

· 光学设计 ·

## 基于硫系玻璃的长波无热化镜头设计

卢 鑫, 韩 啸

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:** 讨论了长波无热化镜头设计方法, 采用新的玻璃材料硫系玻璃进行了光学系统的设计, 介绍了硫系玻璃的特性和应用方向, 分析了光学镜头无热化的设计方法, 并根据技术要求设计了基于硫系玻璃的长波红外无热化镜头, 通过合理的将硫系玻璃和其他红外材料进行匹配, 通过优化设计, 在宽温度范围内得到了较好的成像效果。

**关键词:** 红外系统; 无热化; 硫系玻璃

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-05-0006-04

## Long-wave Athermal Lens Design Based on Chalcogenide Glass

LU Xin, HAN Xiao

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

**Abstract:** The design method of long-wave athermal lens is discussed. The new chalcogenide glass material is adopted in the design of optical system. The characteristics and applications of the chalcogenide glass are introduced. The design method of athermal optical lens is analyzed. And the long-wave infrared athermal lens with chalcogenide glass is designed on the basis of technical requirements. By matching the chalcogenide glass with other infrared materials reasonably, through system optimized design, a better imaging effect is obtained in a wide temperature range.

**Key words:** infrared system; athermalization; chalcogenide glass

针对远距离探测的长波红外镜头, 通常采用制冷型探测器, 为了目标能量的更多获取, 可以采用小  $F$  数的探测器, 可以更有效的提升探测器距离。针对超远距离高热量的目标, 需要分辨目标大小, 因此需要较高的探测分辨率。对于较大温度范围内的成像设备, 因为温度的变化, 通常分辨率会受到较大影响。

因此, 对于定焦红外镜头, 通常需要采用无热化设计的方式, 设计中采用硫化锌材料和锗材料的配合来实现, 但无热化效果有限, 系统较为复杂, 镜片较多。二元光学衍射元件虽然能有效改善无热化效果, 但是其加工制备难度较大, 不利于降低成本。硫系玻璃由于有较低的热折射率变化, 并具有

一定的热膨胀率, 通过和其他红外材料镜片配合, 可以有效的替代硒化锌、硫化锌等材料, 以及二元光学衍射元件, 提升系统的无热化效果。

文中介绍硫系玻璃特点, 光学被动无热化设计原理, 基于无热化方法设计了一个长波镜头, 光学镜头部分采用硫系玻璃材料, 系统  $F$  数为 2, 焦距为 43.7 mm, 在工作温度  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的范围内, 消除了温度对成像效果的影响, 同时对系统成像进行了分析。

### 1 硫系玻璃特性

硫系玻璃是一种以 VIA 族元素 S、Se、Te 为主要

组份的红外光学材料,它具有较小的折射率温度系数( $dn/dT=55\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,约为Ge单晶的八分之一)极宽的红外光谱透过特性、易于精密模压成型和大口径制备等特点<sup>[1-3]</sup>。其中,Ge-Sb-Se硒基玻璃是一种性能优良的无砷环保红外玻璃材料,光谱透过率相对于其他材料同样较宽,在0.8~14  $\mu\text{m}$ 之间具有较高透过率。目前常用的硫系玻璃主要为美国AM公司的AMTIR系列玻璃,德国的IG系列玻璃等。在国内,湖北新华光信息材料有限公司、中国材料建筑科学总院、宁波大学、舜宇红外科技、上海硅酸研究所等数家单位也在进行硫系玻璃的研制和生产。表1列举常用进口牌号硫系玻璃的相关特性。

表1 常用几种硫系玻璃的特性参数

玻璃/牌号	AMTIR-3	IG4	IG5	ASIR@1
材料	Ge-Sb-Se	Ge <sub>10</sub> As <sub>30</sub> Se <sub>50</sub>	Ge <sub>28</sub> As <sub>12</sub> Se <sub>60</sub>	Ge <sub>22</sub> As <sub>20</sub> Se <sub>50</sub>
透过波长/ $\mu\text{m}$	1.0-12	0.7-12	0.7-12	1.0-12
热膨胀系数/ $(\times 10^{-6}/\text{K})$	14	20.4	14	17
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$	4.67	4.47	4.66	4.40
热电导率/ $\text{W}\cdot\text{mK}^{-1}$	0.22	0.18	0.25	0.28
转变温度/ $^{\circ}\text{C}$	278	225	285	292
努氏硬度/GPa	1.50	1.12	1.13	1.70
光学热常数/ $dn/dt$	35(3.4 $\mu\text{m}$ )	30(3.4 $\mu\text{m}$ )	76(3.4 $\mu\text{m}$ )	75(3.4 $\mu\text{m}$ )
$(\times 10^{-6}/\text{K})$	91(10.6 $\mu\text{m}$ )	36(10.6 $\mu\text{m}$ )	91(10.6 $\mu\text{m}$ )	55(10.6 $\mu\text{m}$ )

由表1可以看到,硫系玻璃相对于其他红外材料具有以下优点:

(1)使用温度高,由于硫系玻璃都是锗基材料形成,锗材料本身的物理特性显示,由于温度升高,其内部自由载流子速率提高,使材料透过率降低。达到150~200  $^{\circ}\text{C}$ 以上的温度时,锗材料几乎不透光。对于硫系玻璃,由于AS, Sb, Se等化合物的加入,改变其内部结构特性,温度升高时,其透过率下降较小,最大使用温度可以在200  $^{\circ}\text{C}$ 以上。

(2)硫系玻璃具有较低的热折射率值,其 $dn/dt$ 比较小,有利于系统在较大温度变化下的折射率稳定,典型的Se基硫系玻璃的热折射率系数为0.000 050~0.000 090/ $^{\circ}\text{C}$ ,为锗材料的1/5<sup>[4]</sup>。有效的降低系统设计难度,减少系统的复杂程度。

## 2 光学被动无热化

光学被动消热设计是利用光学材料热特性差

异,通过不同材料的合理匹配来消除环境温度温度影响,结构简单、可靠性好。为了实现消热差和复消色差,需要合理匹配透镜的光学材料和镜头的机械材料。根据像差理论和光学被动消热设计原理,若要同时校正色差、二级光谱和消热差,需要同时满足以下条件<sup>[5]</sup>。

$$\Phi = \frac{1}{h_1} \sum h_i \Phi_i \quad (1)$$

$$\Delta f_b = \left( \frac{1}{h_1} \Phi \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 c_{1i} \Phi_i) \quad (2)$$

$$\Delta f_{2b} = \left( \frac{1}{h_1} \Phi \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 c_{2i} \Phi_i) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_b}{\partial T} = \left( \frac{1}{h_1} \Phi \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_i \Phi_i) \quad (4)$$

$$T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g \quad (5)$$

其中, $\Phi$ 为系统总的光焦度; $k$ 为透镜数量; $\Phi_i$ 为第 $i$ 片镜片的光焦度; $h_i$ 为近轴像高; $f_b$ 为光学系统后截距; $c_1$ 和 $c_2$ 为透镜归一化色差系数; $T$ 为透镜的归一化热差系数; $n$ 为材料折射率; $\alpha_g$ 为透镜材料的热涨系数。

光学系统设计时,为了使系统达到消热差的目的,在消色差的前提下,透镜材料的热离焦量,同结构材料热膨胀导致的像面移动保持一致,其满足的条件为<sup>[6]</sup>

$$-\sum_{i=1}^k \left( \frac{h_i}{h_1} \right)^2 T_i \Phi_i = \alpha_h \Phi \quad (6)$$

其中, $\alpha_h$ 为结构材料的热涨系数。

通过恰当的匹配系统透镜的光焦度,选择合适的结构镜筒材料,满足消热差的条件,可以得到理想的光学结构。表2为光学系统设计指标。

表2 光学系统设计指标

波段	7.7~10.3 $\mu\text{m}$
视场角	10 $\times$ 10 $^{\circ}$
探测器分辨率	320 $\times$ 256
探测器像元尺寸	30 $\mu\text{m}$
$F\#$	2
透过率	$\geq 80\%$
焦距	43.7 mm
半视场 MTF	$\geq 0.5$
工作温度	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$

### 3 设计结果

作为系统中玻璃的选择,同时采用了锗材料,硫化锌材料作为材料匹配,设计了一个应用于远距离探测的长波无热化镜头<sup>[7]</sup>。

由于镜头焦距较长,经过计算,系统圆视场约为 $16^\circ$ ,故采用一次成像即可实现光学效果,同时轴向尺寸可以控制较小,系统结构较简单。镜头由4片镜片组成,采用3种材料校正色差。在材料选择上,第一片采用锗材料,镜片引入较大负光焦度,第二片镜片采用IRG206硫系玻璃材料,第三片采用硫化锌材料,第四片采用IRG206硫系玻璃材料,三种材料配合消色差和其像差。镜筒采用铝材料,其线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ mm}/^\circ\text{C}$ 。经过设计优化,得到如图1的镜头光路图<sup>[8]</sup>。

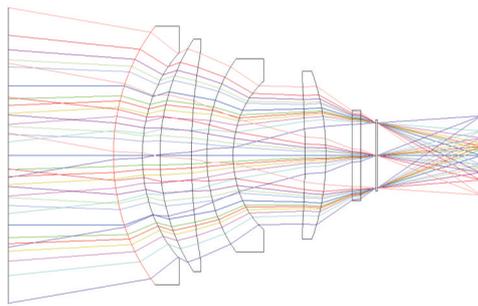


图1 长波无热化镜头光路图

图2为 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 温度下光学系统点列图。

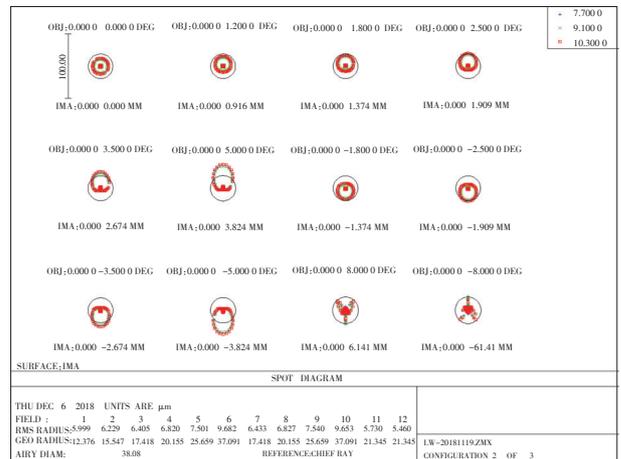
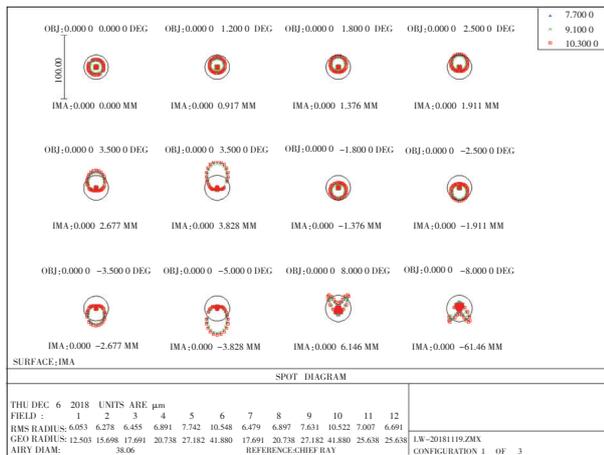
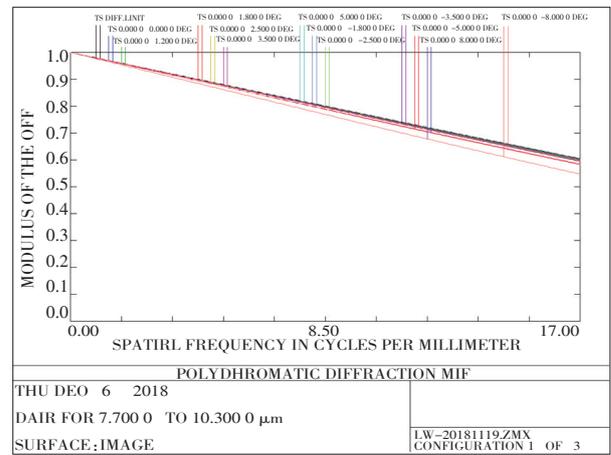


图2  $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 温度下光学系统点列图

图3为 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 温度下光学系统传递函数图。



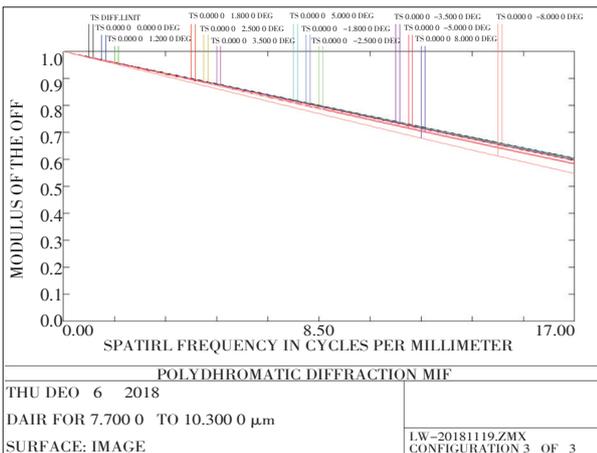
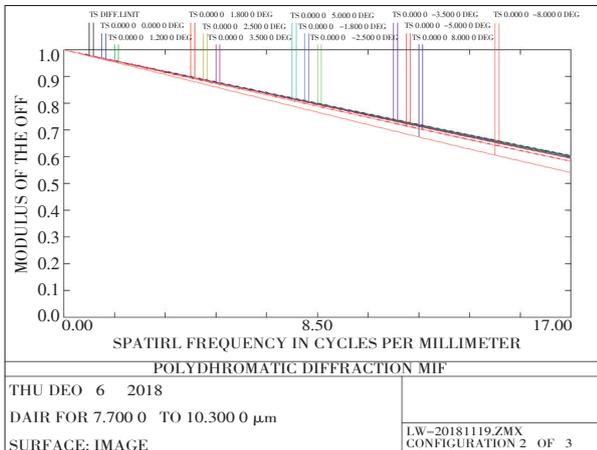


图3 -40 °C~60 °C温度下光学系统传递函数图

由上图可以看到,系统在-40 °C~60 °C温度下,系统点斑变化较小,可以满足使用要求,同时系统传函几乎没有变化,可以看到,采用使用硫系玻璃进行系统无热化设计,可以较好的提升光学系统的无热化效果。

### 4 结 论

硫系玻璃作为一种宽波段的红外材料,具有较

低的热折射率系数,有利于系统无热化设计,同时具有易加工,低成本等工程优势,适合红外成像设备大批量多用途的使用。通过采用国产系列的硫系玻璃参数,列举了硫系玻璃的特点和优势,分析了光学被动无热化的条件,利用3种材料匹配消色差和热差,进行长波无热化镜头设计,达到了较好的成像效果。所设计的长波无热化镜头,采用国产硫系玻璃材料设计,替代进口硫系玻璃材料,可广泛应用于探测、瞄准设备、导头引等装备中,满足低成本,高可靠性的要求<sup>[9-10]</sup>。

### 参考文献

- [1] 史广维,张新,王灵杰,等.新型硫系玻璃在低成本热成像系统设计中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4):615-619.
- [2] 戴世勋,陈惠广,李茂忠,等.硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 847-852.
- [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] 刘琳.中波红外大相对孔径非制冷热像仪光学系统的研究[D]. 苏州:苏州大学, 2010.
- [5] 付强,张新.基于硫系玻璃的中波红外光学系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44:5.
- [6] 王学新,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): 129-133.
- [7] 谭乃悦,许中杰,王睿.基于四透镜光学系统的鬼像形成研究[J]. 光电技术应用, 2018, 33(1): 1-5.
- [8] 张宗存,孔倩倩,杨宇,等.水下目标高精度彩色三维成像系统设计[J]. 光电技术应用, 2018, 33(2): 9-12.
- [9] 苏敏,金雨晴,任晗,等.增益系数对环形腔激光器输出特性的影响[J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 17-20.
- [10] 娄淑君,田晨光,盛新志.新型阶跃纤芯微结构包层抗弯曲大模场面积光纤[J]. 光电技术应用, 2018, 33(4): 1-8.