

新型硫系玻璃在低成本热成像系统设计中的应用

史广维^{1,2}, 张 新¹, 王灵杰¹, 何锋¹, 张建萍¹

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

摘 要: 随着非制冷红外探测器价格的不断下降, 昂贵的红外光学元件成为限制非制冷红外成像系统成本的重要因素。新型硫系玻璃在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的大气窗口有着良好的透射性, 同时具有价格低、可模压成型、折射率温度系数小等特点, 较为适合非制冷红外成像系统。对常用红外材料和新型硫系玻璃的各方面特性进行比较, 总结了新型硫系玻璃的优点, 并使用新型硫系玻璃分别对两种温度范围的光学系统进行了设计, 详细阐述了该材料在低成本热成像系统设计中的使用方法。结果表明: 新型硫系玻璃既能满足光学性能, 又在一定程度上解决了高成本的问题, 可应用于批量生产的红外光学系统之中。

关键词: 红外材料; 热成像系统; 光学设计; 硫系玻璃

中图分类号: O435.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)04-0615-05

Application of the new chalcogenide glass in design of low cost thermal imaging systems

Shi Guangwei^{1,2}, Zhang Xin¹, Wang Lingjie¹, He Fengyun¹, Zhang Jianping¹

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the reduction in cost appeared recently in uncooled infrared detectors, the expensive infrared optical components restrict the cost of uncooled infrared imaging systems. The new chalcogenide glass has good transparence in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and $8\sim 12\ \mu\text{m}$ atmospheric windows, and also has advantages of the low cost, moldable and small temperature coefficient of refractive index, so it is suitable to uncooled infrared imaging systems. Every aspect of properties for common infrared materials and new chalcogenide glass was compared, the advantages of new chalcogenide glasses was summarized, and the optical system design with two demanded temperature ranges using new chalcogenide glass was separately proceeded, the usage of new chalcogenide glass in low cost thermal imaging systems design was represented in details. The result shows that the new chalcogenide glass not only suffice optical capability, but also solve the problem of high cost to a certain extent, it can be applied in batch production of infrared optical systems.

Key words: infrared material; thermal imaging systems; optical design; chalcogenide glass

收稿日期: 2010-08-15; 修订日期: 2010-09-05

基金项目: 吉林省与中国科学院科技合作资金(2007SYHZ0029)

作者简介: 史广维(1983-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计和像差理论研究。Email: dqsgw@yahoo.cn

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

0 引言

热成像系统^[1]是指摄取景物热辐射分布图像,并将其转换为人眼可见图像的装置。由于热成像系统具有良好的夜间观察能力,因此被广泛应用于军事领域。然而,较高的价格限制其在了民用市场的发展。近年来,在应用需求的牵引下,非制冷 IRFPA 探测器发展非常迅速,价格不断降低,越来越被民用市场所接受。目前,法国 ULIS 公司已经出售阵列大小为 1024×768,像元尺寸为 17 μm 的高分辨率非制冷 IRFPA 探测器。焦平面阵列大小为 320×240、像元尺寸 35 μm、NETD 小于 0.1 °C(F/1.0,帧频为 30 Hz,温度为 25 °C)的探测器应用非常普遍^[2-3]。这些非制冷 IRFPA 探测器的光谱相应范围普遍为 8~14 μm 远红外区,但是能够透射远红外光谱且满足一定物理、化学性质的光学材料却极其有限。

在工程应用中,8~14 μm 远红外区常用的光学材料只有锗、硫化锌、硒化锌等^[4]。这几种材料价格昂贵,生产工艺复杂。当用于非球面或衍射面时,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,新型硫系玻璃的使用越来越普遍,该材料成本低、折射率

温度系数小、可模压成型。文中首先介绍了新型硫系玻璃的特点,运用它进行了光学设计,并对最终的成像系统进行了分析。可以看出,新型硫系玻璃在批量生产的远红外光学系统中有着广阔的应用前景。

1 新型硫系玻璃的特性

硫系玻璃^[5]是指玻璃中含有硫族元素 S、Se 和 Te 中的一种或几种,同时包含 Ge、Si、As、Sb 等元素中的一种或几种,还可以包含其他元素。硫系玻璃种类非常多,近年来,出现了由 Ge、As、Se 或 Ge、Sb、Se 几种材料按不同比例组成的化合物玻璃,称为新型硫系玻璃。目前,常见的新型硫系玻璃有:比利时 Umicore 光电材料公司的生产 GASIR 系列^[6-7];美国 LightPath 光学仪器公司生产的 Black Diamond 系列;我国国晶辉红外光学科技有限公司生产的 GG 系列。表 1 中列出了常用红外材料和新型硫系玻璃的光学性质、热学性质及力学性质。

从表 1 中可以看出,新型硫系玻璃的透光区域从近红外区一直延伸到远红外区域,材料的吸收系数和折射率不均匀性也都很小,保证了材料的光学性能。与其他常用的红外光学材料相比,新型硫系玻璃还具有以下优点:

表 1 常用红外材料和新型硫系玻璃的光学、热学及力学性质

Tab.1 Optical, thermal and mechanical properties of common infrared materials and new chalcogenide glass

	Ge ₂₂ As ₂₃ Se ₅₅	Ge ₂₀ Sb ₁₂ Se ₆₈	Ge ₃₃ As ₁₂ Se ₅₅	Ge	ZnSe	CVD ZnS
Refractive index@10 μm	2.494 37	2.600 2	2.497 6	4.003	2.406 52	2.200 16
Abbe number 8~12 μm	120	84.6	127	942	57.8	22.8
Transmission range/μm	1~15	1~16	0.9~14	1.8~17	0.5~16	1~12
Homogeneity/10 ⁻⁵	10	10	10	Mono:2~10; Poly:5~20	0.3	<10
Absorption coeff. @10 μm/cm ⁻¹	0.01	0.02	0.07	Mono:0.02; Poly:0.03	0.000 5	0.2
dn/dt@10 μm 20 °C/10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹	55	58	60	396	61	41
Expansion coeff./10 ⁻⁶	17	13.5	12	5.9	7.5	6.7
Specific heat/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	360	340	300	310	340	470
Thermal conductivity/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	38	30	24	60	28	17
Max useable temperature/°C	250	200	250	80	—	—
Melt temperature/°C	292	258	368	937	1 500	—
Density/kg·mm ⁻³	4.40	4.67	4.40	5.32	5.27	4.09
Knoop hardness/kg·mm ⁻²	180	150	170	780~900	120	250
Young modulus/GPa	18	21.8	21.5	100~150	67	74
Max diameter/mm	150	100	110	300~600	150~900	200~900
Moldable	Y	Y	Y	N	N	N

(1) 具有较低的原材料价格和较高的使用温度。新型硫系玻璃中含锗量较少, 所以原材料价格较低, 约为常用红外材料的一半。另外, 由于锗的禁带宽度及自由载流子吸收与温度有关, 随着温度的升高, 透过率下降, 在大约 80°C 时变得不透光, 在 200°C 时, $8\sim 12\mu\text{m}$ 透射比接近于零, 所以不能在高温下使用锗。新型硫系玻璃的最高使用温度为 200°C , 在某些环境中可以不用隔热结构设计。

(2) 与锗相比, 新型硫系玻璃具有更小的折射率温度系数。折射率温度系数, 即折射率随温度的变化率, 锗的折射率温度系数为 $0.000396/^{\circ}\text{C}$ 。当温度变化较大时, 热离焦量也很大, 需要采用某种形式的无热化设计。新型硫系玻璃的折射率温度系数仅为锗的 $1/5$ 左右, 在光学系统焦距较短且温度变化较小的情况下, 无需无热化设计。这在一定程度上降低了设计难度, 同时也节约了成本。

(3) 新型硫系玻璃具有较低的转变温度, 可以模压成型。使用模压成型技术可以大批量生产出球面、非球面和带有衍射面的复杂光学元件。与传统的打磨-抛光生产工艺相比, 该技术具有高效、快速、低成本等特点。由比利时 Umicore 光电材料公司发展的模压成型技术已成功的用于宝马汽车夜视系统的远红外光学系统制造。使用 632.8nm 的 Zygo 干涉仪进行检测。对于直径 36mm 的凸球面透镜, 模压成型表面和理论设计表面的最大偏离为 $0.6\mu\text{m}$, 如图 1(a) 所示, 对于直径 28mm 的凹球面, 最大偏离为 $0.4\mu\text{m}$, 如图 1(b) 所示。

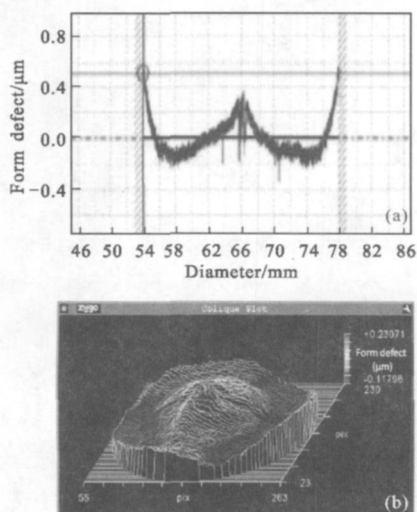


图1 实际模压透镜精度测量
Fig.1 Accuracy measurement of moulded lens

对于工作在 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的远红外光学系统, 如此大的表面缺陷影响很小。经测量, 模压成型透镜的表面粗糙度为 10nm (如图 2 所示), 无需额外抛光。

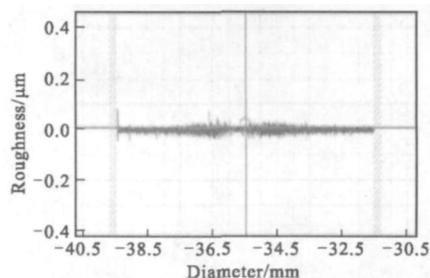


图2 模压元件表面粗糙度测量
Fig.2 Measurements of the surface roughness of a moulded lens

2 光学设计比较

2.1 新型硫系材料在温度变化范围较小的短焦系统设计中的应用

此设计实例采用的是 320×240 长波红外非制冷焦平面探测器, 探测器像元尺寸为 $38\mu\text{m}$ 。光学技术指标如表 2 所示。

表2 系统技术指标

Tab.2 System technology index

Spectrum range	Focal length	F number	Half field of view
$8\sim 12\mu\text{m}$	75mm	1.4	5.8°

调制传递函数要求在 13.8lp/mm 处大于 0.5。使用锗、硒化锌和新型硫系玻璃中的 Black Diamond 进行光学设计, 并且比较分析设计结果。3 种材料设计均采用如图 3 所示的光学结构, 每个元件的后表面均为非球面。

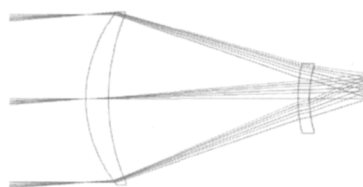


图3 系统光学结构
Fig.3 Layout of system

使用硒化锌和 Black Diamond 设计的系统第一片元件的后表面为衍射面, 目的是为了消除色差的影响, 锗的色散较小, 不必校正色差。3 个系统在不同温

度时,各个视场 MTF 的平均值如图 4 所示,空间频率为 13.8 lp/mm。

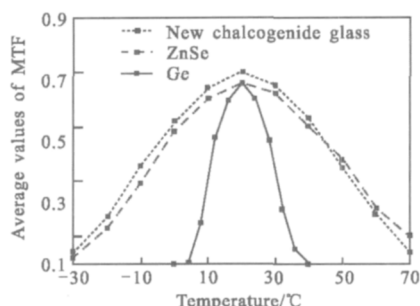


图 4 3 个系统在温度变化时的 MTF

Fig.4 MTF of three systems variance with temperature

可以看出,用锗设计的系统的成像质量受温度影响极其严重,当温度变化范围超出 20 ± 7 °C 时,热离焦量引起的调制传递函数下降,小于 0.5;而使用硒化锌和 Black Diamond 设计的系统在温度变化为 20 ± 20 °C 时,成像质量仍然能够满足要求,这主要是由于锗的折射率温度系数较大造成的。如果考虑批量化生产,使用新型硫系材料设计的红外系统将具有更低原材料成本和加工成本。当然,采用锗设计的系统可以使用某种形式的无热化设计来解决热失配问题,但无疑会增加成本。

因此,新型硫系材料适合温度变化范围较小且批量化生产的红外光学系统,可有效地解决成本压力。

2.2 新型硫系材料在无热化系统设计中的应用

由温度引起的单透镜的热离焦量可用下式计算^[8]:

$$\Delta f = f \chi_{f,r} \Delta T \quad (1)$$

式中: f 为单透镜的焦距; $\chi_{f,r}$ 为光热膨胀系数; ΔT 为环境温度的变化量。由公式(1)可知,当温度变化范围较大且系统焦距较长时,系统的热离焦量很大。

为了保证光学系统的成像质量,需要采取措施补偿热离焦。首先,采用常用红外材料基于光学被动式无热化补偿的方法对表 2 中的光学系统进行重新设计,要求工作环境的温度在 $-40 \sim 60$ °C,尼奎斯特频率处的 MTF 在 0.55 以上,系统长度小于 100 mm。经过理论计算和优化,最终的设计结果如图 5 所示。

图中的红外成像系统由 5 个透镜组成,透镜的材料依次为 ZnSe、ZnS、Ge、ZnSe、Ge,其中,第 4 片透镜的前表面为二次曲面,其他均为球面。图 6~图 8 为该系统在 20 °C、-40 °C 和 60 °C 时的 MTF 曲线。从图中可见,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。

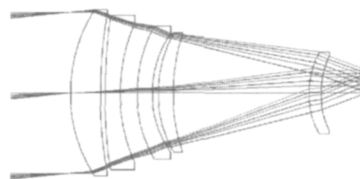


图 5 使用常用红外材料设计的系统光路图

Fig.5 Layout of system designed with common infrared materials

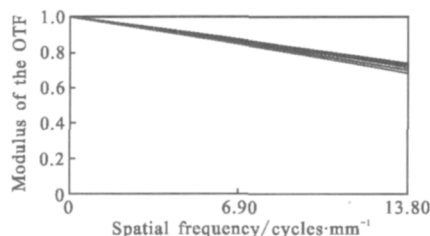


图 6 常用红外材料设计的系统 20 °C 时的 MTF

Fig.6 MTF of system designed with common infrared materials at 20 °C

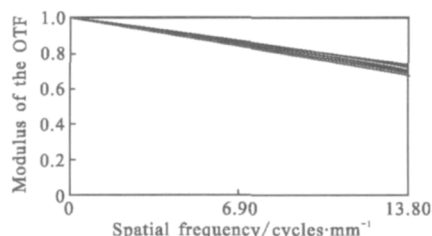


图 7 常用红外材料设计的系统 -40 °C 时的 MTF

Fig.7 MTF of system designed with common infrared materials at -40 °C

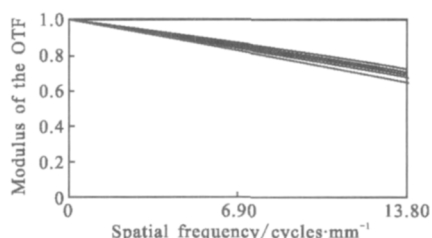


图 8 常用红外材料设计的系统 60 °C 时的 MTF 曲线

Fig.8 MTF of system designed with common infrared materials at 60 °C

该系统具有较高的材料成本和加工成本。为了减少成本,可以将其中的部分元件换成新型硫系玻璃,并且将非球面尽量放在该材料的透镜上;使用模压技术可以进一步降低加工成本,该方法类似于光学塑料在民用可见光相机中的应用。图 9 为新型硫系材料与常用红外材料组合设计的低成本红外系统。图中的红

外成像系统由5个透镜组成,透镜的材料依次为硫系玻璃、ZnS、Ge、硫系玻璃、Ge,其中,第4片透镜的前表面为二次曲面,其他均为球面。图10~图12为该系统在20℃、-40℃和60℃时的MTF曲线,在规定的温度范围内,成像质量满足要求。

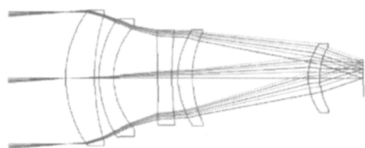


图9 新型硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统光路图

Fig.9 Layout of system designed with new chalcogenide glass and common infrared materials

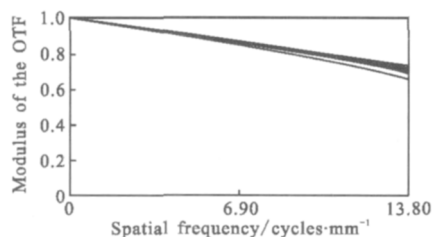


图10 新型硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统
20℃时的MTF

Fig.10 MTF of system designed with new chalcogenide glass and common infrared materials at 20℃

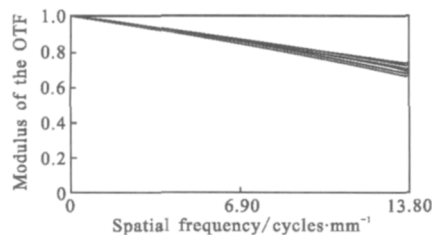


图11 新型硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统
-40℃时的MTF

Fig.11 MTF of system designed with new chalcogenide glass and common infrared materials at -40℃

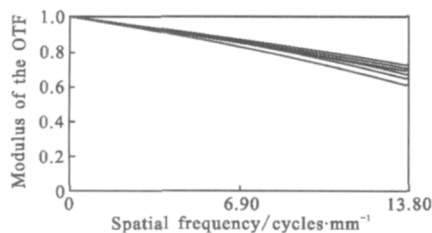


图12 新型硫系玻璃与常用红外材料组合设计的系统
60℃时的MTF

Fig.12 MTF of system designed with new chalcogenide glass and common infrared materials at 60℃

由上述分析可知,新型硫系玻璃与常用红外材料的适当组合可以减少批量生产的红外系统的成本。

3 结 论

新型硫系玻璃扩充了红外光学系统设计的选择范围。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,可以在保证系统光学性能的同时实现低成本。在批量生产的低成本民用红外光学系统中,新型硫系玻璃是优先选择的材料;在高性能的无热化红外光学系统中,锗、硫化锌和硒化锌等仍然是非常重要的材料,但是新型硫系玻璃与它们的配合使用可节约成本。

参考文献:

- [1] Zhou Liwei. Target Detection and Recognition [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [2] Li Yingwen, Chen Fusheng, Luo Yan. Latest development and application market of uncooled thermal imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 257-260. (in Chinese)
李颖文, 陈福胜, 罗艳. 非制冷热成像最新发展和应用前景[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(4): 257-260.
- [3] Xing Suxia, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 441-444. (in Chinese)
邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 441-444.
- [4] Fisher R. Optical System Design [M]. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [5] 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.
- [6] Guimond Y, Bellec Y. Molded GASIR infrared optics for automotive application [C]//SPIE, 2006, 6206(62062L): 1-6.
- [7] Guimond Y, Bellec Y. A new moldable infrared glass for thermal imaging and low cost sensing[C]//SPIE, 2007, 6542(654225): 1-6.
- [8] Yang Changcheng, Li Shenghui. Athermalisation design of middle-wavelength infrared optical systems [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(6): 28-31. (in Chinese)
杨长城, 李升辉. 中波红外光学系统无热化设计[J]. *光学与光电技术*, 2006, 4(6): 28-31.