

基于硫系玻璃的中波红外光学系统无热化设计

付 强^{1,2}, 张 新¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 硫系玻璃作为优良的消色差和消热差红外材料, 是红外光学系统中关键光学元件的理想候选材料, 文中利用硫系玻璃实现中波红外光学系统无热化设计。首先分析了温度变化对红外光学系统的影响; 其次分析了常用硫系玻璃的各方面特性, 并总结了硫系玻璃的优点; 最后利用硫系玻璃, 镜筒材料选择最常用的铝合金材料, 设计了一个工作于中波红外的二次成像全球面无热化成像系统。设计结果表明: 在 0~100 °C 温度范围内, 光学系统的成像质量优异, 具有良好的无热化能力。使用硫系玻璃可实现低成本高性能中波红外光学系统。

关键词: 红外材料; 热成像系统; 无热化设计; 硫系玻璃

中图分类号: TN213 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)05-1467-05

Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses

Fu Qiang^{1,2}, Zhang Xin¹

- (1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Chalcogenide glasses are excellent achromatic and athermalized infrared materials. They are the ideal candidate for key optical components in infrared optical systems. In this paper, chalcogenide glasses were used to achieve athermalization of the medium-wave infrared optical system. Firstly, the effect of temperature variation on infrared optical systems was introduced. Secondly, some aspects of properties for common chalcogenide glasses were analyzed and the advantages of chalcogenide glasses were summarized. Finally, an athermal medium-wave infrared optical system working in the manner of secondary imaging was designed. The most common aluminum alloy material was used as house material. Design results show that the image quality of the optical system is excellent in the temperature range of 0–100 °C. High-performance medium-wave infrared optical systems can be achieved by using chalcogenide glasses with a low-cost.

Key words: infrared material; thermal imaging systems; athermal design; chalcogenide glasses

收稿日期: 2014-09-10; 修订日期: 2014-10-15

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新项目

作者简介: 付强(1985-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计研究。Email: fuqianghit@163.com

导师简介: 张新(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事成像、非成像光学系统的设计方面研究。Email: optlab@ciomp.ac.cn

0 引言

对于红外光学系统,当环境温度发生变化时,由于光学材料和机械材料的热效应将使得红外光学系统:光学材料折射率变化、光学元件曲率半径变化、以及光学元件厚度和空气间隔变化。这些变化可能导致严重的热离焦,从而使红外光学系统的像质下降,图像模糊不清,对比度下降,最终影响整机系统的性能^[1],为此需要采用无热化技术消除温度的影响。

对于定焦距红外光学系统,目前其无热化技术主要采用光学被动式。光学被动式特点为:结构简单、尺寸较小、质量轻、无需供电和可靠性高^[2]。目前文献中有关光学被动式红外光学系统无热化的报道主要针对一次成像光学系统;同时为了减少元件数量,大多在系统中采用衍射面和非球面^[2-4]。而在中长波红外遥感光学系统中,由于对背景辐射杂光抑制的要求,需要设计成100%冷光阑效率;同时为了使光学系统口径适当且易加工,同时满足特定的空间布局要求,系统多采用二次成像设计方式。

工程应用中,3~5 μm 中波红外区常用的光学材料中只有硅、锗、硫化锌、硒化锌等,且这几种材料价格昂贵,生产工艺复杂。当用到非球面或衍射面时,红外材料加工还要采用单点金刚石车削技术,制约了生产周期和制造成本,限制了红外系统的应用。近年来,硫系玻璃的使用越来越普遍,该材料具有成本低、折射率温度系数小、可模压成型等优点,可作为

优良的消色差和消热差红外材料,是红外光学系统中关键光学元件的理想候选材料^[5]。

文中首先介绍了硫系玻璃的特点;其次介绍了光学被动式无热化设计的原理;最后基于光学被动式无热化设计方法,设计了一个二次成像中波红外光学系统,光学系统全部元件均采用硫系玻璃,系统 F 数为2,焦距为30 mm,全视场为23.2°,工作波段3.7~4.8 μm 。对最终的成像系统进行了分析,该系统在0~100 °C的温度范围内消除了温度变化对像质的影响,成像质量满足使用要求。

1 硫系玻璃特性

硫系玻璃是指以周期表 VIA 族元素 S、Se、Te 为主引入一定量其它金属或非金属元素形成的非晶态材料^[6]。硫系玻璃种类很多,近年来随着红外探测器价格下降和红外成像仪在民用领域应用加快,硫系玻璃正逐步取代单晶锗成为应用于热成像仪镜头的极佳候选材料。目前,常见的硫系玻璃主要为美国的 Amorphous Materials 公司的 AMTIR 系列、德国的 Vitron GMBH 公司的 IG 系列和法国的 Umicore 红外玻璃的 GASIR 系列^[7-8]。国内硫系玻璃生产单位有湖北新华光信息材料有限公司、武汉理工大学、中国建筑材料科学研究总院、宁波大学、宁波舜宇红外科技^[9]、上海硅酸盐研究所、华东理工大学等,目前初步掌握了小批量硫系玻璃的生产技术和精密模压技术。表1中列出三家商业公司几种常用牌号硫系

表1 几种常用硫系玻璃的光学、热学和力学性质参数

Tab.1 Optical, thermal and mechanical properties of some common chalcogenide glasses

Characters/Trademark	AMTIR-1	AMTIR-3	IG3	IG4	IG5	GASIR@1	GASIR@2
Composition	Ge-As-Se	Ge-Sb-Se	Ge ₃₀ As ₁₂ Se ₃₂ Te ₂₅	Ge ₁₀ As ₁₀ Se ₃₀	Ge ₃₇ As ₁₂ Se ₆₀	Ge ₂₂ As ₂₁ Se ₃₃	Ge ₂₀ As ₁₂ Se ₆₀
Transmission range/ μm	0.7-12	1.0-12	0.7-12	0.7-12	0.7-12	1.0-12	1.0-12
Density/g·cm ³	4.4	4.67	4.84	4.47	4.66	4.40	4.70
Thermal expansion/($\times 10^{-6}$ /K)	12	14	13.4	20.4	14	17	16
Specific heat/J·gK ⁻¹	0.30	0.28	0.32	0.37	0.33	0.36	0.34
Thermal conductivity/W·mK ⁻¹	0.25	0.22	0.22	0.18	0.25	0.28	0.23
Transition temperature/°C	368	278	275	225	285	292	200
Knoop hardness/GPa	1.70	1.50	1.36	1.12	1.13	1.70	-
Young's modulus/GPa	32	31	22	20.5	22.1	18	19
Shear modulus/GPa	13	12	8.9	8.5	8.5	-	-
Dispersion	202(4 μm)	176(4 μm)	153(4 μm)	203(4 μm)	180(4 μm)	196(4 μm)	183(4 μm)
Thermo-optic coefficient dn/dT ($\times 10^{-6}$ /K)	77(3.4 μm)	35(3.4 μm)	130(3.4 μm)	30(3.4 μm)	76(3.4 μm)	75(3.4 μm)	-
	72(10.6 μm)	91(10.6 μm)	145(10.6 μm)	36(10.6 μm)	91(10.6 μm)	55(10.6 μm)	58(10.6 μm)

玻璃的光学性质、热学性质和力学性质参数。

从上表中可以看出,硫系玻璃的透光区域从近红外区一直延伸到远红外区域。与其他常用红外光学材料相比,硫系玻璃具有以下优点:

(1) 具有较低的原材料价格,较高的使用温度。硫系玻璃含锗量较少,对昂贵的锗资源消耗低,故原材料价格较低,大约是常用红外材料的一半左右。另外,由于锗的禁带宽度及自由载流子吸收与温度有关,随着温度升高透过率下降,在大约 80℃时,变得不透光,在 200℃时,透射比将接近于零,所以锗不能在高温下使用。硫系玻璃的最大使用温度在 200℃以上,在某些环境中可以不用隔热结构设计。

(2) 与硅和锗相比,硫系玻璃具有更小的折射率温度系数。折射率温度系数(dn/dt),即折射率随温度的变化率,锗在 3~12 μm 的折射率温度系数平均值为 0.000 4/℃。当温度变化较大时,热离焦量很大,需要采用某种形式的无热化设计。而典型的 Se 基硫系玻璃的折射率温度系数为 0.000 050~0.000 090/℃,仅为锗的 1/5 左右,可作为优良的消热差材料。这在一定程度上降低了设计难度,同时也节约了成本。

(3) 与晶体类红外材料相比,硫系玻璃材料的最大优点就是成型工艺简单,可利用精密模压成型工艺直接加工包括球面、非球面和非球面投射棱镜在内的多种硫系玻璃红外光学元件,使加工成本较晶体材料显著降低。

2 光学被动式无热化原理

光学被动无热化技术利用光学材料热特性之间的差异,通过不同特性材料之间的合理组合以消除温度的影响,从而获得无热化效果。

光学被动式无热化方法在设计时系统光焦度分配需满足总光焦度、消轴向色差、消热差 3 个方程。假设系统有 k 个分离式的光学元件组成,则其满足的 3 个方程^[10]如下:

总光焦度分配需满足:

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

式中: ϕ 为系统的光焦度; h_i 为第一近轴光线在第 i 个透镜入射表面的径向高度; ϕ_i 为 i 个透镜的光焦度。

色差系数须满足:

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum (h_i^2 \omega_i \phi_i) = 0 \quad (2)$$

式中: ω_i 为第 i 个透镜的色散因子。它定义为色散引起的光焦度的相对变化,数值上等于材料阿贝数的倒数。

热差系数须满足:

$$\frac{df_b^T}{dt} = \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum (h_i^2 x_i \phi_i) = \alpha_h L \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 个透镜的消热差系数; α_h 为镜筒的线膨胀系数; L 为机械结构件的长度。

3 设计实例

3.1 设计指标

该设计实例采用的是 320×256 中波红外斯特林制冷焦平面探测器,探测器像元尺寸为 30 μm。光学技术指标如表 2 所示。

表 2 系统技术指标

Tab.2 System technology index	
Parameter	Value
Spectrum range/μm	3.7~4.8
Focal length/mm	30
F/#	2
Full FOV/(°)	23.2
Working temperature/℃	0~100
Athermal target	MTF>0.5 (@16.7 lp/mm)

3.2 设计结果

从杂散光抑制能力和减小光学系统元件尺寸等角度考虑,采用二次成像工作方式。二次成像包含两个镜组,成像镜组和中继镜组。成像镜组用于对目标成一次中间像,中继镜组将一次中间像成像到红外焦平面上,并实现 100%冷阑匹配。

若将入瞳放置在成像镜组上,由于对角线视场半视场角为 11.6°,将使得中继镜组的尺寸过大。为了使成像镜组和准直镜组的口径合理可接受,采用光阑前置的方式。

经过设计分析,该镜头由 7 片镜片组成,成像镜组元件数确定为 3 片,材料选择分别为 IG4-ZnS-IG4,成像镜组自身校正色差。中继镜组需要完成光阑匹配和二次成像,同时需要校正成像镜组的残余像差。中继镜组采用 4 片光学元件,材料选择分别为

IG4-IG4-ZnS-IG4。光学系统全部表面采用球面,没有使用非球面或衍射面。镜筒材料选择为最常用的铝合金材料,其线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

经过设计优化,得到的设计结果如图 1 所示。图 2~4 为该系统在 20°C 、 0°C 和 100°C 时的 MTF 曲线。由图中可见,在各工作温度下红外成像系统的 MTF 满足要求,成像质量良好。

若对此光学系统进行批量化生产,为了进一步减少成本,可以将全部元件换成硫系玻璃。IG5 硫系玻璃与 ZnS 材料光学性能接近,故将上述光学设计中的 ZnS 元件更换为 IG5。成像镜组元件数仍为 3 片,材料选择分别为 IG4-IG5-IG4。中继镜组仍采用 4 片光学元件,材料选择分别为 IG4-IG4-IG5-IG4。光学系统全部表面采用球面。镜筒材料选择仍为最常用

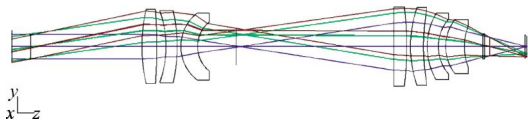


图 1 硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统光路图

Fig.1 Layout of system designed with chalcogenide glasses and common infrared materials

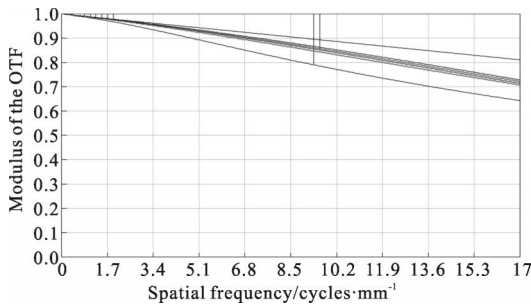


图 2 硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统 20°C 时的 MTF
Fig.2 MTF of system designed with chalcogenide glasses and common infrared materials at 20°C

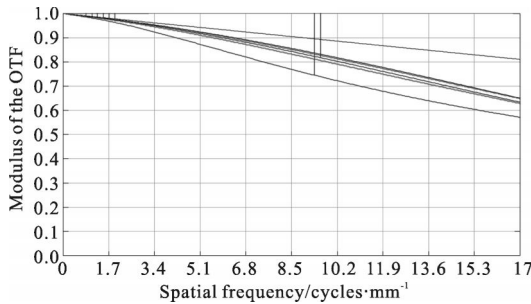


图 3 硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统 0°C 时的 MTF
Fig.3 MTF of system designed with chalcogenide glasses and common infrared materials at 0°C

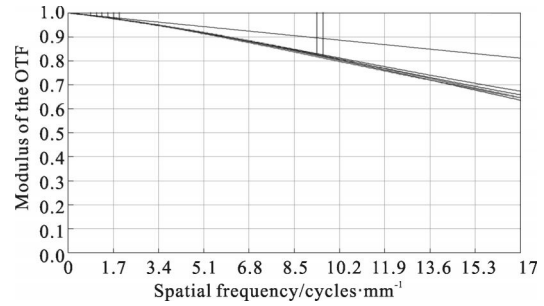


图 4 硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统 100°C 时的 MTF
Fig.4 MTF of system designed with chalcogenide glasses and common infrared materials at 100°C

的铝合金材料。

经过设计优化,得到的设计结果如图 5 所示,图中为全部采用硫系玻璃的低成本红外系统。图 6~8 为该系统在 20°C 、 0°C 和 100°C 时的 MTF 曲线。由图中可见,全温度范围内 MTF 变化极小, 16.7 lp/mm 处的 MTF 值均在 0.65 以上,可以保证系统在全温度范围内良好成像。

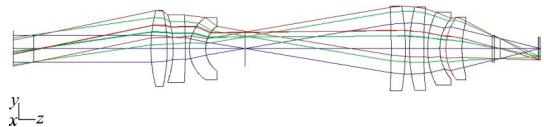


图 5 采用硫系玻璃设计的系统光路图

Fig.5 Layout of system designed with chalcogenide glasses

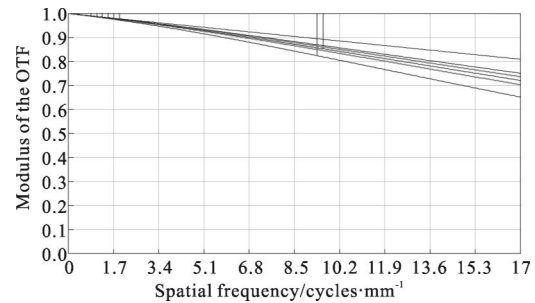


图 6 采用硫系玻璃设计的系统 20°C 时的 MTF

Fig.6 MTF of system designed with chalcogenide glasses at 20°C

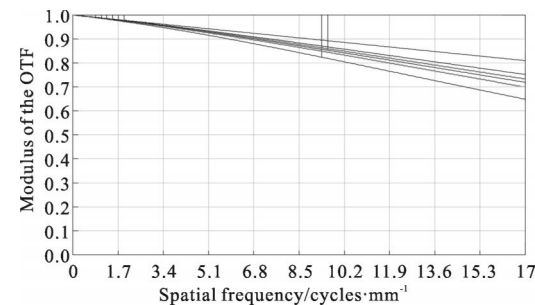


图 7 采用硫系玻璃设计的系统 0°C 时的 MTF

Fig.7 MTF of system designed with chalcogenide glasses at 0°C

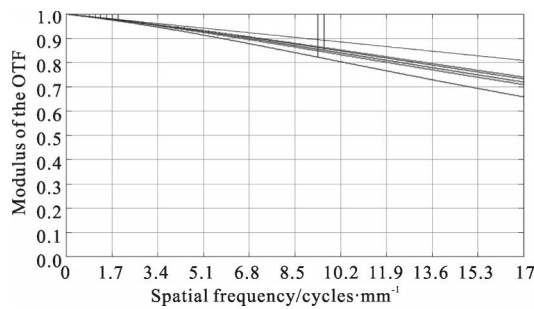


图8 采用硫系玻璃设计的系统 100 °C时的 MTF

Fig.8 MTF of system designed with chalcogenide glasses at 100 °C

4 结论

硫系玻璃扩充了红外光学系统设计的材料选择范围。该材料具有低价格、较小的折射率温度系数、可模压成型等优点,可以保证系统光学性能的同时实现低成本。文中讨论了温度变化对光学系统结构参数的影响,利用光学被动式无热化技术,仅采用硫系玻璃,设计了成像质量良好的全球面被动无热化二次成像中波红外光学系统。硫系玻璃可广泛应用于侦察、瞄准等大温度范围下工作的光学系统中,实现高像质、低成本和高可靠性的要求。

参考文献:

- [1] Jamieson T H. Thermal effects in optical systems [J]. *Opt Eng*, 1981, 20(2): 156-160.
- [2] Liu Lin. Study on fast speed optical system of uncooled MWIR imager [D]. Suzhou: Soochow University, 2010. (in Chinese)
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.
- [3] Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1392-1395. (in Chinese)
- [4] Zhang Yu, Yang Changcheng, Yang Kuntao. Design on athermal infrared diffractive/refractive hybrid optical system in 8-14 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1535-1538. (in Chinese)
张羽, 杨长城, 杨坤涛. 8-14 μm 波段折衍混合红外光学系统的热补偿设计[J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1535-1538.
- [5] Shi Guangwei, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al. Application of the new chalcogenide glasses in low cost thermal imaging systems design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 615-619. (in Chinese)
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.
- [6] Yang Peizhi, Liu Liming, Zhang Xiaowen, et al. Research progress of long-wavelength infrared optical materials [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2007, 23 (4): 645-647. (in Chinese)
杨培志, 刘黎明, 张小文, 等. 长波红外光学材料的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2007, 23(4): 645-647
- [7] Guimond Y, Bellec Y. Molded GASIR infrared optics for automotive application [C]//SPIE, 2006, 6206(62062L): 1-6.
- [8] Guimond Y, Bellec Y. A new moldable infrared glass for thermal imaging and low cost sensing [C]//SPIE, 2007, 6542 (654225): 1-6.
- [9] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 847-852. (in Chinese)
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.
- [10] Chen Luji, Feng Shengrong. A compact athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(4): 203-205. (in Chinese)
陈吕吉, 冯生荣. 一种紧凑型的红外消热差光学系统[J]. *红外技术*, 2007, 29(4): 203-205.