

· 光学设计 ·

## 紧凑型折/衍混合中波红外无热化成像光学系统

孙宏宇

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:**分析了衍射光学元件的温度特性,利用衍射光学元件,设计了工作波段在中波红外、全视场为 $5.2^\circ$ 的红外无热化成像光学系统。设计结果表明,该光学系统在 $-55^\circ\text{C}\sim+80^\circ\text{C}$ 的温度范围内系统的MTF接近衍射极限,全视场内的MTF数值在33 lp/mm处达到0.5,像质优良。该光学系统最大直径为110 mm,总长90 mm,满足了技术指标要求。

**关键词:**折/衍混合元件;中波红外;无热化;成像光学系统

中图分类号:O432.2

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-03-0020-05

## Compact Refractive and Diffractive Hybrid MWIR Athermalizing Optical Imaging System

SUN Hong-yu

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** The temperature characteristics of diffractive optical element are analyzed. An infrared athermal imaging optical system at MWIR bands and  $5.2^\circ$  field of view is designed by using diffractive optical element. Design results show that the image quality of the system approaches the diffraction limit in the working temperature range of  $-55^\circ\text{C}$  to  $+80^\circ\text{C}$ , and the entire field of modulated transfer function (MTF) at 33 lp/mm is more than 0.5. The maximum diameter and the total length of the optical system are 110 mm and 90 mm respectively, which meets the technical requirements.

**Key words:** refractive diffractive hybrid element; middle wave infrared (MWIR); athermalization; imaging optical system

伴随着红外技术的发展,红外成像系统的应用越来越广泛,对于多数的红外成像系统,其工作环境的温度变化范围较大,温度的改变会对光学元件的特性带来极大影响,不仅改变光学元件的厚度、间隔等几何参数,同时也会影响光学元件折射率。对于常用的红外光学材料单晶锗,其温度折射率系数 $dn/dt$ 为 $396\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,而应用于可见光系统的光学材料K9,其温度折射率系数 $dn/dt$ 为 $2.6\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,相比于可见光材料,红外光学材料更易受温度的变化造成折射率的改变。进而造成系统成像质量的改

变。因此在系统设计时,要充分考虑温度对红外光学系统的影响。通常对温度补偿方法可分为三类<sup>[1]</sup>,分别是机械主动补偿、机械被动补偿、光学被动补偿。光学被动补偿方法相对于前两种方法,同时具有结构相对简单、质量轻、尺寸小等特点。随着衍射光学元件的相关理论以及加工水平的不断提升,通过在系统中加入衍射面,利用其特殊的温度特性和色散特性,可有效减少光学元件的使用数量,更易实现光学被动无热化。

设计了一种可适应较宽温度的紧凑型中波红

收稿日期:2016-05-27

作者简介:孙宏宇(1984-),男,河北承德人,硕士,工程师,研究方向为光机系统光学设计。

外无热化成像光学系统。利用衍射光学元件特殊的温度特性,采用透射光学元件与衍射光学元件混合使用的设计方法,通过合理分配各个光学元件的光焦度,实现了该光学系统对温度的自动补偿,从而保证光学系统在不同温度环境下的成像质量的稳定性。该光学系统采用了光学被动式设计方法,没有增加额外的调节机构,具有结构简单、系统可靠性高等特点。

## 1 衍射光学元件特性

通常可用光热膨胀系数来表征光学元件的温度特性。其定义为单位温度变化所引起的光焦度的相对变化,公式如下

$$\chi_f = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} \quad (1)$$

对于折射光学元件<sup>[2-3]</sup>,可采用薄透镜模型,并可推导光热膨胀系数如下

$$\chi_r = \alpha_g - \frac{1}{n - n_0} \left( \frac{dn}{dT} - n \cdot \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (2)$$

式中,  $\alpha_g$  为光学元件的线膨胀系数;  $n$  和  $n_0$  分别表示光学元件和空气的折射率;  $dn/dT$  为光学元件的温度折射率系数。

对于衍射光学元件,其焦距由衍射环带的位置决定,有下式

$$f = n_0 r_m^2 / (2m\lambda) \quad (3)$$

式中,  $r_m$  为第  $m$  个环带的径向距离;  $\lambda$  为工作波长。环带半径  $r_m$  与温度的关系为

$$r_m(T) = r_m(1 + \alpha_g \Delta T) \quad (4)$$

参照折射元件光热膨胀系数的定义,衍射光学元件的光热膨胀系数为

$$\chi_d = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \cdot \frac{dn_0}{dT} \quad (5)$$

对比折射元件和衍射元件的光热膨胀系数可知,折射元件的光热膨胀系数与光学元件的线膨胀系数和其温度折射率系数相关,而衍射元件的光热膨胀系数只与光学元件的线膨胀系数相关,和材料的温度折射率系数无关。此外由折射元件的光热膨胀系数公式可知,由于红外材料的  $dn/dt$  系数数值较大,因此对于折射元件的  $\chi_f$  始终为负值,而折射元件的  $\chi_d$  为正值,两者符号相反,因此由折射与衍射元件组成的混合系统完全可以补偿温度变化造成的像面位移。

衍射元件具有特殊的温度特性以外,还具有特殊的色散特性<sup>[4-5]</sup>,因此在系统中引入衍射面可以有效的减少光学元件的使用数量,同时达到无热化、消色差的能力。

## 2 系统参数及设计分析

根据系统指标要求,该光学系统的系统参数如表1所示。

表1 光学系统设计参数

参数	数值
波长/ $\mu\text{m}$	MWIR
焦距/mm	135
图像大小/mm	9.6×7.2
视场/ $^\circ$	5.2
光学系统长度/mm	< 95
最大直径/mm	< 120
温度范围/ $^\circ\text{C}$	-55~+80

折衍混合光学系统设计的要点是在合理分配光焦度的前提下,使光学系统因温度变化产生的像面离焦和系统本身机械结构的离焦相补偿。为此,需要满足以下条件<sup>[6-8]</sup>。

总的光焦度分配为

$$\sum_{i=1}^j \phi_i = \phi \quad (6)$$

消除系统轴向色差为

$$\sum_{i=1}^j \frac{\phi_i}{v_i} = 0 \quad (7)$$

消除系统热差为

$$\sum_{i=1}^j \frac{d\phi_i}{dT} + \alpha\phi = 0 \quad (8)$$

式中,  $\phi$  为系统总的光焦度;  $\phi_i$  为各个透镜组的光焦度;  $\alpha$  为结构件的线膨胀系数。

根据以上方程可知,至少需要三种材料才可以满足方程有解,本光学系统工作波段为中波红外,可选材料较长波较多,从成本上考虑,设计时采用硅和单晶锗,同时考虑可加工性,可将衍射面设置在单晶锗上。系统光学结构形式方面,技术指标对光学系统的总长、口径进行了限制,考虑系统焦距要远大于系统总长,因此该光学系统采用一次成像方式,将系统光阑设置在探测器冷光阑处,保证

100%冷光阑效率,避免杂光的进入。

### 3 设计结果及成像性能分析

根据以上设计参数和设计分析,首先由高斯光学和初级像差理论,确定光学系统的初始结构;然后,通过合理设置限制条件,在光学设计软件程序中进行多次优化和像质评价。最终设计后的红外光学系统采用五片光学元件,光学系统二维图如图1所示。

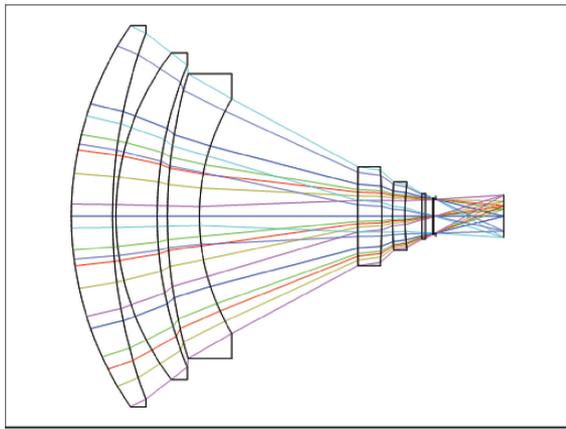


图1 光学系统二维图

其中第6表面为衍射面,图2为此无热化系统的衍射元件的相位及周期同径向距离的关系。结果表明,此衍射元件的最大环带数为8个。

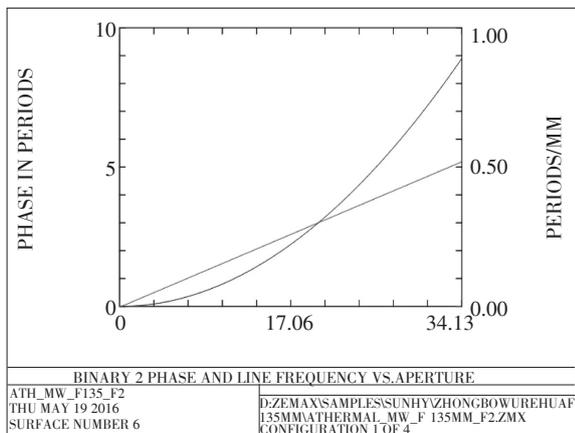
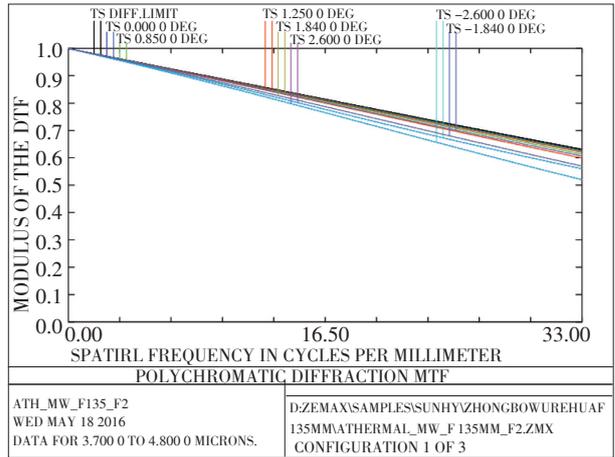


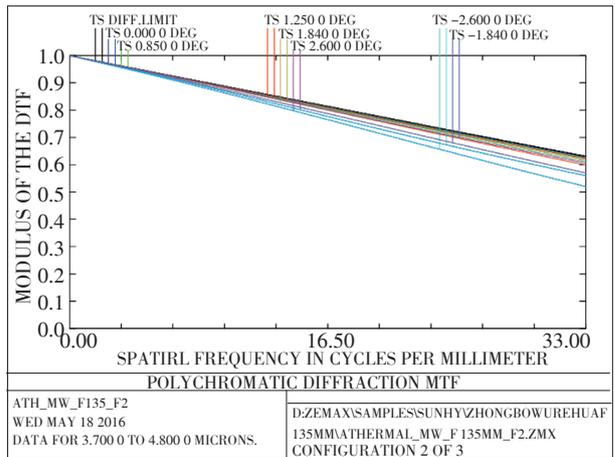
图2 衍射元件的相位及周期和径向距离的关系

根据所选探测单元尺寸大小,以33 lp/mm来评价光学系统成像质量的优劣。图3给出了光学系统在20℃、-55℃、80℃三个典型温度点的传递函数曲线

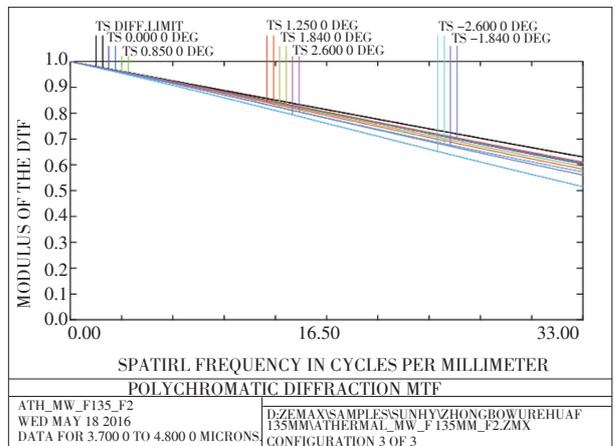
曲线。图4给出了光学系统在不同温度点,不同视场的传递函数曲线对比。



(a)光学系统在20℃时传递函数曲线



(b)光学系统在-55℃时传递函数曲线



(c)光学系统在80℃时传递函数曲线

图3 光学系统传递函数曲线

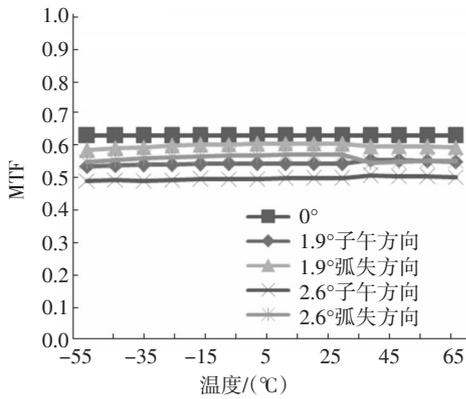
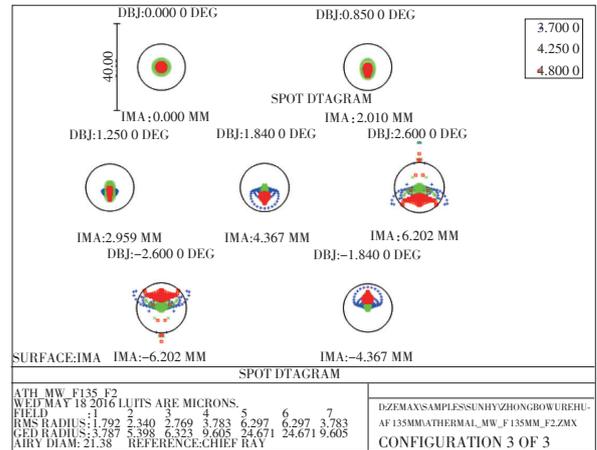


图4 不同温度下各个视场的MTF曲线图

从图3、图4可以看出,系统各个视场的传递函数数值较一致,接近衍射极限,传递函数在33 lp/mm最小值为0.5,说明光学系统成像质量好。

图5给出了光学系统在20℃、-55℃、80℃三个典型温度点的点列图。从图中可以看出,各个视场的光斑都在艾里斑以内,说明光学系统成像质量优良。满足红外制冷探测的基本需求。

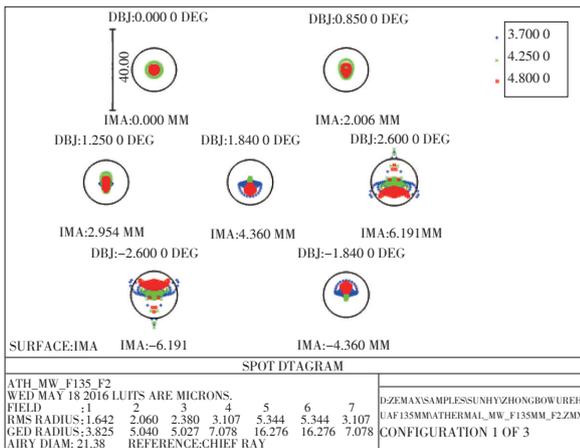


(c)光学系统在80℃时的点列图

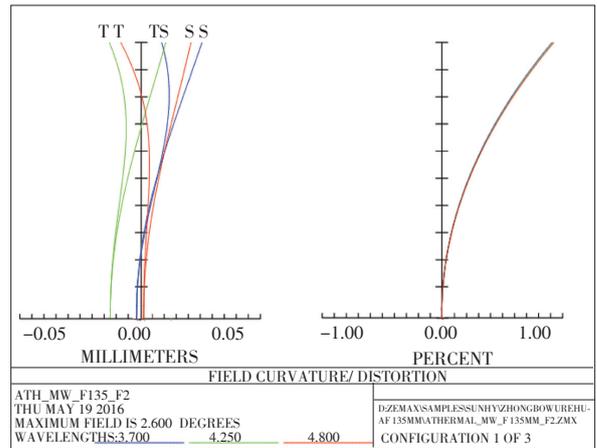
图5 光学系统点列图

图6给出了光学系统在20℃、-55℃、80℃三个典型温度点的场曲、畸变图。

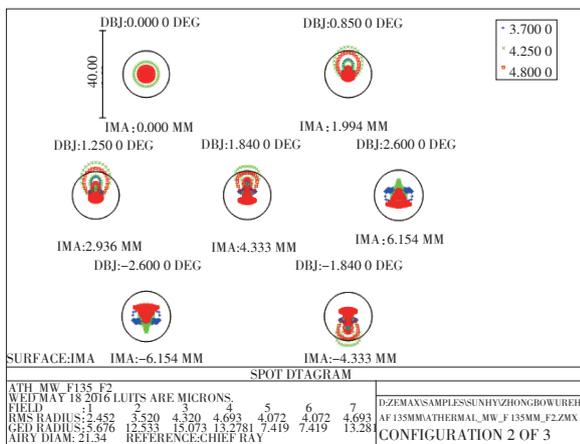
在红外光学系统设计时,要充分考虑光学元件的冷反射效应,在冷反射分析中,YN1是评价冷反射的一个重要的参数<sup>[9-10]</sup>。



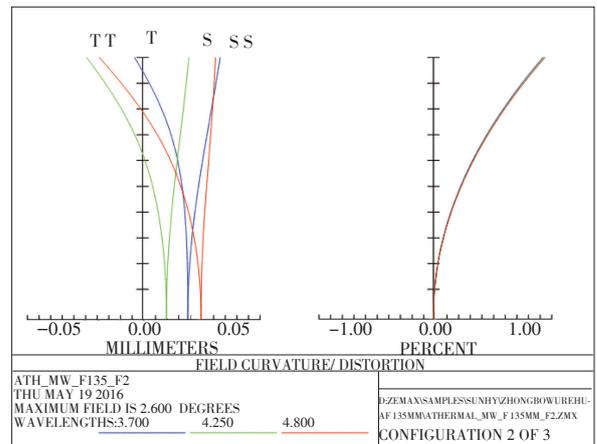
(a)光学系统在20℃时的点列图



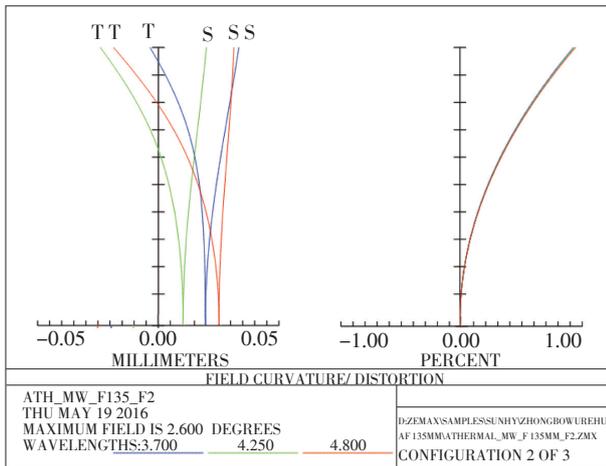
(a)光学系统在20℃时的场曲、畸变图



(b)光学系统在-55℃时的点列图



(b)光学系统在-55℃时的场曲、畸变图



(c) 光学系统在 80 °C 时的场曲、畸变图

图 6 光学系统场曲、畸变图

通常当  $|YNI| \geq 1$  时,表明该面对冷反射的贡献可以忽略。当  $|YNI|$  数值较小时,该表面可能会产生冷反射。表 2 给出了该光学系统各个元件表面的 YNI 数值。从表中可以看出,各个表面的  $|YNI|$  均大于 1。

表 2 冷反射分析

元件表面	YNI 值
1	11.642
2	-4.283
3	1.474
4	-13.32
5	-13.70
6	1.344
7	-2.288
8	-3.48
9	-2.35
10	-1.12

## 4 结 论

从分析可知,衍射光学元件的光热膨胀系数与

其基底材料的温度折射率系数无关,而且在红外波段,其光热膨胀系数与大多数红外材料的光热膨胀系数相反。所以在光学系统中加入衍射元件,可以在减少光学材料使用的情况下实现光学系统的无热化设计。设计的无热化光学系统,在  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内,在空间频率 33 lp/mm 处,各个视场的 MTF 均大于 0.5,接近光学系统的衍射极限,系统尺寸为  $\phi 110\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ ,满足了系统的技术指标要求。此外将衍射面设置在单晶锗基底材料上,完全可通过金刚石车床进行加工。

## 参考文献

- [1] 李林,王焯.环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望[J]. 光学技术, 1997, 23(5): 26-29.
- [2] Behrmann G P, Bown J P. Influence of temperature on diffractive lens performance[J]. Appl. Opt., 1993, 32(14): 2483-2489.
- [3] 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.
- [4] Wood A P. Design of infrared hybrid refractive diffractive lenses[J]. Appl. Opt., 1992, 31(13): 2253-2258.
- [5] 焦明印,冯卓祥.实现消热差和消色差的折衍混合红外光学系统[J]. 光电子·激光, 2001(12): 1226-1229.
- [6] 韩莹,王肇圻,杨新军,等.8~12  $\mu\text{m}$  波段折/衍混合反望远系统消热差设计[J]. 光子学报, 2007, 36(1): 78-80.
- [7] 白剑,孙婷,沈义兵.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): 99721002.
- [8] 梁玲,张良.折衍混合红外光学系统无热设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36: 120-124.
- [9] 张良.凝视型红外光学系统中的冷反射现象[J]. 红外与激光工程, 2006, 35: 8-11.
- [10] 杨正,屈恩世,曹剑中,等.对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 35-38.
- [11] 王宇,牟达李静芳,等.长焦距航空相机光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2014, 29(6): 1-6.