

文章编号: 1672-8785(2020)02-0007-06

基于硫系玻璃的光学被动式 红外无热化镜头设计

葛琳琳 王世先 张 瑞 闫学纯

(河南中光学集团有限公司, 河南 南阳 473000)

摘 要: 为了提升产品的可靠性, 设计了一款工作在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的光学被动式无热化红外镜头。该镜头无需调焦即可在宽温度范围内清晰成像。系统选用可压型加工、适合大批量生产的新型硫系玻璃。本文中的光学镜头选用三片式结构, 基于折/衍射原理设计而成, 是一款光学被动式无热化镜头。该镜头的焦距为 $42\ \text{mm}$, F 数为 0.9 , 可匹配像元大小为 $14\ \mu\text{m}$ 、像元数为 640×512 的非制冷长波红外探测器。这种镜头在 $-40\ ^\circ\text{C}\sim 50\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内以及在全视场范围内均能清晰成像, 其调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)在工作温度和全视场范围内均大于 $0.38@36\ \text{lp/mm}$, 接近衍射极限。

关键词: 光学系统设计; 光学被动式; 无热化; 硫系玻璃; 折/衍射

中图分类号: TB133 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.02.002

Design of Optical Passive Infrared Non-thermal Lens Based on Chalcogenide Glass

GE Lin-lin, WANG Shi-xian, ZHANG Rui, YAN Xue-chun

(Henan Costar Group CO., Ltd., Nanyang 473000, China)

Abstract: In order to improve the reliability of the product, an optical passive non-thermal infrared lens working in the $8\text{--}14\ \mu\text{m}$ waveband is designed, which can image clearly in a wide temperature range without focusing. The system selects a new type of chalcogenide glass that can be processed by pressing and is suitable for mass production. The optical lens adopts three-piece structure. It is a passive non-thermal lens which is based on the principle of refraction/diffraction. The focal length of the system is $42\ \text{mm}$ and the F -number is 0.9 . The lens matches an uncooled long-wave infrared detector with pixel size of $14\ \mu\text{m}$ and pixel number of 640×512 . The lens can clearly image in the temperature range of $-40\ ^\circ\text{C}\text{--}50\ ^\circ\text{C}$ and in the full field-of-view. The modulation transfer function (MTF) is greater than $0.38@36\ \text{lp/mm}$ at the operating temperature in the full field-of-view, which is close to the diffraction limit.

Key words: optical system design; optical passive; non-thermalization; chalcogenide glass; refraction/diffraction

收稿日期: 2020-02-07

作者简介: 葛琳琳(1989-), 女, 安徽淮北人, 硕士生, 工程师, 主要从事光学设计工作。

E-mail: linlingehb@163.com

0 引言

随着科学技术的不断发展,非制冷长波红外探测器的探测能力不断提高,其噪声等效温差(Noise-Equivalent Temperature Difference, NETD)减小,灵敏度增大,系统趋向小型化;同时其生产成本比制冷红外探测器低。因此非制冷探测的市场需求快速增长。相对于制冷红外系统,非制冷红外系统的探测距离较小。一般需加大相对孔径,以提升非制冷红外系统的探测距离。

为在较宽的温度范围内保持优良的成像质量,红外镜头必须采用无热化设计^[1]。当前的无热化设计有机械被动式、电子主动式和光学被动式等3种样式。本文中,红外镜头采用光学被动式设计,结构简单紧凑,精度高,可靠性好。该镜头适用于各种高精度产品,如各类图像融合产品(与微光/白光等镜头进行图像融合)。

硫系玻璃^[2-4]可采用压型生产工艺,因此适于大批量生产。本文设计了一款基于折/衍射^[1, 5-8]原理且仅采用三片式结构的光学被动式长波红外无热化物镜。

1 无热化原理

要实现无热化设计,系统必须满足光焦度方程、消轴向色差方程、消二级光谱方程和消热差方程^[9]:

$$\sum h_i \varphi_i = \varphi \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_i (h_i^2 C_i \varphi_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum_i \frac{h_i^2 \varphi_i P}{v_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum_i h_i^2 \chi_i \varphi_i = \alpha_H L \quad (4)$$

式中, φ_i 是第*i*个透镜的光焦度; h_i 为第*i*个透镜第一面近轴光线的入射高度; φ 是镜头的总光焦度; C_i 为镜头光学材料的色散因子,其值等于阿贝数*v*的倒数; P 为镜头光学材料的相对部分色散; χ_i 是光热膨胀系数; α_H 是镜头结构件材料的线膨胀系数; L 为镜头结构

件的总长度。

折射光学材料的阿贝数(色散的倒数)的定义为

$$v_2 = \frac{n_2 - 1}{n_1 - n_3} \quad (5)$$

式中, n_1 、 n_2 、 n_3 分别为波长 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的折射率,其中 $n_1 > n_2 > n_3$, $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ 。

折射光学材料的相对部分色散为

$$p_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 - n_3} \quad (6)$$

衍射光学材料的阿贝数(色散的倒数)定义为

$$v_2^D = -\frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} \quad (7)$$

衍射光学材料的相对部分色散为

$$p_{12}^D = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} \quad (8)$$

通过对比式(5)与式(7)可看出,衍射元件与折射元件的阿贝数符号相反。所以,将衍射元件与折射元件组合起来可以消色差。通过对比式(6)和式(8)可看出,对折射元件而言,材料折射率随波长变化的曲线斜率逐渐变小,表明当波段间隔相同时折射光学元件在短波波段有较大的相对部分色散,在长波波段的相对部分色散相对较小;衍射光学元件的相对部分色散仅与波长有关。这表明折/衍射混合光学系统具有良好的消色差和二级光谱校正的能力。

折射光学元件的光热膨胀系数为^[10]

$$x_{f,r} = a_g - \frac{1}{n-1} \left(\frac{dn}{dt} - n \frac{dn_0}{dt} \right) \quad (9)$$

式中, a_g 为光学材料的线膨胀系数, n 为光学材料的折射率, n_0 为介质的折射率。

衍射光学元件的光热膨胀系数为

$$x_{f,d} = 2a_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dt} \quad (10)$$

从式(9)和式(10)中可以看出,折射光学元件的光热膨胀系数与衍射光学元件的不同,表明折/衍射系统有利于热差的校正。

2 光学系统设计

本文中红外光学被动式无热化系统的设计

表 1 红外光学被动式无热化物镜的参数

参数	数值
焦距	42 mm
工作波段	8~14 μm
F 数	0.9
探测器像元数	640×512
探测器像元大小	14 μm

参数见表 1。

镜头的结构件选用铝合金材料, 其中铝合金的线膨胀系数是 $2.36 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。另外, 为了减小镜头的质量和体积, 采用三片物镜结构。光学系统如图 1 所示, 其总长度仅为 51 mm。

2.1 光学系统的材料和结构选择

本文采用三片式结构, 材料选用新型硫系玻璃, 其中一个面是非球面, 另一个面是衍射面。通过加入非球面, 可以很好地校正球差。通过加入衍射面, 可以很好地校正色差和热差。本文采用折/衍射混合的方式来实现光学被动式无热化红外物镜的设计。

2.2 像质评价

图 2 为镜头在 20 $^\circ\text{C}$ 、-40 $^\circ\text{C}$ 和 50 $^\circ\text{C}$ 时的 MTF 图, 分别描述了 0、0.7 和 1 三个视场

的子午、弧矢方向的 MTF 值。可以看出, 所有视场的 MTF 值均大于 $0.38 @ 36 \text{ lp/mm}$ 。MTF 图中最上方的线段为衍射极限。

图 3 为镜头的点列图 (spot 图), 分别描述了 20 $^\circ\text{C}$ 、-40 $^\circ\text{C}$ 和 50 $^\circ\text{C}$ 时弥散斑的大小, 即 0、0.7 和 1 三个视场的 spot 图。在各温度、各视场的弥散斑均方根值 (Root-Mean-Square Radius, RMS RADIUS) 均小于 14 μm 像元大小时, 成像质量能满足要求。

图 4 为光学系统在 20 $^\circ\text{C}$ 、-40 $^\circ\text{C}$ 和 50 $^\circ\text{C}$ 条件下的色差曲线。系统在 8~14 μm 波段的最大色差在三种条件下均小于 3 μm , 红外镜头的色差得到了很好的校正。

图 5 为光学系统在 20 $^\circ\text{C}$ 、-40 $^\circ\text{C}$ 和 50 $^\circ\text{C}$ 时的能量图。从图 5 中可以看出, 本文设计的光学系统约 80% 的能量集中在一个像素以内, 能满足使用需求。

3 结论

本文采用新型硫系玻璃材料设计了一款基于折/衍射原理的大相对孔径的光学被动式无热化红外镜头。结果表明, 该镜头在宽温度范围内成像优良; 在整个视场角范围内, MTF

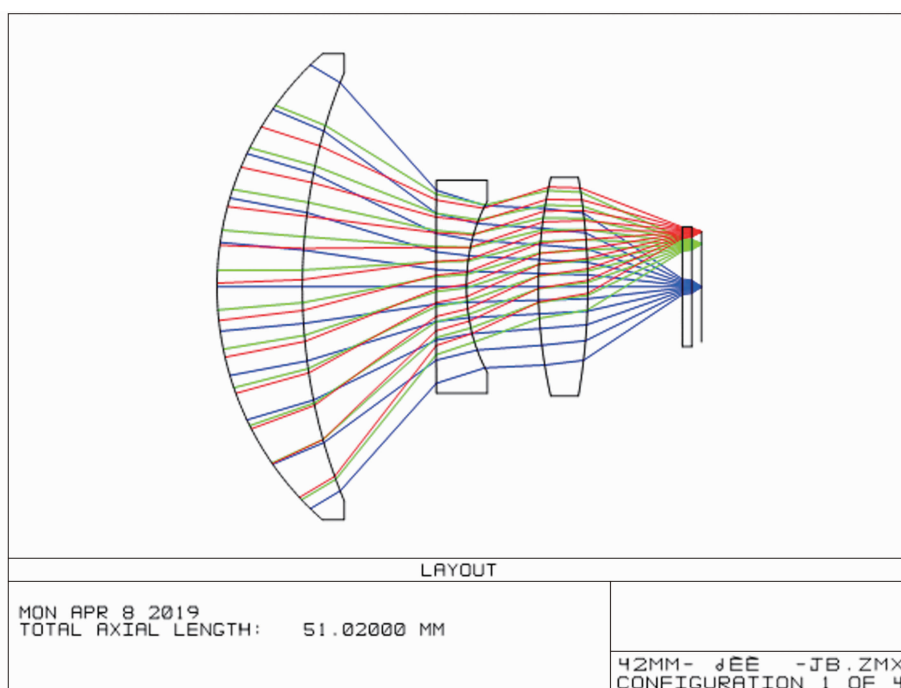


图 1 光路图

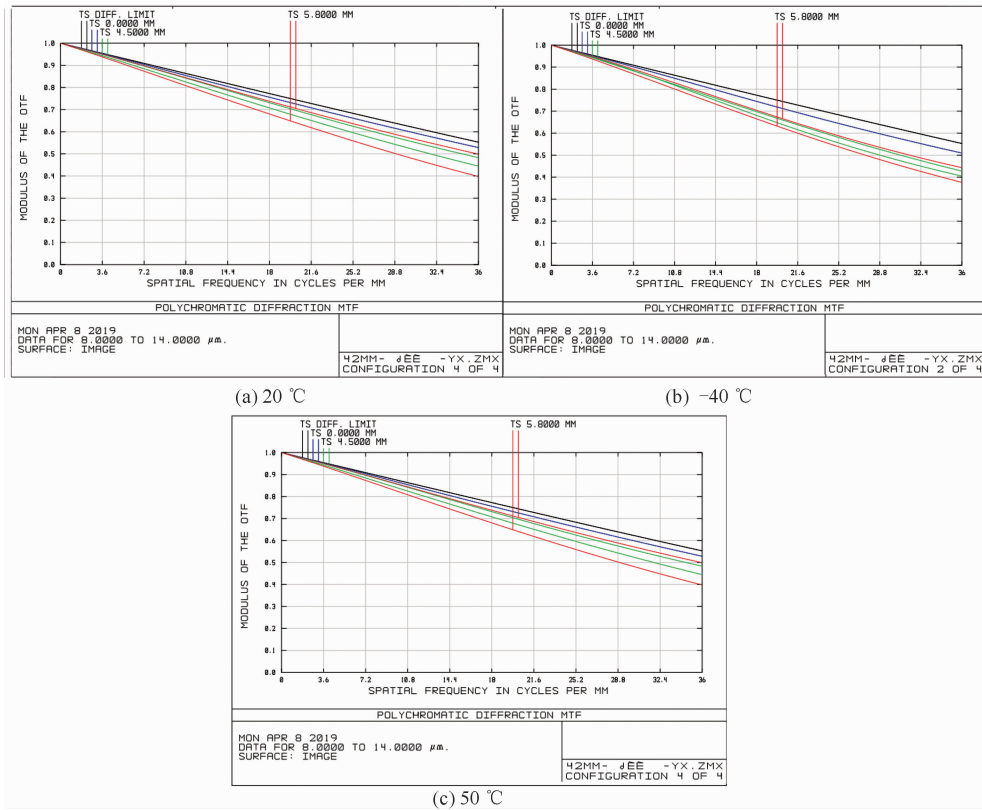


图 2 MTF 图

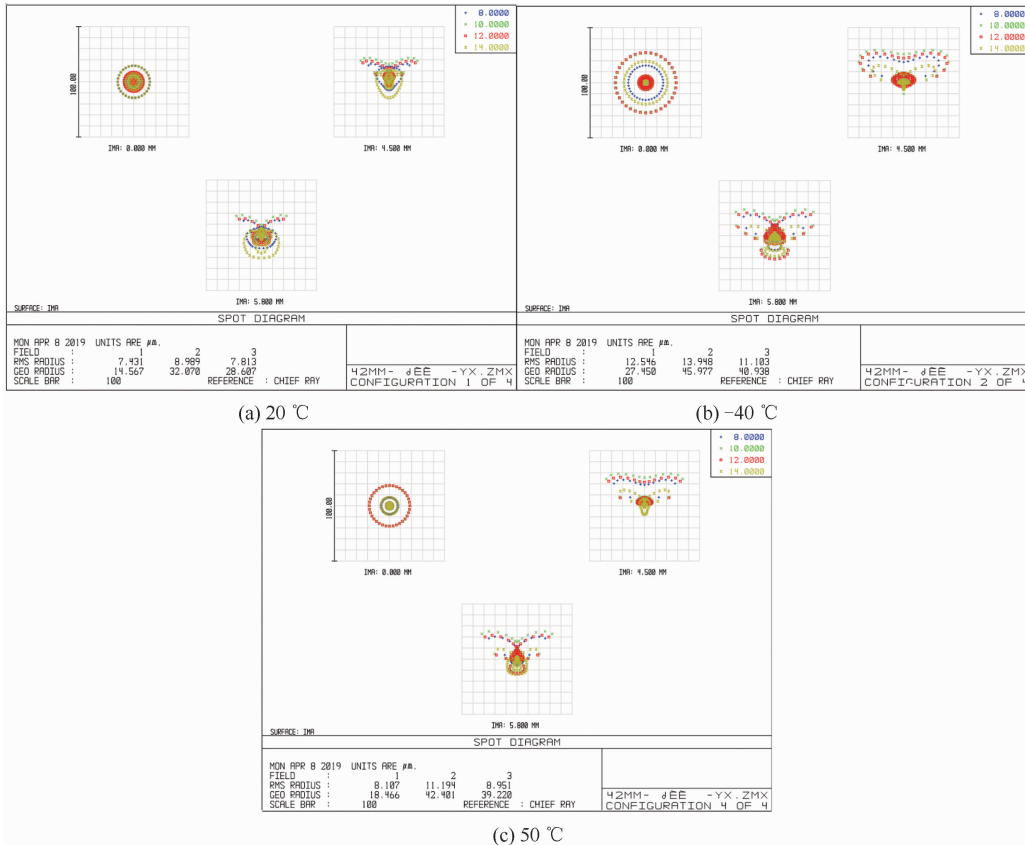


图 3 点列图 (spot 图)

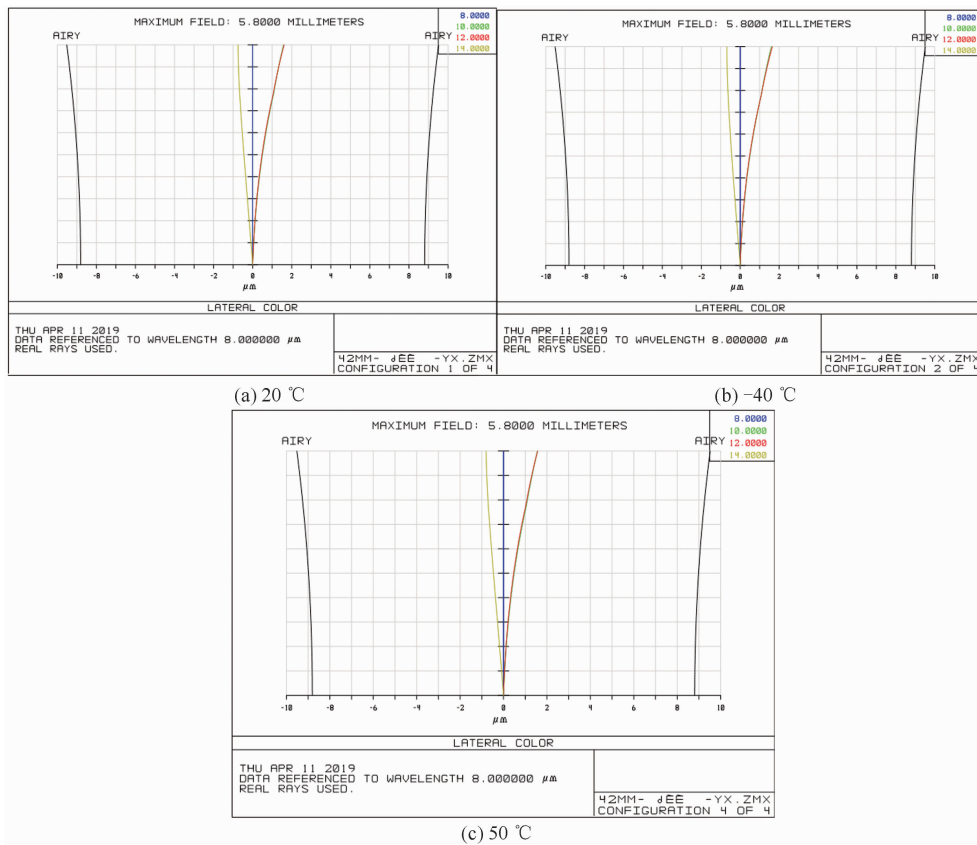


图 4 色差图

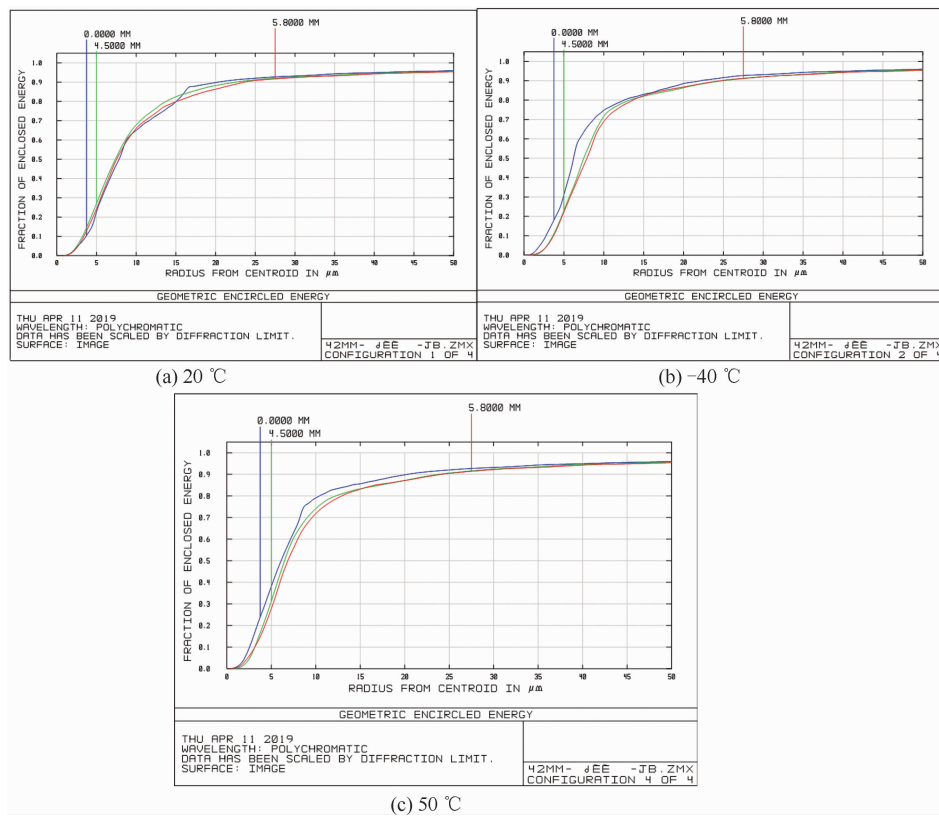


图 5 包围圆的能量图

值均大于 $0.38@36$ lp/mm, 已接近衍射极限。该红外镜头的精度高, 可靠性强, 且操作简便(无需调焦), 结构紧凑, 重量轻, 工作温度范围宽, 成像质量好, 探测距离远, 光轴的稳定性好。这种镜头适用于各种高精度产品(如图像融合产品等), 也可用于其它红外产品。

参考文献

- [1] 王堃, 刘千. 红外 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段折射衍射光学系统的无热化设计 [J]. 电子测试, 2015, 22(2): 111-112.
- [2] 卢鑫, 韩啸. 基于硫系玻璃的长波无热化镜头设计 [J]. 光电技术应用, 2018, 33(5): 6-9.
- [3] 王静, 吴越豪, 姜波, 等. 硫系玻璃在无热化长波红外广角镜头中的应用 [J]. 光子学报, 2016, 45(12): 90-95.
- [4] 王静, 吴越豪, 戴世勋, 等. 硫系玻璃在长波红外无热化连续变焦广角镜头设计中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 165-171.
- [5] 刘小波, 杨洪波, 孙强, 等. 红外折/衍混合光学系统无热化设计 [J]. 光电子技术, 2008, 28(2): 120-122.
- [6] 张婉怡. 红外折衍混合摄远光学系统无热化设计 [J]. 应用光学, 2017, 38(1): 12-18.
- [7] 陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计 [J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2089-2092.
- [8] 李卓, 闫晶, 王远方舟, 等. 折/衍混合民用车载大像面长波红外消热差镜头设计 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(6): 20-23.
- [9] 颜树华. 衍射微光学设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [10] 韩莹, 王肇圻, 杨新军, 等. $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段折/衍混合反摄远系统消热差设计 [J]. 光子学报, 2007, 36(1): 77-80.