

# 伽里略非球面透镜扩束器

郝沛明 纪玉峰 冯玉萍 查来宾 丁厚月

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

## 摘 要

在激光系统中,伽里略球面透镜扩束器已得到广泛地应用,但是,它有许多不足之处。在本文中,研究了伽里略非球面透镜扩束器,给出了伽里略非球面透镜扩束器光学系统设计的方法和设计结果。我们得出的结论是:伽里略非球面透镜扩束器比伽里略球面透镜扩束器好。

关键词 扩束器,非球面透镜

## 1 引 言

为了避免在激光传输时由于激光光束发散角造成的激光光斑的发散,提高激光光束的传输距离,即降低激光光束发散角,提高准直性,在激光发射时,加激光光束扩束器来改善激光光束的发散角。一般来说,激光光束扩束器都采用伽里略望远镜的结构型式,这系统无聚焦点,结构简单,筒长短。以前,伽里略激光光束扩束器的光学系统是由球面透镜所组成,如图 1 所示,这系统存在以下几个问题:

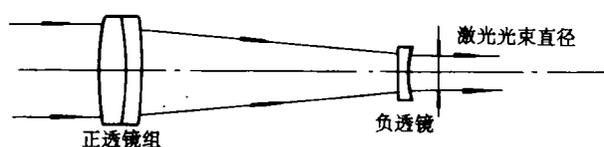


图 1 伽里略 (Galilean) 扩束器原理图

1. 在光学系统中,为了矫正球差或角差,前正透镜组由双胶合透镜所组成,由于引入胶合面,这样的扩束器在强激光的条件下不能使用,因胶合面容易被激光损坏,实际上只用于小功率的氦-氖激光器。

2. 如果前正透镜组采用正负分离透镜的面数增加,则激光光能损耗增大。

3. 更主要的问题是,如想要提高激光光束质量,缩短筒长,简化结构,增大扩束器的倍率和光能透过率,则采用球面透镜扩束器是难以实现的。

采用带有非球面透镜扩束器可以克服球面透镜扩束器的不足。下面对非球面透镜扩束器进行详细的论述。

收稿日期: 1996-10-03

修改日期: 1996-11-25

## 2 非球面透镜扩束器

伽里略非球面透镜扩束器的原理表示在图 2。它由前单块非球面正透镜和后单块负透镜所组成， $s_1$  表示非球面透镜的厚度， $s_2$  表示两块透镜的空气间隔， $s_3$  表示负透镜的厚度， $f_0$  为非球面正透镜的焦距， $f_e$  为负透镜的焦距， $o$  点为正和负透镜的后焦点，两者后焦点重合，即可构成伽里略非球面透镜扩束器。

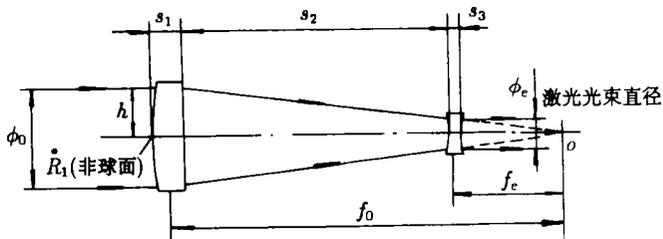


图 2 伽里略非球面扩束器原理图

### 2.1 非球面透镜扩束器的设计方法

激光发射的光束是单色波长的，发散角都比较小，为毫弧度 (mrad) 数量级，在光学系统设计时，只要考虑消除单色波长的轴向球差或角差。本文以 YAG 激光器为例，设计 6 倍的扩束器，激光光束的直径为  $\phi_8$ ，即负透镜的通光口径为  $\phi_8$ ，非球面透镜的通光口径为  $\phi_{48}$ ，两个透镜的焦距比  $f_0 / -f_e = 6$ ，非球面正透镜和负透镜两者的相对孔径一致，后焦点重合，可构成 6 倍伽里略非球面透镜扩束器。设计方法如下：

#### 2.1.1 求解球面透镜系统的结构参数

按  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ，求出光学玻璃 k9 的折射率  $n$ ；按焦距比  $f_0 / -f_e = 6$ ，求出一系列光焦度的正和负透镜，两者都采用球差 LA 极小值的公式，解出半径  $R$  和厚度  $S$  (正透镜采用平凸透镜为佳)；按正和负透镜的后焦点重合的要求，求出正和负透镜两者之间空气间隔。将求解得的光学系统参数，通过光线追迹来证实。

#### 2.1.2 求解 $e^2$ 的初始值

通过光线计算，求出球面光学系统的球差系数和  $\Sigma S_{1 \neq}$  值，为了消除球面光学系统中的球差 LA，系统中的第一面  $R_1$  改为非球面  $\dot{R}_1$ 。求解非球面偏心率  $e^2$  的公式如下：依据三级像差理论，球差系数的表示式为

$$S_1 = \Sigma S_{1 \neq} + S'_{1 \neq},$$

$$\Sigma S_{1 \neq} = \Sigma hP,$$

$$S'_{1 \neq} = h_1^4 K_1.$$

$S'_{1 \neq}$  表示第 1 面  $\dot{R}_1$  为非球面的球差系数； $h$  为光线的入射高度， $P = \left( \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \frac{u}{n}$ ， $\Delta u =$

$u' - u$ ， $u$  和  $u'$  为光线在折射面前和后与光轴的夹角， $\Delta \frac{1}{n} = \frac{1}{n'} - \frac{1}{n}$ ， $\Delta \frac{u}{n} = \frac{u'}{n'} - \frac{u}{n}$ ， $n$  和  $n'$  为折射

面前和后的折射率； $K_1 = -\frac{e^2}{R_1^3} \cdot \Delta n_1$ ,  $R_1$  为非球面顶点曲率半径。要求非球面透镜扩束器的光学系统的球差校正为零，必须的条件是

$$\Sigma S_{1 \neq} = -S_{1 \neq}'$$

$$e^2 = \frac{R_1^3}{h_1^4 \cdot \Delta n} \cdot \Sigma S_{1 \neq}'$$

将球面光学系统的  $\Sigma S_{1 \neq}'$  和第 1 面的参数 ( $h_1$ 、 $R_1$ 、 $n$ 、 $n'$ ) 代入上式，就可得出按三级像差理论求解的非球面  $e^2$  初始值。

2.1.3 求解  $e^2$  的精确值

按三级像差理论求解的非球面  $e^2$  初始值输入光线计算程序，通过像差平衡，改动  $e^2$  值，使初级像差 (三级像差) 和高级像差相平衡，计算出在最大入射高度  $h_m$  的球差 LA 或角差  $\alpha$  为零时的  $e^2$  精确值。

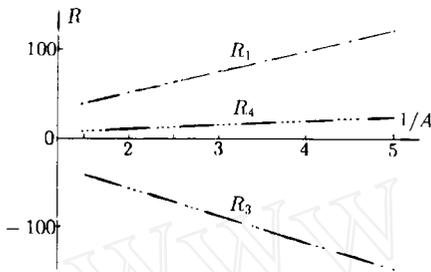


图 3 1/A - R 的关系曲线

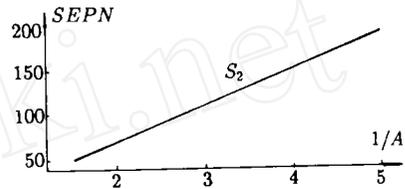


图 4 1/A - S2 的关系曲线

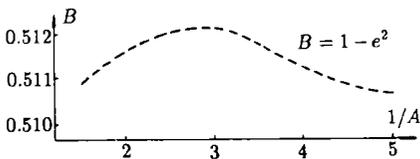


图 5 1/A - B 的关系曲线

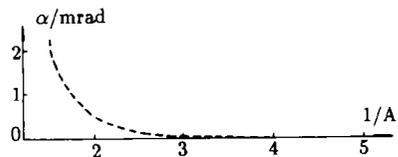


图 6 1/A - alpha 的关系曲线

2.2 非球面透镜扩束器的设计结果

我们设计了一系列的非球面透镜扩束器，非球面正透镜和负透镜的相对孔径  $A = \phi_0/f_0 = \phi_e/-f_e$ 。为了图解的方便，选取相对孔径的倒数来表示，即  $1/A = f_0/\phi_0 = -f_e/\phi_e$ ，数值分别为 5、4、3、2.5、2、1.5。设计好的光学系统结构参数表示在表 1，其中：1/A 为相对孔径的倒数，NO 为透镜的面数序号，RADIUS 为透镜的半径，SEP N 为透镜的厚度和空气间隔，INDEX 为透镜的折射率，HCA 为透镜通光的半口径，GLASS 为光学玻璃材料名称， $B = 1 - e^2$ 。不同参数的角差  $\alpha$  表示在表 2，其中 ZONE 为孔径的带，给出不同带的角差  $\alpha$ (mrad)。将设计好的结构参数用曲线图表示，1/A - R 的关系曲线表示在图 3, 1/A - S2 的关系曲线表示在图 4。从图 3 和图 4 可以看出，1/A 与 R 和 S2 的关系是线性的；1/A - B(1 - e^2) 的关系曲线表示在图 5; 1/A - alpha 最大值 (各种相对孔径的角差 alpha 最大值) 的关系曲线表示在图 6。从图 3 到图 6 中，不

难查出其他相对孔径时的光学系统结构参数。

表 1

1/A	NO	RADIUS	SEPN	INDEX	HCA	GLASS	B
5	1	121.5063			24.000		.51060
	2	.0000	12.000	1.5062683	23.203	k9	
	3	-145.0000	190.335		4.170		
	4	23.7020	3.000	1.5062683	4.000	k9	
4	1	97.200			24.000		.51120
	2	.0000	12.000	1.5062683	23.004	k9	
	3	-116.0000	150.320		4.213		
	4	19.0000	3.000	1.5062683	4.001	k9	
3	1	72.9040			24.000		.51210
	2	.0000	12.000	1.5062683	22.672	k9	
	3	-84.6750	110.344		4.282		
	4	14.3600	3.000	1.5062683	4.000	k9	
2.5	1	60.7500			24.000		.51200
	2	.0000	12.000	1.5062683	22.407	k9	
	3	-72.5000	90.338		4.338		
	4	11.9330	3.000	1.5062683	4.000	k9	
2	1	48.6030			24.000		.51160
	2	.0000	12.000	1.5062683	22.008	k9	
	3	-56.0000	70.362		4.418		
	4	9.6410	3.000	1.5062683	4.000	k9	
1.5	1	36.4520			24.000		.50844
	?	.0000	12.000	1.5062683	21.344	k9	
	3	-42.4500	50.365		4.556		
	4	7.2600	3.000	1.5062683	4.001	k9	

表 2

1/A	5	4	3	2.5	2	1.5
ZONE	$\alpha$ (mrad)					
0	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0.02	0.05	0.22
0.5	0	0.01	0.02	0.07	0.21	0.93
0.71	0	0.01	0.05	0.14	0.42	2.04
0.85	0	0.01	0.05	0.14	0.43	2.22
1.0	0	0	0	0	0	0

### 3 结 论

从设计的结果来看,当非球面正透镜和负透镜的相对孔径  $A = 1/3$  时,最大的角差  $\alpha = 0.05$  mrad, 光学长度为 125.344 mm; 当非球面正透镜和负透镜的相对孔径  $A = 1/2.5$  时,最大的角差  $\alpha = 0.14$  mrad, 光学长度为 105.338 mm, 这是非常好的设计结果, 是采用球面透镜扩束器做不到的, 所以我们可以得出结论:

带有非球面透镜的伽里略扩束器优于球面透镜伽里略扩束器。

非球面透镜加工并不困难, 请参考文献 [5]。按上述方法, 我们设计、加工了带有非球面透镜的伽里略扩束器, 得到了非常好的使用效果。

## 参 考 文 献

- 1 Warren J Smith. *Modern Optical Engineering*, New York: McGRAW HILL BOOK COMPANY, 1966.
- 2 “光学仪器设计手册”编辑组编. 光学仪器设计手册 — 上册. 北京: 国防工业出版社, 1970.
- 3 王之江. 光学设计理论基础. 北京: 科学出版社, 1965. 295~317
- 4 潘君骅, 郝沛明. 两个二次曲面反射镜组成的光学系统的一般研究. 天文学报, 1965, 13(1): 46~56
- 5 郝沛明. 凸非球面加工. 光学学报, 1993, 11(10): 931~937

## Galilean Beam Expander with an Aspherical Lens

Hao Peiming Ji Yufeng Feng Yuping

Zha Laibin Ding Houyue

( Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica Hefei 230031 )

## Abstract

A Galilean beam expander with spherical lens is widely used in laser systems, but It has a lot of deficiency. In this paper a Galilean beam expander with an aspherical lens is discussed, and the design method and the result are given. We can draw such a conclusion that the Galilean beam expander with an asphericall lens is better than that with a spherical lens.

Key words: beam expander, aspherical lens

郝沛明 男, 1940年生, 研究员。1963年毕业于长春光机学院物理光学系, 先后在中国科学院长春光机所、成都光电技术所、安徽光机所工作。一直从事靶场光学测量仪器和特种镜头的光学系统设计、光学加工工艺、光学测量和检验的研究工作, 曾获得一项国家二等发明奖和多项国防科委和中国科学院重大成果一等奖。