

双片型傅里叶变换透镜

王 民 强

(清华大学)

提 要

本文叙述了一种小间隙双片型傅里叶变换透镜。采用反常玻璃组合以降低 Petzval 和; 保留适量的球、彗差以控制象散。在相对孔径 1:10 时, 输入面和频谱面处的象质均达到衍射极限。

傅里叶变换透镜的特点是必须对两对物象共轭位置(即位于前焦面处的输入面和位于后焦面处的频谱面)控制除畸变以外的全部单色象差。1969年后开始出现的傅里叶变换透镜, 多属六至八片的对称或近似对称的四组元双远距型^[1,2]。1974年 C. G. Wynne 指出用简单的单组元薄透镜就能满足傅里叶变换透镜的要求^[3]。本文叙述一种单组元双片型傅里叶变换透镜。

一、消象差考虑

密接的双片薄透镜(无论双胶或双分)只有两个可供消象差的变量 P^∞ 、 W^∞ , 一般只能控制两种单色象差, 似乎无法满足傅里叶变换透镜对两对物象共轭位置控制多种象差的要求。然而从象差理论不难导出这两对共轭位置的象差之间的联系, 并找出使两对共轭位置象差相等的特定条件, 于是有可能用两个变量把全部象差控制到容许限度以内。

密接双片薄透镜不能消除场曲, 但可用两个措施来改善:

- (1) 采用反常的玻璃组合(正镜高折射率, 负镜低折射率)以降低 S_{IV} 。
- (2) 控制 S_{III} 以改善场曲。从象差理论知道: 当光阑不在薄透镜处时(这正是傅里叶变换透镜的工作状态), 保留一定数量的球差或彗差(当然这些数量应在容许公差范围之内), 可以控制 S_{III} 值到零或负值, 使子午和弧矢场曲得到改善。

二、两对物象共轭位置的象差联系

1. 对第一对物象共轭位置消象差

此处以输入面和频谱面直径相等者为例, 不等者也类似。设物在无穷远处, 孔径光阑在前焦面(图 1)。对第一对共轭位置消象差就是控制物面象差 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 。

列出象差方程^[4], 且计入 $h_p = h$ 后有:

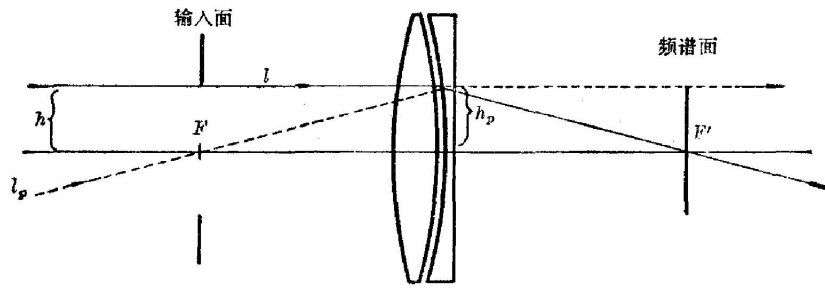


图 1

$$\begin{cases} S_I = h(h\varphi)^3 P^\infty & \text{(i),} \\ S_{II} = h(h\varphi)^3 P^\infty - j(h\varphi)^2 W^\infty & \text{(ii),} \\ S_{III} = h(h\varphi)^3 P^\infty - 2j(h\varphi)^2 W^\infty + j^2 \varphi & \text{(iii).} \end{cases} \quad (1)$$

2. 对第二对物象共轭位置消象差

也就是控制图 1 中的光瞳象差 \bar{S}_I 、 \bar{S}_{II} 、 \bar{S}_{III} 。把图 1 中的孔径光阑看作“物”，如图 2 所示。按“物”在前焦面，“孔阑”在后焦面（入瞳在无穷远处）的物方远心光路列出象差方程(2)，

$$\begin{cases} \bar{S}_I = h(h\varphi)^3 (P^\infty - 4W^\infty + 4 + 2\mu), \\ \bar{S}_{II} = -h(h\varphi)^3 (P^\infty - 4W^\infty + 4 + 2\mu) - j(h\varphi)^2 (W^\infty - 2 - \mu), \\ \bar{S}_{III} = h(h\varphi)^3 (P^\infty - 4W^\infty + 4 + 2\mu) + 2j(h\varphi)^2 (W^\infty - 2 - \mu) + j^2 \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

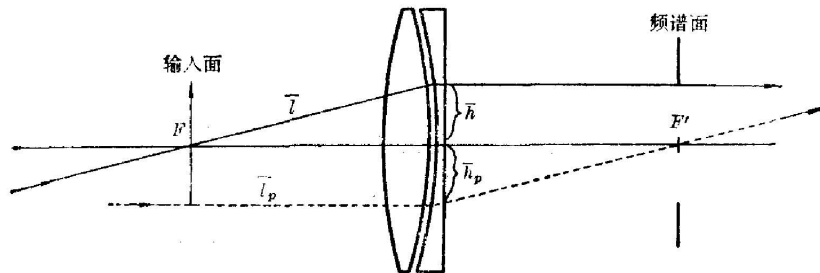


图 2

(1)、(2) 两式中只有 P^∞ 、 W^∞ 两个变量，不能同时使六个象差方程为零。然而，比较(1)、(2)两式可见，如果

$$W^\infty = 1 + 1/2 \mu, \quad (3)$$

则

$$S_I = \bar{S}_I; \quad S_{II} = -\bar{S}_{II}; \quad S_{III} = \bar{S}_{III}.$$

换言之，只要满足(3)式的条件，则两对物象共轭位置的球、彗、散数值两两相等。(3)式就是同时控制两对共轭位置象差的条件。

为了改善场曲，令 $S_{III} = 0$ ，由(1)(iii)式解出：

$$P^\infty = 1 + \mu. \quad (4)$$

(4)式即保证 $S_{III} = \bar{S}_{III} = 0$ 的条件。

把条件(3)、(4)代入(1)、(2)式，且计入拉赫不变量 $j = h^2 \varphi$ ，求得此时的各种象差值如

表 1 方案 a 竖列所示。

表 1

	方 案 a	方 案 b	方 案 c
密接薄透镜的 $\begin{cases} W^\infty \\ P^\infty \end{cases}$	$1 + \frac{1}{2}\mu$ $1 + \mu$	$1 + \frac{1}{2}\mu$ $1 + \frac{2}{3}\mu$	$1 + \frac{1}{2}\mu$ $1 + \frac{1}{2}\mu$
$S_I = \bar{S}_I$	$j^2 \varphi (1 + \mu)$	$j^2 \varphi \left(1 + \frac{2}{3}\mu\right)$	$j^2 \varphi \left(1 + \frac{1}{2}\mu\right)$
$S_{II} = -\bar{S}_{II}$	$\frac{1}{2} j^2 \varphi \mu$	$\frac{1}{6} j^2 \varphi \mu$	0
$S_{III} = \bar{S}_{III}$	0	$-\frac{1}{3} j^2 \varphi \mu$	$-\frac{1}{2} j^2 \varphi \mu$

结论: 只要设计一密接双片透镜, 令其 $P^\infty = 1 + \mu$, $W^\infty = 1 + \frac{1}{2}\mu$, 则两对共轭位置的各种象差绝对值相等, 且同时达到表 1 中方案 a 所示的数量。

用同样的方法, 如令子午场曲面和高斯面重合, 即 $\alpha'_i = 0$, $S_{III} = -\frac{1}{3} S_{IV} = -\frac{1}{3} j^2 \varphi \mu$, 则得表 1 方案 b 竖列结果。

如令 α'_i 和 α'_o 等值反号, 分处高斯面两旁, 即 $S_{III} = -\frac{1}{2} S_{IV} = -\frac{1}{2} j^2 \varphi \mu$, 则得表 1 方案 c。三种方案基本上都可用, 最后应根据轴上及轴外点实际象差匹配状况在三者之间选择较佳结构。

三、密接双分型傅里叶变换透镜设计例

双胶镜的场曲较大, 限制了视场和孔径的增大。为降低 S_{IV} 值, 采用高折射率材料作正透镜, 低折射率材料作负透镜。两折射率之差宜大。但这种反常玻璃组合的胶合透镜不能满足表 1 所需的 P^∞ 、 W^∞ 值, 于是必须改成密接双分型。

密接双分薄透镜能提供的 P^∞ 、 W^∞ 值如下^[4]:

$$\left. \begin{aligned} P^\infty &= \varphi_a^3 P_a^\infty + \varphi_b^3 P_b^\infty + 4 \varphi_a \varphi_b^2 W_b^\infty + \varphi_a^2 \varphi_b (3 + 2\mu_b) - \varphi_a \varphi_b^2; \\ W^\infty &= \varphi_a^2 W_a^\infty + \varphi_b^2 W_b^\infty + (2 + \mu_b) \varphi_a \varphi_b; \text{ 式中 } \mu_b = \frac{1}{N_b}; \\ \text{又单片的 } P_a^\infty, W_a^\infty, P_b^\infty, W_b^\infty &\text{ 必须分别满足下列关系:} \\ P_a^\infty &= \frac{N_a}{(N_a - 1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(N_a + 2)} \right] + \left[1 - \frac{1}{(N_a + 1)^2} \right] \left[W_a^\infty - \frac{1}{2(N_a + 2)} \right]^2; \\ \text{b 镜类似。} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

计算举例: 按表 1 方案 a 设计一供 0.6328μ 波长用的密接双分傅里叶变换透镜。 $f' = 300\text{mm}$; 输入面和谱面直径各为 30mm ; 最高空间频率 $= h / \lambda f' = 80$ 线对/ mm 。

材料: 正镜 ZF7, $N_a = 1.7988$; 负镜 K9, $N_b = 1.5151$ 。

取 $\mu = 0.47$, 设计就归结为找出一双分透镜, 其 $P^\infty = 1 + \mu = 1.47$, $W^\infty = 1 + \frac{1}{2}\mu = 1.235$ 。

由 $\varphi_a + \varphi_b = 1$ 及 $\frac{\varphi_a}{N_a} + \frac{\varphi_b}{N_b} = 0.47$, 解出: $\varphi_a = 1.825$; $\varphi_b = -0.825$;

由(5)式解出: $W_a^\infty = 1.781$, $W_b^\infty = -1.012$; 再由常规的薄透镜式求出结构参数如下:

r	d	N
542		
-173.2	0	1.7988
-152.6	0	1
-826	0	1.5151

这类镜头的象差基本上是初级量, 上机稍加平衡, 两对共轭位置的波象差不难达到 $1/4\lambda$ 以内。

与六至八片的对称四组元双远距型相比, 双片型的优点是结构简单, 工艺成本低; 由于片数少, 相干光噪音小, 目前在国际上已获得应用。在长焦距时, 轴向尺寸大固然是一缺点, 但当需要引入全息参考光束时, 工作距长反不失为一优点。当孔径和视场更大时, 双片型象质不如多组元型, 总之, 两种类型各有自己的适用场合。

参 考 文 献

- [1] B. A. F. Blandford; *Optical Instruments and Techniques*, 1970, 435.
- [2] K. von Bieren; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 12 (Dec), 2739.
- [3] C. G. Wynne; *Opt. Commun.*, 1974, **12**, No. 3 (Nov), 266.
- [4] 王之江; 《光学设计理论基础》, 1965, 科学出版社.
- [5] 林大键; 《光学工程》, 1979, No. 5, 31.
- [6] 董玉芝等; 《物理》, 1978, **7**, No. 5 (Oct), 292.
- [7] 《光学信息处理》, 1979, 清华大学研究生教材.

A Fourier transform doublet lens

WANG MINQIANG

(*Qinghua University, Beijing*)

(Received 11 April 1980)

Abstract

A Fourier transform lens of the doublet type with small air separation is described. The anomalous combination of glasses is used to reduce the Petzval sum, while a proper amount of spherical aberration and coma is held to control the astigmatism. The image quality is diffraction limited in both input and frequency planes at $f/10$.