2)$$

式中, $K = -(n - n_1) e_1^2 / r_1^3$, 非球面位于物镜的第一面, r_1 是顶点曲率半径, n_1, n 是折射率, e_1^2 是偏心率; $h = lu = l u$ 和 $h_p = l_p u_p = l_p u_p$ 是轴上光线和主光线在透镜面上的高度, l 和 l_p 和 l_p 是轴上光线和主光线的截距, u 和 u_p 和 u_p 是轴上光线和主光线与光轴的夹角, 无和带表示透镜面前和后的有关参量, 是阿贝数. 假定光阑位于物镜上 $h_{p1} = 0$ 处; 物体位于无限远 $l_1 = \infty, u_1 = 0$. 以物镜进行规范化 $h_1 = 1, f_1 = 1, u_{p1} = -1, j = 1$.

由式(2)中的 S_4 和式(1)可以看出, 在伽里略扩束器和开卜勒扩束器中, 如图1(a)和(b), $S_4 = \phi_1 / n + \phi_2 / n_1$. 对于伽里略扩束器, $\phi_1 > 0, S_4 < 0, \phi_1 \gg \phi_2$, 产生负的像面弯曲, 所说的匹兹瓦尔面 (Petzval surface); 对于开卜勒扩束器, $\phi_1 < 0, S_4 > 0, \phi_1 \ll \phi_2$, 产生正的像面弯曲, 目镜产生的像面弯曲的绝对值都很大. 放大率越大, 目镜产生的像面弯曲也越大, 这是上述两种扩束器轴外像差不好校正的主要原因.

按上述分析设计新型扩束器, 如图 1(c), 将两种扩束器的目镜组合在一起, 重新分配光焦度, 物镜光焦度 ϕ_1 , 目镜前组光焦度 ϕ_{21} , 后组光焦度 ϕ_{22} , 满足 $S_4 = 0$ 的条件是

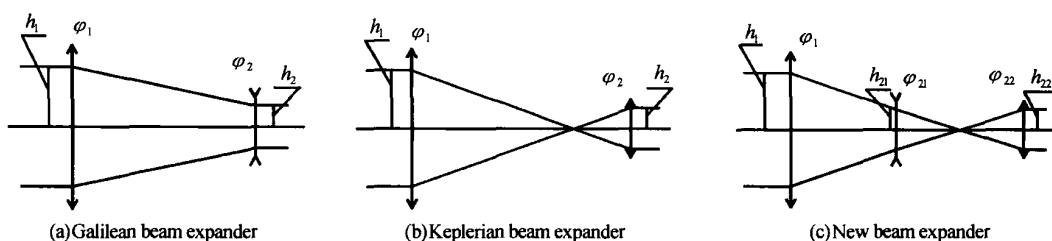


图1 扩束器类型
Fig.1 Optical systems of beam expanders

$$\begin{cases} S_4 = 1/n_1 + 1/n_2 + 1/n_3 = 0 \\ 1 + 21 + 22 = 0 \\ 21 + 22 = -1 \end{cases}$$

满足扩束器 $h = 0$ 的条件是

$$\begin{cases} h_1 + h_2 + h_3 = 0 \\ h_2 + h_3 = -1 \\ h_3 = 1/n_3 < 0 \end{cases}$$

令 $h_2 = -h_3$, 则

$$1/n_1 + 1/n_2 = -1, \quad 1/n_1 - 1/n_2 = \dots \quad (3)$$

将公式 $1/n_1 + 1/n_2 = -1$ 和 $1/n_1 - 1/n_2 = \dots$ 联立求解得出

$$\begin{cases} 1/n_1 = (-1)/2 < 0 \\ 1/n_2 = -(-1)/2 > 0 \\ 1/n_3 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2 设计方法与结果

在 $S_4 = 0$ 的前提下, 按式(3)给定 n_1, n_2, n_3 , 确定光焦度分配后, 就可以进行光学系统设计^[3-5].

2.1 物镜设计

未规化的 PW 与规化的 PW 的关系为

$$\begin{cases} P = (h)^3 P \\ W = (h)^2 W \end{cases} \quad (4)$$

物体位于无限远时, 薄透镜的弯曲 Q 与 W 、 P 的关系

$$\begin{cases} W = \frac{n+1}{n} Q + \frac{1}{n-1} \\ P = P_0 + (1 + \frac{2}{n}) [Q + \frac{3n}{2(n-1)(n+2)}] f^2 \end{cases} \quad (5)$$

物体位于有限远时, 薄透镜的弯曲 Q 与 W 、 P 的关系

$$\begin{cases} W = W_0 - (2 + \frac{1}{n}) \\ P = P_0^s + \frac{n+2}{n} [Q + \frac{3n}{2(n-1)(n+2)}] - \frac{2n+2}{n+2} f^2 \\ P_0^s = P_0 - \frac{n}{n+2} (+^2) \\ P_0 = \frac{n}{(n-1)^2} [1 - \frac{9}{4(n+2)}] \\ = \frac{\mu}{h} \end{cases} \quad (6)$$

曲率、半径的表示式为

$$\begin{cases} c_1 = Q + 1/(n-1) \\ c_2 = Q + 1 \\ n_1 = 1/c_1 \\ n_2 = 1/c_2 \end{cases} \quad (7)$$

按式(2)~(7)进行光学系统设计, 在规化条件下, $h_1 = 1, n_1 = 1, u_1 = 1, f_1 = 1$, 为了降低高级像差, 将单块透镜分为双块透镜^[6], $1 = 11 + 12 = 2, 11 = 1, 11 = 1/2$, 光焦度均分如图2. 物镜的设计方法如下:

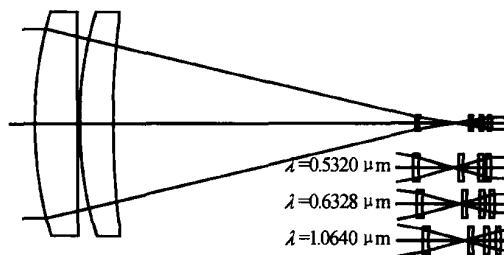


图2 光学系统
Fig.2 Optical system

1) 求解 Q_{11} : 物镜的第一块玻璃为平凸透镜, 第2面为平面, 按式(7)和式(5)有

$$c_2 = 0, Q_{11} = -1, c_1 = (2-n)/(n-1),$$

$$W_{11} = 1/(n-1) - (n+1)/n;$$

按式(2)和式(6)令 $S_2 = 0$ 得出

$$S_2 = W_{11} + W_{12} = 0, W_{11} = -W_{12},$$

$$W_{11} = 1/(n-1) - (n+1)/n;$$

2) 求解 Q_{12} : 按式(4)求解 W_{11}

$$W_{11} = (h_{11})^2 W_{11} = -W_{12},$$

$$W_{12} = (h_{12})^2 W_{12}, W_{12} = -W_{11};$$

接近轴公式求解 u_{11}

$$u_{11} = h_{12} = u_{12}, \quad 12 = h_{11}/h_{12} = 1; \text{按式}$$

(6), 已知 12 和 W_{12} , 求解 W_{12} 和 Q_{12} , 再求解 c_3 和 c_4 ;

3) 求解 e_1^2 : 按式(5)已知 Q_{11} 求解 P_{11} , 再按式(4)已知 P_{11} 求解 P_{12} ; 按式(6)已知 Q_{12} 求解 P_{12} , 再按式(4)已知 P_{12} 求解 P_{12} ; 按式(2)已知 P_{11} 和 P_{12} , 令 $S_1 = 0$ 求解 e_1^2

$$\begin{cases} S_1 = P_{11} + P_{12} - \frac{(n-1)e_1^2}{r_1^3} \\ e_1^2 = \frac{(P_{11} + P_{12})r_1^3}{n-1} \end{cases} \quad (8)$$

透镜加厚后,进行像差平衡和优化设计. 当边缘带球差 $LA_1 = 0$,残余带球差还是很大,所以将第 1 面的二次非球面改成高次非球面方程,方程式各项系数列入表 1.

4) 缩放和透镜加厚,像差平衡和优化设计:求解

r_{01} 、 r_2 、 r_3 、 r_4 和 e_1^2 、 r 值,按 $f_1 = 800$ mm 缩放并进行

表 1 光学系统结构参量

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STANDARD	Infinity	Infinity		0	0
1	STANDARD	Infinity	50		300	0
STO	STANDARD	584	61.5	Q1 - SCHOTT	300	0
3	STANDARD	Infinity	3		293.17	0
4	STANDARD	562.7	48	Q1 - SCHOTT	288.03	0
5	STANDARD	1300.2	697.3756		276.04	0
6	STANDARD	71.16	4	Q1 - SCHOTT	13.55	0
7	STANDARD	22.59	73.6029		12.10	0
8	STANDARD	Infinity	4	Q1 - SCHOTT	3.53	0
9	STANDARD	30.06	11.1754		4.13	0
10	STANDARD	-176.2	6	Q1 - SCHOTT	7.23	0
11	STANDARD	-31.9	6.4445		8.40	0
12	STANDARD	99.15	6	Q1 - SCHOTT	9.61	0
13	STANDARD	-35.486	100		10.11	0
14	PARAXIAL		100.0003		10.11	-
IMA	STANDARD	Infinity			0.00009	0

Coefficients of EVENAPH
 4th - 3.897489e-010
 6th - 8.220134e-016
 8th - 1.863387e-021

2.2 目镜设计

目镜由 z_1 和 z_2 组成,光栏在物镜上,为了校正像差,保持 z_1 负透镜,将 z_2 正透镜分成 3 个透镜,但要保持

$$\begin{aligned} z_2 &= z_{31} + z_{32} + z_{33}, h_{22} z_2 = h_{31} z_{31} + h_{32} z_{32} + \\ &h_{23} z_{33}, z_{31} < 0, z_{32} > 0, z_{33} > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

目镜的光路如图 2 中右部所示. 光焦度分配后,按式(2)~(7)求解曲率半径,缩放和透镜加厚后,进行像差平衡和优化设计,详细设计方法参阅文

献[7].

2.3 扩束器设计

以 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 为准,将设计好的物镜和目镜对接,物镜的后焦点和目镜的前焦点重合. 对于 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 的扩束器,在 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 扩束器对接好的基础上,所有的半径都不变,物镜两透镜之间的间隔也不变,利用优化设计改变目镜组之间和目镜与物镜的间隔,就会达到好的设计结果,这三种波长设计的波像差见图 3.

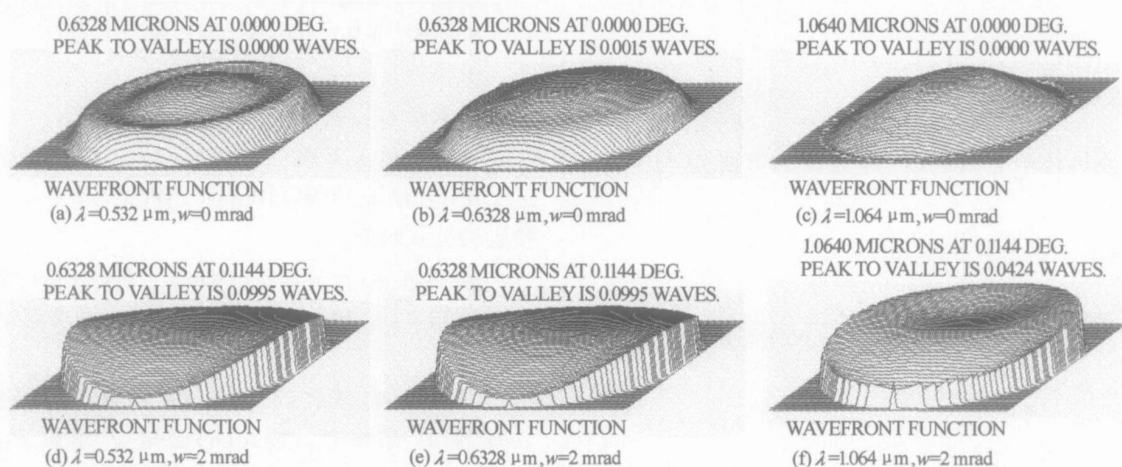


图 3 三种波长的波像差

Fig. 3 Wavefront functions

4 结论

通过设计高倍率的 $\phi 300$ mm 的扩束器可以得出结论:通过光焦度的合理分配,校正像面弯曲 $S_4 = 0$ 这是必须的,再将物镜和目镜的结构复杂化,物镜的第 1 面采用非球面,这样的光学系统设计完全可以达到设计所要求的技术指标.

参考文献

- 何宗平, 赵文才, 郝沛明. 双透镜无光焦度校正板和单一反射镜的研究. 光子学报, 2004, **33**(3): 346 ~ 349
He Z G, Zhao W C, Hao P M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 346 ~ 349
- 郝沛明, 纪玉峰, 冯玉萍. 伽利略非球面透镜扩束器. 量子电子学报, 1997, **11**(4): 380 ~ 384
Hao P M, Ji Y F, Feng Y P. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1997, **11**(4): 380 ~ 384
- 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. 中国激光, 2003, **30**(6): 494 ~ 496
Hao P M, Wang P, Wang Z S. *Chinese Journal of Laser*, 2003, **30**(6): 494 ~ 496
- 吴福田, 冯书文. 红外成像分离双透镜系统设计. 光子学报, 1996, **25**(5): 456 ~ 462
Wu F T, Feng S W. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(5): 456 ~ 462
- 白清兰, 苗兴华. 消色差的近紫外 - 可见光广角物镜设计. 光子学报, 2004, **33**(11): 1331 ~ 1335
Bai Q L, Miao X H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1331 ~ 1335
- Smith W J. *Modern Optical Engineering*. New York: McGraw Hill Book Company, 2000, 548
- Joseph M G. *Lens Design*. Richmond: Willmann-Bell, Inc., 2002, 159 ~ 165

Design of Optical System for $\phi 300$ Laser Beam Expender

Hao Peiming, Yuan Liyin, Li Weiwei, Pan Baozhu

Aspheric Optics Laboratory, Physics department, Tongji University, Shanghai 200433

Received date: 2005-09-19

Abstract Based on the third-order aberration theory, the problem that off-axis aberrations in the main types Galilean and Keplerian beam expanders can't be corrected is worked out. With reasonable analysis of optical path, a new type beam expander with wide aperture and bigger field angle and large relative aperture in which the on-axis and off-axis aberration are both perfectly corrected is designed. It has much better optical performance than the two classical types. An example is presented. The clear entrance of its objective is 300 mm and focal length is 800mm, its magnification ratio is 30 and the primary working wavelength is 0.6328 μm . The results of optical design have been given. When the distances among the lenses of eyepiece and the distance between the objective and eyepiece are adjusted reasonably, the beam expander can be used in three wavelengths.

Keywords Optical design; Beam expander; Third aberration theory; Off-axis aberration



Hao Peiming was born in 1940 and received the B. S degree from Changchun Institute of Optics, Mechanics and Physics, and now is a professor and doctoral supervisor of Tongji University in Shanghai. His interests are optical design, optical manufacture, optical testing and optical alignment.