

# 折射率、色散变化量与宽谱段傅氏镜二级光谱变化量的分析\*

陈立武<sup>1,2</sup> 赵葆常<sup>1</sup> 杨建峰<sup>1</sup> 洪新华<sup>1,2</sup> 常凌颖<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 介绍了宽谱段傅里叶变换镜头中光学玻璃的折射率、色散变化对系统的成像质量的影响. 推导了折射率、色散变化量所引起的光学系统二级光谱的变化量公式. 重点讨论了在宽谱段光学系统中, 光学玻璃在折射率、色散上的变化量, 所造成的胶合薄透镜的二级光谱的变化量. 其系数在本文例中达 0.28, 相当于变化量占理论二级光谱余量的 28%, 因此在宽谱段系统中的二级光谱余量的变化量不应该被忽略. 实例表明光学玻璃的折射率、色散变化量对宽谱段傅里叶变换镜头的成像质量有显著的影响. 此外, 还考虑了傅里叶变换透镜的波像差问题, 其设计值小于 1/10 波长, 采用最优玻璃对组合, 可以保证波像差小于 1/10 波长, 完全满足使用要求.

**关键词** 光学设计; 傅里叶变换; 二级光谱; 折射率; 色散

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A

## 0 引言

在傅里叶变换光谱仪中, 会用到傅里叶变换镜头, 这是一种对成像质量要求较严的光学镜头; 设计选型和材料的选择问题在设计阶段已经解决, 本文就具有宽谱段特性的傅里叶变换光学系统, 在其工程研制中遇到的二级光谱<sup>[1~8]</sup>等方面的问题进行分析.

在长焦距、大视场的光学系统中折射率、色散的变化对于系统的色差有明显的影响<sup>[9]</sup>. 但是在焦距和视场都不算太大的宽谱段傅里叶变换镜头中也存在同样的问题, 对系统二级光谱也有很大的影响.

光学玻璃的许多性能指标都能够影响或者改变光学系统的成像质量, 它们在光学系统中的作用机理各不相同. 但光学玻璃在折射率、色散方面的变化可以用几何光的理论加以研究. 实际光学玻璃折射率、色散相对于理论上光学玻璃的(设计时用到的)折射率、色散变化量对镜头的影响很大. 在光学工程研制中, 常会遇到实际光学玻璃的折射率和色散等光学性能不能完全符合光学设计时的理论性能指标. 在这种情况下, 光学设计应该使用实测玻璃进行设计, 但是这样做, 每炉同样牌号的玻璃都要求对设计进行修改, 给设计、加工带来很大不便. 因此, 有必要对由于实测玻璃与理论玻璃之间折射率差值部分, 所引起的系统二级光谱的变化量进行分析.

## 1 几何光学二级光谱理论及公式

光学镜头的色差是由光学材料的色散引起的, 消色差与光焦度分配有关系. 当两种色光消色差, 即两种色光的焦点相重合, 第三种色光的焦点并不一定与其相重合时, 其偏离量就称为二级光谱, 如图 1. 即使复消色差的镜头也可能具有对其它谱线的二级光谱余量, 因此可以认为镜头普遍存在二级光谱问题.

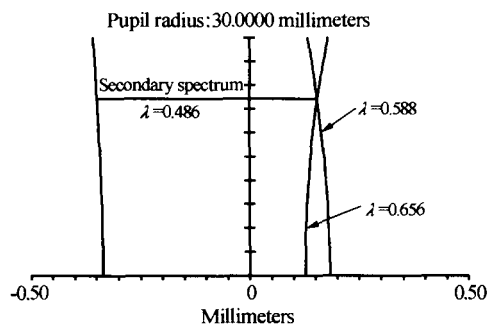


图 1 二级光谱示意图

Fig. 1 Secondary spectrum graphics

现代光学系统的 CCD 响应谱段很宽, 表达宽谱段光学系统二级光谱的数值公式可改为<sup>[10]</sup>

$$\Delta L'_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} = -f' \times \frac{P_{1\lambda_3} - P_{2\lambda_3}}{\nu_1 - \nu_2} \quad (1)$$

式中

$$P_{\lambda_3} = \frac{N_{k1} - N_{k3}}{N_{k1} - N_{k2}} \quad (K=1, 2) \quad (2)$$

$$\nu_k = \frac{N_{k3} - 1}{N_{k1} - N_{k2}} \quad (K=1, 2) \quad (3)$$

$N_k$  为不同种玻璃对应的折射率( $K=1, 2$ )

\*CE-1 卫星有效载荷光学遥感器探测系统, 863-708 资助项目  
Tel: 029-88484669 Email: ch\_yahu@yahoo.com.cn  
收稿日期: 2005-01-12

$$\frac{\Delta P}{\Delta \nu} = \frac{P_{1\lambda_3} - P_{2\lambda_3}}{\nu_1 - \nu_2} \approx 0.00269 \quad (4)$$

$$\Delta L'_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} = -0.00269 f' \quad (5)$$

## 2 二级光谱的变化量

二级光谱是色差的高级量只与系统所选用的材料有关,和系统的设计结构参数关系不大.当理论折射率曲线与实际折射率曲线不重合时,光学玻璃对应系统所应用波段的色散也有所改变.当玻璃的折射率和色散变化之后,相应的二级光谱也发生了变化,变化量与所用光学玻璃的折射率、色散变化量有关而与系统的结构设计参数无关,因此有必要知道它的变化量和折射率、色散的变化量之间的关系.下面简单对双胶合透镜以及双分离透镜组的二级光谱变化情况进行求解.将二级光谱的计算公式(1)对  $n$  折射率求导得

$$\delta L_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} = - \left\{ \frac{1}{\nu_1 - \nu_2} [A_1 - A_2] - \left( \frac{P_1 - P_2}{\nu_1 - \nu_2} \right) \left( \frac{B_1 - B_2}{\nu_1 - \nu_2} \right) \right\} f' \quad (6)$$

式中

$$A_1 = \frac{\Delta n_{1\lambda_1} - \Delta n_{1\lambda_3}}{n_{1\lambda_1} - n_{1\lambda_2}} - \frac{\Delta n_{1\lambda_1} - \Delta n_{1\lambda_2}}{n_{1\lambda_1} - n_{1\lambda_2}} P_1 \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{\Delta n_{2\lambda_1} - \Delta n_{2\lambda_3}}{n_{2\lambda_1} - n_{2\lambda_2}} - \frac{\Delta n_{2\lambda_1} - \Delta n_{2\lambda_2}}{n_{2\lambda_1} - n_{2\lambda_2}} P_1 \quad (8)$$

$$B_1 = \frac{\Delta n_{1\lambda_3}}{n_{1\lambda_3} - 1} - \frac{\Delta n_{1\lambda_1} - \Delta n_{1\lambda_2}}{n_{1\lambda_1} - n_{1\lambda_2}} \nu_1 \quad (9)$$

$$B_2 = \frac{\Delta n_{2\lambda_3}}{n_{2\lambda_3} - 1} - \frac{\Delta n_{2\lambda_1} - \Delta n_{2\lambda_2}}{n_{2\lambda_1} - n_{2\lambda_2}} \nu_2 \quad (10)$$

如果将式(6)与式(1)相比较,省去微小量则可以近

表1 理论与实测玻璃折射率对比及 P、V 值计算

牌号	折射率	$\lambda_1=0.48$	$\lambda_3=0.60$	$\lambda_2=0.96$	P	V
	理论玻璃	1.7016770	1.6913204	1.6791847	0.46045	30.73587
Lak2	实测玻璃 1	1.7014878	1.6911201	1.6790122	0.46129	30.74979
	实测玻璃 2	1.7016852	1.6913219	1.6791616	0.45637	30.69322
	理论玻璃	1.6229415	1.6115643	1.5981844	0.45955	24.702582
TF3	实测玻璃 1	1.6227728	1.6114208	1.5981063	0.46022	24.787497
	实测玻璃 2	1.6230088	1.6116047	1.5982515	0.46064	24.704015

表2 玻璃对  $\Delta p$  计算表

系数 $\Delta p$	Lak2 理论	Lak2 实测 1	Lak2 实测 2
TF3 理论	0.0009		
TF3 实测 1		0.00107	-0.00385
TF3 实测 2		0.00065	-0.00427

分析可知如果系统具有二级光谱余量,那么选择合适的玻璃对可以进一步减小系统的二级光谱余量,否则系统的残余二级光谱余量会增加.从表1、表2中还可以发现,如果玻璃的实测折射率与理论折射率在各条谱线上的差值相等,那么  $\Delta p$  不变,系

似得

$$\delta L_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \approx \Delta k \cdot \Delta L_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \quad (11)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$  为相对色散的变化量;  $B_1$ 、 $B_2$  为阿贝数的变化量,实际应用时,可以使用式(12)来计算二级光谱的变化量

$$\delta L_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} = - \left\{ \left( \frac{P'_1 - P'_2}{\nu_1 - \nu_2} \right) - \left( \frac{P_1 - P_2}{\nu_1 - \nu_2} \right) \right\} f' \quad (12)$$

式中  $P'_1$ 、 $P'_2$  是实测玻璃的相对色散,  $P_1$ 、 $P_2$  是理论玻璃的相对色散;在实际中,  $\nu'_1 - \nu'_2$  与  $\nu_1 - \nu_2$  之间没有什么差别,一般只用  $\nu_1 - \nu_2$  代人公式计算.本文在实例部分要介绍的傅氏镜中,采用了 Lak2 与 TF3 玻璃对组成的双胶合透镜,现在通过对这些实测玻璃的计算可以找出那一种玻璃更适合投入系统研制.

从表1、2中的数据可以得知在  $0.48 \mu\text{m} \sim 0.96 \mu\text{m}$  这个波段中,最好的玻璃组合为 Lak2 实测 1、TF3 实测 2;其余组合都没有这一对的系数小,而且系数 0.00065 已经小于理论组合的系数,有趋近于 0 的趋势,特别利于二级光谱的校正.其中  $\Delta p$  变化量为 0.00025,而 Lak2 与 TF3 的阿贝数差值约为 6,所得二级光谱的变化量为  $0.000042 \times f'$  ( $f'=80 \text{ mm}$ ) 计算二级光谱的减小量为: 0.003 mm,而其他几对玻璃的组合对系统的二级光谱都是增加量,最大可增加 0.069 mm,这一数值对成像质量的影响会很大.由此,利用式(31)可推断当系统二级光谱变化量约为 0.003 mm 时,  $\Delta k \approx 0.28$ ,即  $\delta L_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \approx 0.28 \Delta L_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}$ .而其它几组配对玻璃的二级光谱变化量系数远大于此.

统的二级光谱余量也不改变;如果实测玻璃对的  $\Delta p$  小于理论玻璃对  $\Delta p$  的,且趋近于 0,那么系统的二级光谱余量会减小,成像质量会变好.

## 3 实例

本文以宽波段傅氏镜为例来说明本文分析的结论,该镜头中包含了 Lak2 与 TF3 的胶合薄透镜组,其光学系统的指标为

$$f' = 80 \text{ mm}; D/f = 1/7.34; \lambda = 0.48 \cdots 0.96 \mu\text{m}; 2\omega = \pm 4.77^\circ; \text{pixel} = 0.017 \text{ mm} \times 0.017 \text{ mm}.$$

通常评价光学系统的成像质量的指标有很多,但是多数情况下都采用弥散斑和调制传递函数作为成像好坏的评价标准<sup>[11,12]</sup>,傅氏镜设计结果如图 2,图 3.

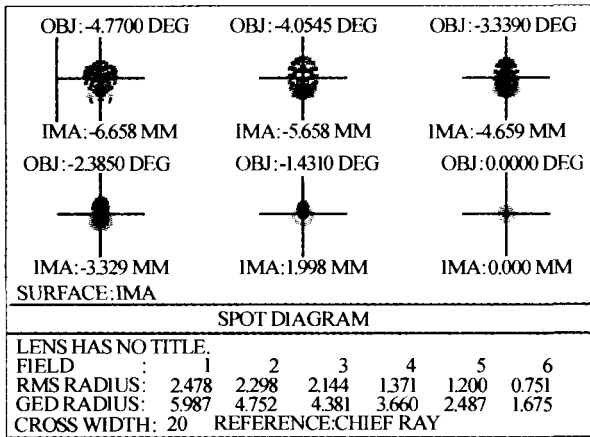


图 2 系统的弥散斑  
Fig. 2 Spot diagram of the system

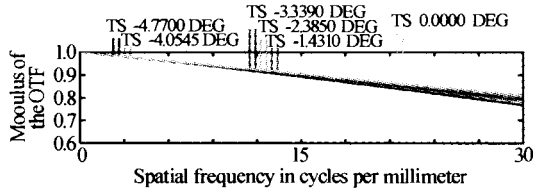


图 3 系统的调制传递函数  
Fig. 3 MTF of the system

从图 2、图 3 中可以看出设计是好的,但是如果玻璃对  $\Delta p$  不满足设计理论值,取实测玻璃对组合:Lak2 实测 2、TF3 实测 2 为例代人傅氏镜计算;根据上述计算得知系统的二级光谱增加量是 0.069 mm,那么光学系统的成像质量将会受到一定的影响.将该玻璃对代人傅氏镜系统计算得图 4,图 5.

通过对比分析可以看出,玻璃对组合:Lak2 实测 2、TF3 实测 2,由于其组合的  $\Delta p = -0.00427$ ,它们对于系统的二级光谱余量做增加的贡献,增加量 0.069 mm.系统的成像质量在弥散斑和传函等方

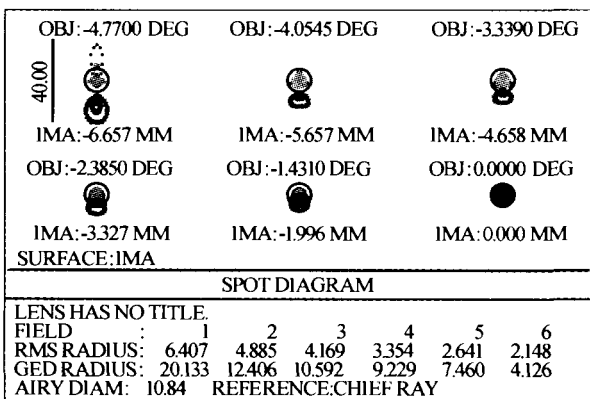


图 4 玻璃对  $\Delta p = -0.00427$  代人系统的弥散斑  
Fig. 4 The spot diagram of the system ( $\Delta p = -0.00427$ )

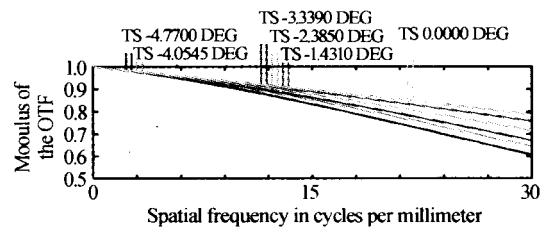


图 5 玻璃对  $\Delta p = -0.00427$  代人系统的调制传递函数  
Fig. 5 The MTF of the system ( $\Delta p = -0.00427$ )

面指标都变差了许多.并且系统在远心方面的特性也达不到要求,从这一点上来说,这些变化说明傅氏镜的性质发生了根本变化,不能满足设计所要求的傅里叶变换要求.但是如果选择 Lak2 实测 1、TF3 实测 1 玻璃对组合,那么得到的系统 will 比设计的结果更理想.

另外在设计时,针对傅氏镜对像差要求较严的特点,在保证傅氏镜正弦差要求的基础上,对像差进行了反复的校正,其中几何像差都得到了较好的校正,完全能够满足使用的要求.此外还考虑了傅氏镜的波像差问题,优化完成时,系统在使用波段上的波像差设计值小于十分之一波长,系统波像差 RMS 可达五十六分之一波长(综合),而在使用最好的玻璃对组合后,考虑系统工程制造的误差,系统的波像差可仍然保持在十分之一波长以下,最终从计算机模拟的结果来看,系统波像差 RMS 可达三十九分之一波长(综合),因此认为,系统所具有的波像差可以被忽略.

### 4 结论

本文从几何光学的像差理论角度分析了光学玻璃材料的折射率、色散变化对傅氏镜成像质量的影响.推导了胶合薄透镜二级光谱的变化量公式,并重点讨论了胶合薄透镜的二级光谱变化量问题.如果系统具有二级光谱余量,那么选择合适的玻璃对可以进一步减小系统的二级光谱余量,否则系统的残余二级光谱余量会增加.

### 参考文献

- 常群. 光学设计文集. 北京: 科学出版社, 1976. 85~102  
Chang Q. Corpus of Optical Design. Beijing: Science Publishing Company, 1976. 85~102
- 张以谟. 应用光学. 天津: 天津大学出版社, 1988. 315~327  
Zhang Y M. Applying Optics. Tianjing: Tianjing University Publishing Company, 1988. 315~327
- 袁旭沧. 光学设计. 北京: 科学出版社, 1983. 307~312  
Yuan X C. Optical Design. Beijing: Science Publishing Company, 1983. 307~312
- 郁道夫, 谈恒英. 工程光学. 北京: 机械工业出版社,

2002. 109~112  
Yu Daofu, Tan Hengying. Engineer Optics. Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 2002. 109~112
- 5 杨建峰. 空间太阳望远镜光学系统研究. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2000. 24~54  
Yang J F. Study on Optical system of space solar telescope. Xi'an: Institute of Optics and fine Mechanic, 2000. 24~54
- 6 金·斯莱克. 透镜设计基础. 北京: 科学出版社, 1978. 223~278  
KinSlake R. Lens Design Fundamentals. Beijing: Science Publishing Company, 1978. 223~278
- 7 Johnson R B. Very-broad spectrum afocal telescope. *SPIE*, 1998, **3482**:9
- 8 Jamieson T H. Ultrawide waveband optics. *Opt Engr*, 1984, **23**(2):111~116
- 9 Laikin M. Lens design. New York: Marcel Dekker, Inc. 2001. 105~120
- 10 陈立武, 杨建峰, 洪新华, 等. 宽谱段折射式长焦光学镜头. 光子学报, 2004, **33**(9): 1123~1126  
Chen L W, Yang J F, Hong X H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1123~1126
- 11 杨建峰, 阮萍, 常凌颖, 等. 高温电视摄像镜头设计. 光子学报, 2005, **34**(7):1081~1085  
Yang J F, Ruan Ping, Chang Lingying, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7):1081~1085
- 12 樊学武, 陈荣利, 马臻, 等. 偏心和倾斜光学系统初级象差理论的研究. 光子学报, 2004, **33**(4):494~496  
Fan X W, Chen R L, Ma Z, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 494~496

## Analysis on Increment of Index of Glass and Increment of Secondary Spectrum of the Wide Bands FT Lens

Chen Liwu<sup>1,2</sup>, Zhao Baochang<sup>1</sup>, Yang Jianfeng<sup>1</sup>, Hong Xinhua<sup>1,2</sup>, Chang Lingying<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and fine Mechanic, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-01-12

**Abstract** The effect induced by the increment of refraction index and dispersion of glass in the wide bands FT(Fourier Translate) lens were introduced. The formula of the increment of secondary spectrum which brought by the increment of refraction index and dispersion of glass were deduced. The increment of secondary spectrum of thin double lens in wide bands system was emphatically discussed. In this thesis, the coefficient of the increment to secondary spectrum is 0.28, which is said this increment is about 28% of the theory secondary spectrum of thin double lens, so it should not be ignored by any designer. The example showed in this thesis indicated that the increment of refraction index and dispersion of glass in the wide bands system had more serious effect to its imaging quality. In addition, the FT lens wavefront aberrations were mentioned, and the wavefront aberrations were designed less than 1/10 waves in the using bands. When the best glasses couple were used to produce the FT lens, the wavefront aberration could be remained less than 1/10 waves. So it can be considered that the lens could meet the use to disposal the optical information, if the FT lens could be made by the best glasses couple. The imaging quality of this FT lens is more excellent.

**Keywords** Optical design; FT; Secondary spectrum; The refraction index; Dispersion



**Chen Liwu** was born in 1969. He received his Bachelor's Degree in optical engineering from Changchun Institute of Optics and fine Mechanic, Changchun, Jilin Province, in 1992. Now he is studying for his Ph. D. Degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Science. His major interests include optical design and spectroscopy.