

文章编号: 0253-2239(2010)07-2089-04

# 8~12 $\mu\text{m}$ 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计

陈 潇<sup>1,2</sup> 杨建峰<sup>1</sup> 马小龙<sup>1</sup> 白 瑜<sup>1,2</sup> 何佶珂<sup>3</sup> 何建伟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 陕西 西安 710119  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049; <sup>3</sup> 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 介绍了一个大视场大相对孔径红外物镜的消热差设计。该系统工作波段为8~12  $\mu\text{m}$ , 全视场角为40°, 焦距为6 mm, 相对孔径为1.25, 总长为50 mm, 后工作距为15 mm。系统采用三片式结构, 仅使用了锗和硒化锌两种材料。引入了一个衍射面 and 两个二次非球面, 使结构简单化, 轻量化, 并很好地提高了成像质量。在-80 °C~200 °C 温度范围内利用衍射元件实现了消热差设计, 并给出了-80 °C~200 °C下系统的像质评价结果。设计结果表明, 在空间频率为16 lp/mm处, 各个温度下的系统传递函数(MTF)值均大于0.7, 接近于衍射极限, 成像质量良好, 实现了在超宽温度范围的消热差设计。

**关键词** 红外光学系统; 消热差; 衍射元件; 非球面; 大视场

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2089

## Athermalization Design of Wide Temperature Range for Hybrid Refractive-Diffractive Objective in 8~12 $\mu\text{m}$

Chen Xiao<sup>1,2</sup> Yang Jianfeng<sup>1</sup> Ma Xiaolong<sup>1</sup> Bai Yu<sup>1,2</sup> He Jike<sup>3</sup> He Jianwei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** A large relative aperture athermalized infrared optical system with wide field of view is introduced. The working wavelength is 8~12  $\mu\text{m}$ ; the full field of view is 40°; the effective focal length is 6 mm; the relative aperture is 1.25; the total optical length is 50 mm; and the back focal length (BFL) is 15 mm. It consists of a diffraction surface and two aspheric surfaces with a triplet structure, only using germanium and ZnSe. The system is simple, low mass and high image quality. The evaluation of the system is given in the temperature range of -80 °C~200 °C. The results show that the modulation transformation function (MTF) is near to 0.7 at the spatial frequency of 16 lp/mm and also near to the diffraction limit.

**Key words** infrared optical system; athermalization; diffractive optical element (DOE); aspheric surface; wide field of view

## 1 引 言

随着温度的变化, 光学材料的折射率、光学元件的尺寸以及面形都会发生变化, 进而使光学系统产生离焦或其他的像差, 最终影响系统的成像质量<sup>[1]</sup>。

在红外系统中主要关注的是折射率随温度的变化。锗是红外系统中常用的材料, 其折射率变化量为 $3.96 \times 10^{-4}/\text{°C}$ 。与常用的可见光材料BK7的 $2.8 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 进行比较, 可知红外波段材料随温度

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(60808028, 40301031)资助课题。

作者简介: 陈 潇(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计、红外光学、二元光学的研究与设计等方面的研究。

E-mail: chenxiao.45678@163.com

导师简介: 杨建峰(1967—), 男, 研究员, 主要从事空间光学探测研究与设计方面的研究。

E-mail: yangjf@opt.ac.cn(通信联系人)

变化引起的变化更为显著。因此对于红外系统消热差设计势在必行。

红外光学系统消热差设计是通过一些补偿措施使得光学系统在很宽的温度范围内保持成像质量的稳定性。常见的三种补偿方法有<sup>[2]</sup>:被动式机械补偿、主动式机械补偿和被动式光学补偿。通过对三种补偿方法的比较可知:光学被动式补偿的光学系统结构更简单,重量更轻。光学被动式无热化设计是利用光学材料热特性之间的差异,通过不同材料之间的合理组合来消除温度的影响。然而传统的被动式光学补偿一般都是针对折射系统,这种系统对其消热差一般是通过改变透镜的曲率或者使用较多的材料(一般需要至少三种以上的材料)来校正像差。这会使系统变复杂,且由于所用红外材料的增多而使成本提高。随着衍射光学元件(DOE)的出现,可采用衍射元件和传统的折射系统混合进行消热差,利用衍射元件的光热膨胀系数始终为正,而折射元件的光热膨胀系数有正有负且绝对值大于前者的特点,可以通过正、负光焦度的热差效应来实现消热差设计。在近几年的研究中,采用折衍混合消热差已经取得了很好的成果<sup>[3~10]</sup>。

但随着科技的进步,对于消热差系统有着更高的要求:首先,在温度上,要求其具有超宽工作温度范围,并且在各个温度下成像质量良好;其次,在保证像质的前提下,尽可能具有大的视场;再次,为了提高系统的灵敏度,希望尽可能具有大相对孔径;最后,希望结构更简单,成本更低。基于上述考虑,用两种材料——锗和硒化锌,并考虑这两种材料的温度透过系数,采用三片式结构,在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,设计了一个大视场、大相对孔径的红外消热差物镜。

## 2 光学被动式消热差原理

### 2.1 折-衍射光学元件的温度特性

在均匀温度变化下,光学元件的温度特性用光热膨胀系数 $x_f$ 来表示,它定义为单位温度变化引起的光焦度 $\varphi$ 的相对变化量

$$x_f = -\frac{\Delta\varphi_T}{\varphi}, \quad (1)$$

将 $\varphi=1/f$ 代入上式得

$$x_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dT}, \quad (2)$$

式中 $\varphi$ 为光学元件的光焦度, $f$ 为光学元件的焦距<sup>[11]</sup>。

对于折射元件,采用薄透镜模型时,由于光焦度 $\varphi=(n-n_0)(c_1-c_2)$ ,则有

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dT} &= \left(\frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT}\right)(c_1 - c_2) + \\ &(n - n_0) \left(\frac{dc_1}{dT} - \frac{dc_2}{dT}\right) = \left(\frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT}\right)(c_1 - c_2) + \\ &(n - n_0) \left(-\frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{dT} + \frac{1}{R_2} \frac{dR_2}{dT}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $c_1$ 和 $c_2$ 为透镜的表面曲率, $R_1$ 和 $R_2$ 为透镜的表面曲率半径,注意到

$$\frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{dT} = \frac{1}{R_2} \frac{dR_2}{dT} = \alpha_g, \quad (4)$$

$\alpha_g$ 为光学材料的热膨胀系数,代入到(3)式可得

$$\frac{d\varphi}{dT} = \varphi \left[ \frac{1}{(n - n_0)} \left(\frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT}\right) - \alpha_g \right], \quad (5)$$

所以得到薄透镜的光热膨胀系数为

$$x_{f,r} = \alpha_g - \frac{1}{(n - n_0)} \left(\frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT}\right). \quad (6)$$

由(6)式可知,折射元件的光热膨胀系数与透镜形状无关,仅取决于透镜玻璃材料的光学性质。 $x_{f,r}$ 的大小决定了透镜焦距随温度变化的变化量。

对于衍射元件,采用薄透镜模型,此时衍射元件的第 $m$ 个环带的 $r_m$ 为

$$r_m^2 = (f + m\lambda)^2 - f^2, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

式中 $\lambda$ 为中心波长,衍射元件的焦距由其环带数决定,当 $r^2 \leq (f/m)^2$ 时,焦距为

$$f = n_0 r_m^2 / 2m\lambda. \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

当环境温度改变时,环带半径和折射率也会随之改变,环带半径及折射率与温度的关系如下

$$r_m(T) = r_m(1 + \alpha_g \Delta T), \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

$$n_0(T) = n_0 + \frac{dn_0}{dT} \Delta T. \quad (10)$$

因而得到衍射元件的光热膨胀系数为

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}. \quad (11)$$

### 2.2 折-衍射混合光学系统消热差原理

假设一个红外系统由 $i$ 个透镜组成,消热差设计要求:1)轴向色差为零;2)温度变化时光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦需相互抵消。因此红外消热差系统要同时满足光焦度、校正色差和消热差的要求,即必须满足以下三个公式<sup>[12]</sup>

$$\frac{1}{h_1} \sum_1^i h_i \varphi_i = \varphi, \quad (12)$$

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 \omega_i \varphi_i) = 0, \quad (13)$$

$$df_b^T/dT = \left(\frac{1}{h_1\varphi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 x_i \varphi_i) = \alpha_k L, \quad (14)$$

式中  $h_i$  为第一近轴光线在各透镜上的入射高度,  $\varphi$  为系统的总光焦度,  $\varphi_i$  为各透镜的光焦度,  $\Delta f_b^T$  是光学元件色散引起的离焦,  $\omega_i$  为各透镜的色散因子,  $df_b^T/dT$  为光学元件温度效应引起的离焦,  $\alpha_k$  为光学系统外部膨胀系数,  $L$  为系统结构总长。

### 3 光学系统设计及结果

该光学系统的结构参数为:工作波段为 8~12 μm,中心波长为 10 μm,全视场为 40°,有效焦距为 6 mm,  $F$  数为 0.8,系统总长为 50 mm,后工作距为 15 mm,工作温度范围为 -80 °C~200 °C,镜筒采用铝(线性膨胀系数  $\alpha_k$  为  $23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )。适用于像素尺寸为 40 μm,像素数为 640 pixel × 480 pixel 的非制冷红外焦平面阵列探测器。如图 1 所示,通过 Zemax 软件优化设计得到的大视场大相对孔径红外消热差物镜。系统结构简单,仅使用了锗和硒化锌两种材料,由三片式透镜(Ge, ZnSe, Ge)组成,通过使用衍射面以及两种材料相互配合,合理分配光焦度,实现了消热差设计。其中第三和五面均为二次非球面(二次非球面系数分别为 -4.42, -4.81),第六面为衍射面。光阑设置在第三个面上,而第三面也为二次非球面,可以校正与孔径有关的球差。第五面的二次非球面用来校正除场曲以外的

的轴外像差,如彗差、像散和畸变。第三个透镜包含一个二次非球面和一个衍射面,为了使其加工检测简单,衍射面加工在平面上,以现代的非球面及衍射面加工和检测技术,完全可以实现加工及检测。

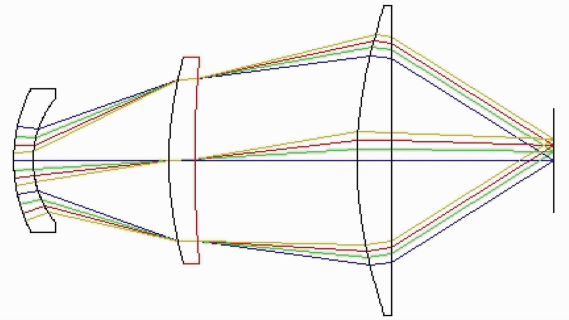


图 1 光学系统的外形结构图

Fig. 1 Schematic of optical system structure

### 4 像质评价

图 2(a)~(d)分别为系统在 -80 °C, 20 °C, 100 °C 和 200 °C 的调制传递函数曲线,由于使用的非制冷焦平面红外探测器的像素尺寸为 40 μm × 40 μm,其极限分辨率为 12.5 lp/mm。由图 2 可知,在空间频率为 16 lp/mm 处,在各温度下,调制传递函数(MTF)值均大于 0.7,接近衍射极限。说明该系统在全视场范围内已具有较好的成像质量。图 3 为消热差系统在 -80 °C~200 °C 范围内零视场与全视场下的 MTF(at 16 lp/mm)函数曲线。

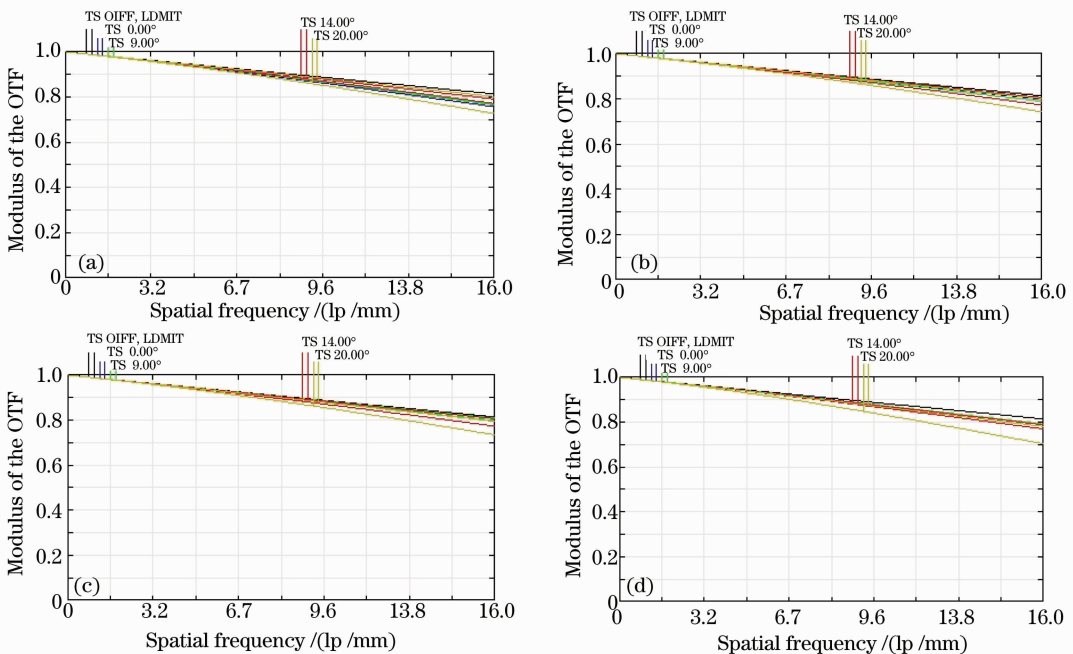


图 2 光学系统在不同温度的调制传递函数。(a)-80 °C;(b)20 °C;(c)100 °C;(d)200 °C

Fig. 2 System MTF curves at different temperature. (a)-80 °C;(b)20 °C;(c)100 °C;(d)200 °C

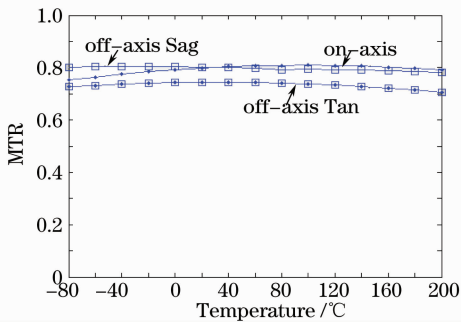


图3 消热差系统在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内零视场与全视场下的MTF(at 16 lp/mm)

Fig. 3 MTF at 16 lp/mm of athermal optical system (0 field of view and full field of view)

从表1可知:系统在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,最大弥散斑半径基本不变,满足像差设计的要求。

表2为消热差后波像差的变化情况。最大波前差为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $0.0899\lambda$ ,根据“瑞利判据”的标准有:当实际波面与理想波面的最大差值不超过 $\lambda/4$ 时,此波面可看作无缺陷的。说明该系统满足“瑞利判据”,为可用系统。根据波像差与离焦量的关系可知,系统的最大离焦量为 $4.6\text{ }\mu\text{m}$ ,小于系统的焦深 $25.6\text{ }\mu\text{m}$ 。说明该系统在设计温度范围内,像面基本保持稳定,实现了消热差设计。

表1 消热差后弥散斑的变化情况

Table 1 Variation of dispersed spot with temperature after athermalized

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Spot diagram / $\mu\text{m}$
-80	8.338
-20	6.816
20	6.363
60	5.961
100	6.114
160	6.949
200	7.781

表2 消热差后波像差的变化情况

Table 2 Variation of wave aberration with temperature after athermalized

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Variation of wave aberration / $\lambda$
-80	0.0456
-20	0.0391
20	0.0437
60	0.0486
100	0.0587
160	0.0767
200	0.0899

## 5 结 论

设计了一个大视场大相对孔径的红外消热差物

镜,工作波段为 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ ,全视场角为 $40^{\circ}$ 。非球面及衍射面的使用,使得系统更加紧凑,更加轻量化,并且很好地提高了系统的成像质量,同时通过光学被动式补偿在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内实现了消热差设计,在此温度范围内,在空间频率 $16\text{ lp/mm}$ 处,取得了较好的成像质量。该系统结构简单、视场非常大、工作温度范围超宽,成像质量较好,在军事领域的红外热成像系统将有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- Li Lin, An Liansheng. The Theory and Application of Computer Assisting Optical Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 214~249  
李 林, 安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 214~249
- P. J. Rogers. Athermalized FLIR optics [C]. SPIE, 1990, 1354: 742~751
- Bai Jian, Sun Ting, Shen Yibing *et al.*. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(7): 997~1002  
白 剑, 孙 婷, 沈亦兵等. 红外折射/衍射混合光学系统的热差分析[J]. 光学学报, 1999, 19(7): 997~1002
- Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in  $3.2\sim 4.5\text{ }\mu\text{m}$  [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2): 121~125  
孙 强, 王肇圻, 李凤友等. 红外 $3.2\sim 4.5\text{ }\mu\text{m}$ 波段折射/衍射光学系统的减热差设计[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 121~125
- Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1392~1395  
郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1392~1395
- Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(11): 1364~1367  
焦明印, 冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外系统[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1364~1367
- Wen Yanbo, Bai Jian, Hou Xiyun *et al.*. Design of infrared hybrid a thermal optical system [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(5): 82~86  
温彦博, 白 剑, 侯西云等. 红外无热化混合光学系统设计[J]. 光学仪器, 2005, 27(5): 82~86
- Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Design of a hybrid infrared apochromatic optical system beyond normal temperature [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6298~6303  
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐 军. 实现复消色差的超常温混合红外光学系统[J]. 物理学报, 2008, 57(10): 6298~6303
- Wang Xinxue, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems [J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, 30(1): 129~134  
王新学, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129~134
- Zhang Yinan, Wang Zhaoqi, Sum Qiang. Athermalization design of extensive temperature range for infrared hybrid refractive-diffractive objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(3): 311~314  
张铁楠, 王肇圻, 孙 强. 折/衍混合红外物镜的超宽温消热差设计[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 311~314
- Zhang Yimo. Optical Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 491~492  
张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社, 2008. 491~492
- Y. Tamagawa, T. Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt. Engng.*, 1996, 35(10): 3001~3006