

大视场小型无热化长波红外镜组设计

肖纳川, 孙拓, 胡力允, 赵永权, 王双保, 徐智谋, 张学明

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 跟随红外镜头小型化、大视场化的趋势, 利用 ZEMAX 设计了一款大视场无热化小型长波红外镜组。系统匹配 $384 \times 288 @ 17 \mu\text{m}$ 的非制冷型长波红外探测器, 工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。系统 F 数为 1.6, 相比于传统红外镜头, 视场角更大, 全视场达 72° , 尺寸更小, 总长仅为 6.96 mm。主镜头仅用 3 片镜片, 通过两种红外光学材料的搭配以及 6 面非球面实现像差的校正和光学系统的无热化, 工作温度范围覆盖 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 。仿真结果表明, 在空间频率 15 lp/mm 处, 全视场的调制传递函数大于 0.5, 空间频率 30 lp/mm 处, 全视场调制传递函数大于 0.15。同时为了增大红外探测器的填充因子, 提高能量利用率, 在系统中搭配设计了放置于红外传感器前的微透镜阵列。实现了红外光学系统的小型化, 为红外热像仪在智能手机上的应用提供了解决方案。

关键词: 长波红外; 无热化; 大视场; 微透镜阵列

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2024)01-0020-07

Design of Compact Athermalized Long-Wave Infrared Lens Set with Large Field of View

XIAO Nachuan, SUN Tuo, HU Liyun, ZHAO Yongquan, WANG Shuangbao, XU Zhimou, ZHANG Xueming

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Following the trend of miniaturization and large fields-of-view for infrared lenses, we designed a large-field-of-view athermalized compact long-wave infrared lens using ZEMAX. The system matches a $384 \times 288 @ 17 \mu\text{m}$ uncooled long-wave infrared detector with an operating band of $8 \mu\text{m}$ to $12 \mu\text{m}$. The F-number of the system is 1.6. The designed system has a larger field-of-view than a traditional infrared lens, with a full field-of-view reaching 72° . The size of the designed system is small with a total length of only 6.96 mm. The primary lens system lens uses only 3 lenses. Aberration correction and athermalization was realized by combining two infrared materials and six aspherical surfaces. The system has a working temperature range of -40°C to 60°C . Simulation results show that the MTF of the full field-of-view reaches 0.5 at a spatial frequency of 15 lp/mm and 0.15 at a spatial frequency of 30 lp/mm. Further, to increase the filling factor of the infrared detector and improve energy efficiency, a microlens array is placed in front of the infrared sensor. Miniaturization of the infrared optical system was achieved, providing a solution for the application of thermal imaging cameras on smartphones.

Key words: long-wave infrared, athermalization, large field of view, microlens array

0 引言

红外探测器能够探测物体发出的红外辐射, 将物体的温度转化为人眼可见的视觉信息, 且不需要光源照射、抗干扰能力强, 广泛用于军事和民用领域。而设计红外光学系统的一大难点, 就是相比于可见光波

段的玻璃材料, 随着环境温度的变化, 红外玻璃的折射率、曲率半径、厚度等参数都会发生较大的变化, 影响成像质量^[1]。无热化设计能够有效减小温度变化对成像质量造成的影响, 因而成为提升红外光学系统性能的关键。

非制冷型长波红外探测器由于其成本低、体积

收稿日期: 2022-09-16; 修订日期: 2022-11-23.

作者简介: 肖纳川 (2002-), 男, 本科生, 主要研究方向为光学系统设计。E-mail: u202014200@hust.edu.cn。

通信作者: 张学明 (1968-), 男, 讲师, 主要研究方向为激光测试技术与光学设计研究。E-mail: optzhang@163.com。

基金项目: 华中科技大学大学生创新创业训练计划项目 (GD2022031)。

小、重量轻和功耗低,被更加广泛地用于监控安防、设备检测、夜间户外等民用领域。随着民用需求量的不断提高,红外光学系统持续向轻巧、便携的方向发展。智能手机的出现也让红外光学系统作为它的一个模块而备受关注。近年来,我国在非制冷长波红外光学系统的小型化上颇有进展。2017 年,华中科技大学的张凌志等人设计了一款两片式结构长波红外光学系统^[2],总长仅 7.5 mm;2021 年,长春理工大学的田永等人选用折返式结构设计长波红外成像系统^[3],总长 11.5 mm;同年,厦门理工学院的张继艳等人设计一款以硫系玻璃为材料的长波红外光学系统^[4],同时实现了系统的小型化和无热化。如何进一步缩小无热化红外光学系统的尺寸,并使其尽可能采用大面阵的红外探测器,成为红外光学系统发展的趋势之一。

在可见光探测器领域,微透镜阵列往往被集成在 CCD (Charge Coupled Device) 或 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 的第一面,通过将光线会聚在光电二极管上,增大填充因子,从而增大信噪比、提高成像质量。而在红外探测器领域,集成微透镜阵列技术尚不成熟。在此,我们借鉴可见光探测器中的集成微透镜阵列设计,基于微透镜平移算法在系统中设计了一款红外材料微透镜阵列,使其紧贴于探测器表面,有效增大了探测器的填充因子。

1 设计原理

1.1 无热化原理

目前,主要的无热化方法有机电主动式、机械被动式、光学被动式等^[5-7]。其中,光学被动式不需要额外引入机械结构,成本低、质量轻,适用于本文需要设计的小型长波红外镜头。

光学被动式无热化方法利用不同材料热差系数、色差系数及热膨胀系数的不同,使温度变化对各透镜带来的影响得以抵消,让热离焦在要求的温度范围内接近零。对于由 j 个透镜组成的光学系统,其光焦度、色差系数和热差系数需要满足下列方程^[8]。

光焦度方程:

$$\frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^j h_i \Phi_i = \Phi \quad (1)$$

消色差方程:

$$\Delta f_b = \left(\frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \theta_i \Phi = 0 \quad (2)$$

消热差方程:

$$\frac{\partial f_b}{\partial T} = \left(\frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 x_i \Phi_i = 0 \quad (3)$$

式中: h_i 为近轴光线在第 i 个透镜的入射高度,若为密接型透镜组,可认为 $h_i = h_1$; Φ_i 为各个透镜的光焦度; Φ 为全系统的光焦度; x_i 和 θ_i 分别为第 i 个透镜的消热差系数和消色差系数。

1.2 微透镜阵列设计原理

全光学系统的结构简图如图 1 所示。其中微透镜阵列通过将光聚焦在探测器的光电二极管上以提高探测器的填充因子,从而提高信噪比。由于在不同像高处,光线的入射角度不同,在光线入射角大的区域,光线经微透镜会聚后可能无法照射至感光区域,使得边缘像素灵敏度下降,串扰增加。因此需要将微透镜平移一定距离,来让大视场处的光线也能够聚焦在感光区域上。

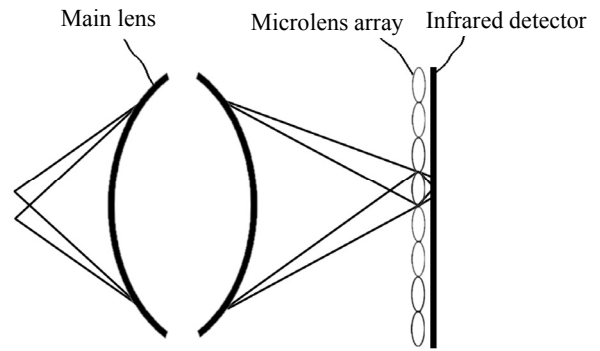


图 1 光学系统结构简图

Fig.1 Structure sketch of optical system

微透镜平移算法有相位差测试像素算法、平面坐标算法、拟合平移函数算法等^[9]。为降低对微透镜制造工艺的要求,使得微透镜阵列中相邻微透镜的间距一致,在这里选择简化的平面坐标算法。设微透镜阵列中心为原点,通过仿真确定坐标轴上最远点的透镜偏移量,从而推导出每一个微透镜的偏移量。该方法需要满足下列公式:

$$M = \frac{\Delta h_{(m,0)}}{am} = \frac{\Delta h_{(0,n)}}{an} \quad (4)$$

$$\Delta h_{(k,l)} = aM \sqrt{k^2 + l^2} \quad (5)$$

式中:探测器像素数量为 $2m \times 2n$; a 为探测器像素的边长; M 为表示单位像高处微透镜偏移量的因子; $\Delta h_{(m,0)}$ 和 $\Delta h_{(0,n)}$ 表示用坐标轴上最大像高处的主光线入射角仿真得到的边缘微透镜偏移量。

2 主镜头设计

2.1 材料选择

为达到消热差和消色差的目的,同时使镜头结构尽可能简单,主镜头选用 3 片透镜,采用两种红外材料。常用的红外材料有 ZnS、Si、GaAs、Ge、ZnSe 等,

价格比较昂贵。而以 Ge、As、Si、Sb 等元素与 S、Se、Te 等元素按照一定比例组合而成的硫系玻璃，相对于传统红外材料而言，具有红外透射率高、折射率温度系数较小、价格低、易于加工等优势^[9]。硫系玻璃材料具有良好的热形变能力，适合模压成型，实现规模化生产。使用硫系玻璃不仅利于系统实现无热化，也利于非球面的加工，降低制造成本并缩短加工周期。本设计采用湖北新华光生产的 IRG203 和 IRG206 两种硫系玻璃，两种材料的光学特性和热特性如表 1 所示。IRG203 折射率低而温度系数高，IRG206 折射率高而温度系数低，通过两者折射率温度系数的差异实现消热差。同时两种材料阿贝数差值较大，利于系统消除色差^[10]。

表 1 IRG203 与 IRG206 在 8~12 μm 的光学特性和热特性
Table 1 Optical and thermal properties of IRG203 and IRG206 (8~12 μm)

Material	Refractive index at 10 μm	Abbe number at 10.6 μm	dn/dT at 10 μm and 20℃/(10 ⁻⁶ /℃)
IRG203	2.5862	86.07	40
IRG206	2.7781	137.71	34

2.2 设计思路

探测器选用阵列 384×288，像元尺寸为 17 μm×17 μm 的非制冷型红外探测器。系统设计指标如表 2 所示。

表 2 光学系统设计指标
Table 2 Design requirements of optical system

Parameters	Value
Wavelength/μm	8 to 12
F#	1.6
Focal length/mm	<6
Field of view/(°)	≥60
Temperature range/℃	-40 to 60
Total Track Length/mm	<7

传统红外镜头为满足对像高的要求，往往镜头尺寸较大，而可见光手机镜头结构能够同时满足大像高、大视场、小尺寸的设计要求。本设计采用一款三片式手机镜头作为初始结构，其结构如图 2。相对于其他手机镜头，它仅用 3 片透镜，能够降低红外镜头的材料和工艺成本，且光圈更大，能够增加系统通光量，更加适合作为红外镜头的初始结构。其中第一、第二块透镜采用 IRG206，第三块透镜采用 IRG203。

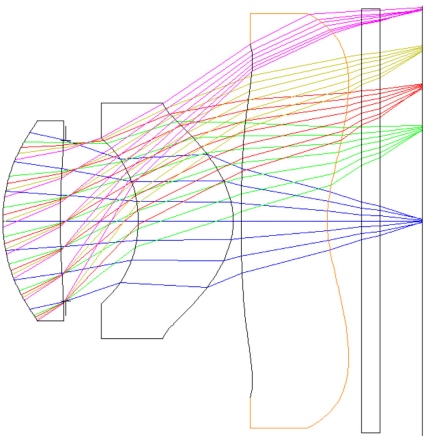


图 2 优化基础的初始结构

Fig.2 The initial structure that serves as the basis for optimization

将系统仿真的波长范围设置为红外波段 8~12 μm，并将材料设置为红外光学材料。由于原可见材料与更换后的红外材料折射率相差很大，故有必要对每个镜片的曲率半径和二次项系数进行缩放，以使光线能够通过整个系统，缩放因子由下式确定：

$$k = \frac{n' - 1}{n - 1} \tag{6}$$

$$k_m = \left(\frac{n - 1}{n' - 1} \right)^{m-1} \tag{7}$$

式中： k 为曲率半径缩放因子； k_m 表示 m 阶非球面多项式系数的缩放因子； n 为原可见材料折射率； n' 为红外材料折射率。

使用操作数限制系统的像高、总长、焦距、玻璃厚度与空气间隔，逐步加入畸变操作数 DIMX、垂轴像差操作数 TRAY、场曲操作数 FCGS 和 FCGT、球差操作数 SPHA、慧差操作数 COMA、像散操作数 ASTI 等，以所有透镜表面的曲率半径、非球面系数和所有厚度为变量，不断调整操作数权重进行优化。当结构陷入局部最小值，无法进一步优化时，便对系统进行手动微调再进行优化，使像差进一步缩小。最后加入 MTFT、MTFS 操作数对系统的综合像差进行校正。

2.3 设计结果

优化后的镜头结构如图 3 所示。系统总长 6.96 mm，焦距 5.77 mm，全视场 72°，像高 2×4.082=8.164 mm，略大于探测器对角线长 8.16 mm。

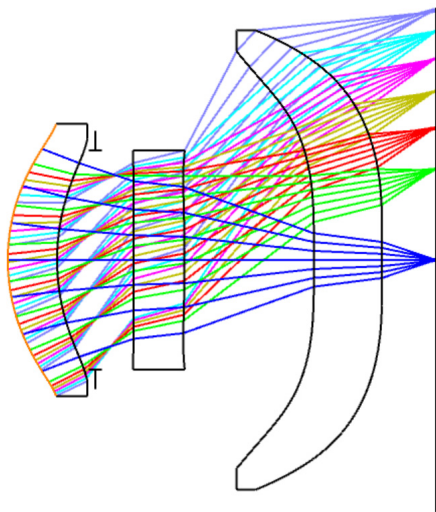


图 3 主镜头结构图

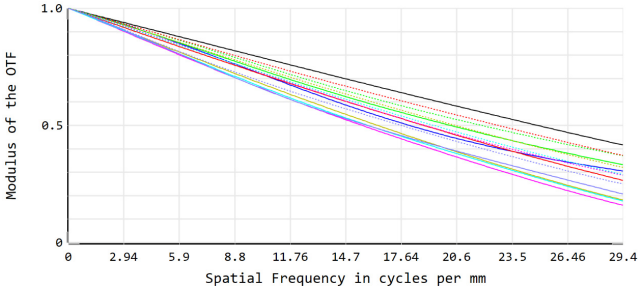
Fig.3 Main lens structure diagram

MTF（Modulation Transfer Function）曲线能够综合评价镜头的成像质量。系统的奈奎斯特采样频率满足^[11]:

$$N=\frac{1000}{2\times a}$$

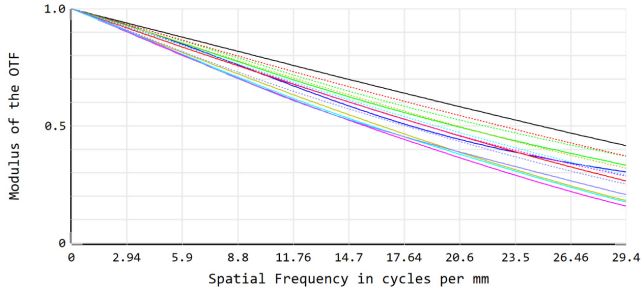
(8)

式中： a 为探测器像素尺寸 $17\mu\text{m}$ ，计算得奈奎斯特频率 $N=29.4\text{lp/mm}$ 。图 4(a)~(c)所示为系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的 MTF 曲线图。在温度区间内，系统在各温度下的 MTF 差距十分微小，全视场 MTF 在 15lp/mm 处均大于 0.5，在 29.4lp/mm 处均大于 0.15，接近衍射极限。



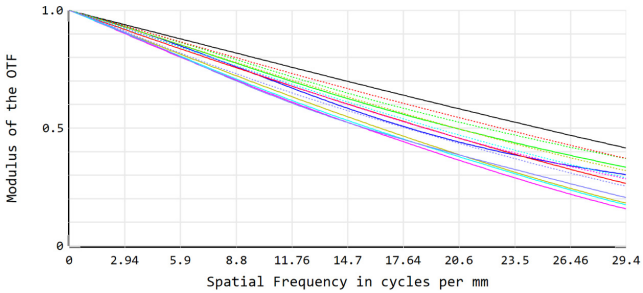
(a) 系统在 -40°C 下的 MTF 曲线

(a) MTF of system at -40°C



(b) 系统在 20°C 下的 MTF 曲线

(b) MTF of system at 20°C



(c) 系统在 60°C 下的 MTF 曲线

(c) MTF of system at 60°C

图 4 系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 下的 MTF 曲线

Fig.4 MTF of system at $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$

光学系统的焦深表达式为^[5]:

$$\delta=\pm 2\lambda\left(F^{\#}\right)^2$$

(9)

将系统参数 $\lambda=10\mu\text{m}$ ， $F^{\#}=1.6$ 代入(9)式，得系统焦深为 $\pm 51.2\mu\text{m}$ 。表 3 给出各温度下系统的后截距及所需的调节量，由表可知，各温度下系统的后截距调节量远小于系统焦深^[12]，系统无需进行手动调焦，可在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 内保持像质稳定。

系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的最大轴向色差如表 4 所示，可见各温度下的轴向色差均小于系统焦深，系统具有很好的消色差效果。

表 3 后截距调节分析

Table 3 Back focal length adjustable distance			
Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	BFL/ μm	Ideal BFL/ μm	Adjust/ μm
-40	875.42	881.92	6.5
-20	877.69	881.97	4.28
0	879.97	882.06	2.09
20	882.23	882.23	0
40	884.50	882.53	-1.97
60	886.76	882.99	-3.77

表 4 各温度下最大轴向色差

Table 4 Maximum axial chromatic aberration at each temperature

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Maximum axial chromatic
	aberration/ μm
-40	32.9537
-20	32.9643
0	32.9768
20	32.9917
40	33.0095
60	33.0301

在各温度下的点列图如图 5 所示，可以看出，系统 0.7 视场内弥散斑尺寸均小于探测器像元尺寸，全视场弥散斑尺寸为 $19.6\mu\text{m}$ ，略大于探测器像元尺寸，

但也在可接受范围内。系统在 20℃ 下的场曲和畸变曲线如图 6 所示，全视场场曲小于 0.1 mm，畸变小于 4%，满足了设计需求。

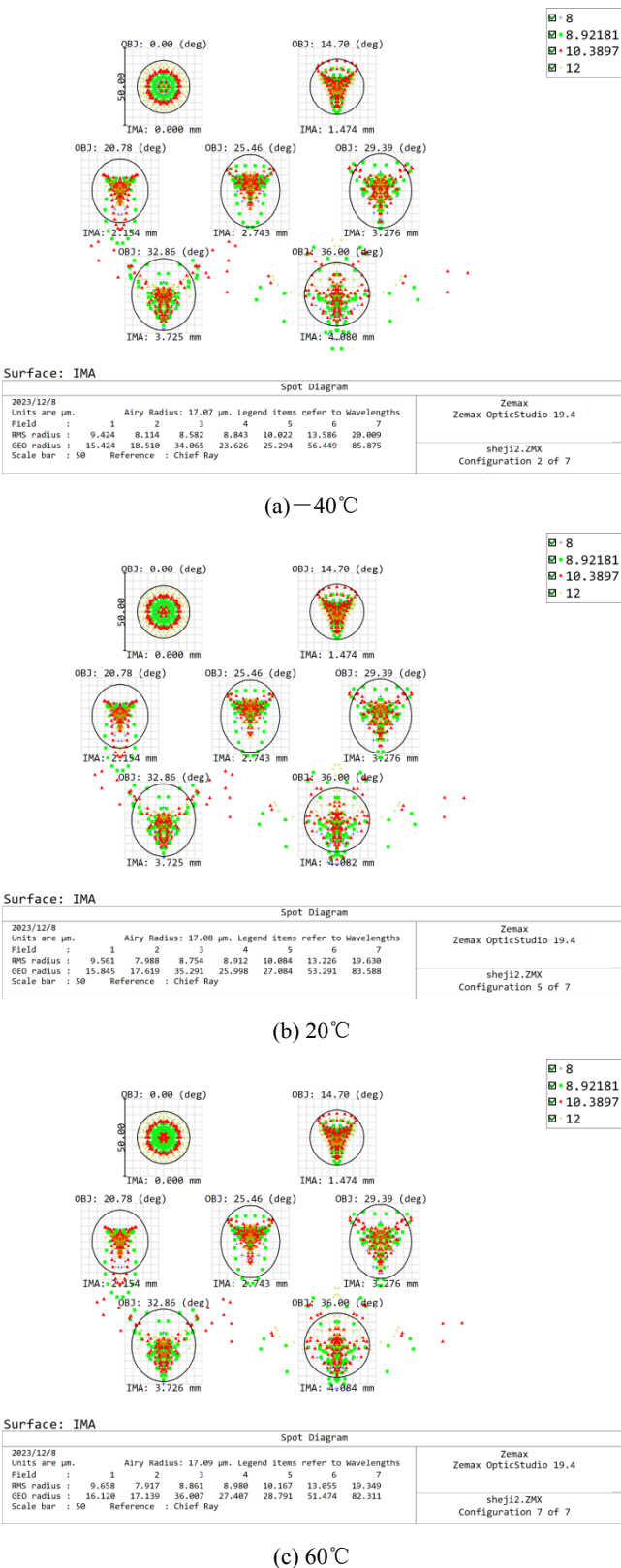


图 5 -40℃~60℃ 下的点列图
Fig.5 Spot diagram at -40℃~60℃

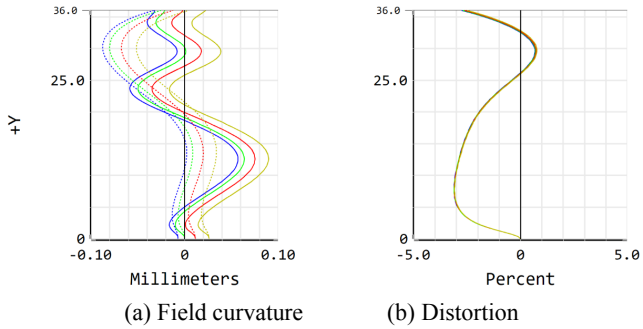


图 6 20℃ 下的场曲和畸变
Fig.6 Field curvature and distortion at 20℃

2.4 公差分析

从镜头的结构图中可以观察到，所设计镜头中使用到了鸥翼形非球面，即面上存在拐点，使曲面的凹凸性发生改变。传统研磨、抛光技术难以制造鸥翼形非球面，而单点金刚石车削技术工时长且价格昂贵^[5]，相比之下，适用于硫系玻璃的精密模压技术不但有能力制造鸥翼形非球面，还容易实现批量生产，能够大幅降低加工成本。鸥翼形非球面对面形检测环节也是一种挑战，由于目前传统零位补偿器难以适应鸥翼形非球面曲率反转特性，常用的零位补偿法对鸥翼形非球面不适用^[13]，可以用面形扫描或子孔径拼接法实现对鸥翼形非球面的面形检测。

在光学系统的加工和装配过程中，由于设备的精度有限，难免产生误差。公差分析能够使设计者了解各种加工装配误差对光学系统像质带来的影响，指导日后的加工生产。根据目前精密模压的工艺水平，将曲率半径公差、厚度公差、偏心公差都设为 2.5 μm，倾斜公差 0.02°，表面不规则度公差 0.2，折射率公差 0.001，阿贝数公差 0.1%，用蒙特卡洛法取 100 个样本分析 29.4 lp/mm 下的敏感度，分析结果如表 5 所示。分析结果表明，在 29.4lp/mm 处，有 90%以上的样本 MTF>0.14，说明能够满足生产加工需求。

表 5 蒙特卡洛公差分析结果

Table 5 Result of Monte Carlo tolerance analysis	
Sample proportion	MTF
90%	0.14136629
80%	0.14557190
50%	0.15886338
20%	0.16967453
10%	0.17301277

3 微透镜阵列设计

对于以硫系玻璃为材料的微透镜阵列，可用高精度硬质模板进行模压复制来制作^[14]。相比于光刻、纳米压印等制作方法，精密模压法的优势在于能够制作

双凸型微透镜阵列，其性能显著优于平凸型微透镜阵列。所设计主镜头入射角度与像高的关系曲线如图 7 所示。在所有光线均不发生全反射的前提下，使各角度的光线经过微透镜后的成像区域尽可能集中，微透镜焦点尽可能靠近探测器平面，仿真后得到微透镜阵列局部结构如图 8 所示，其材料为 IRG206。

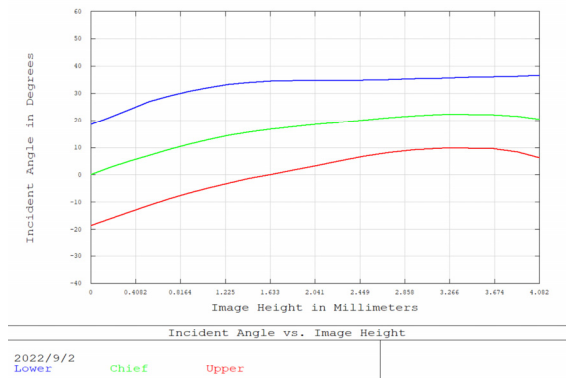


图 7 入射角度与像高关系
Fig.7 Incident angle vs. image height

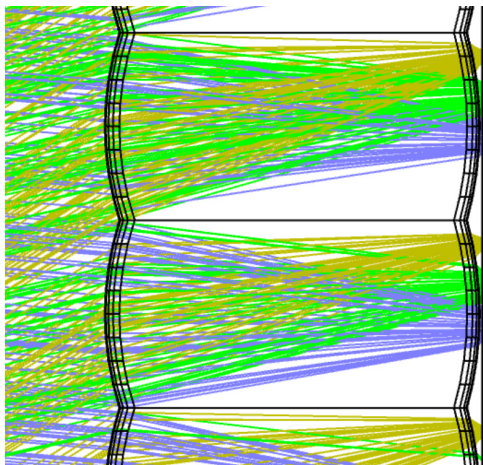


图 8 微透镜阵列局部结构图
Fig.8 Local structure of microlens array

红外探测器长边与短边的中点对应像高分别为 3.264 mm 和 2.448 mm，根据这两点对应的光线入射角度进行仿真，使得各角度的光线都能够照射在像元中面积占 50%的感光区域内，确定偏移因子 $M=0.0012941$ ，则微透镜单元的尺寸 $b=a(1-M)=16.978\text{ }\mu\text{m}$ 。图 9 所示为像高 1.068 mm、2.475 mm、4.082 mm 处使用主光线和最小、最大光瞳点光线仿真得到的辐照度图，图中方框为像元中的感光区域。经仿真验证，像高 0~4.082 mm 内，各角度的光线经微透镜会聚后均能够照射在感光区域内。光学系统的完整结构阴影模型图如图 10 所示。

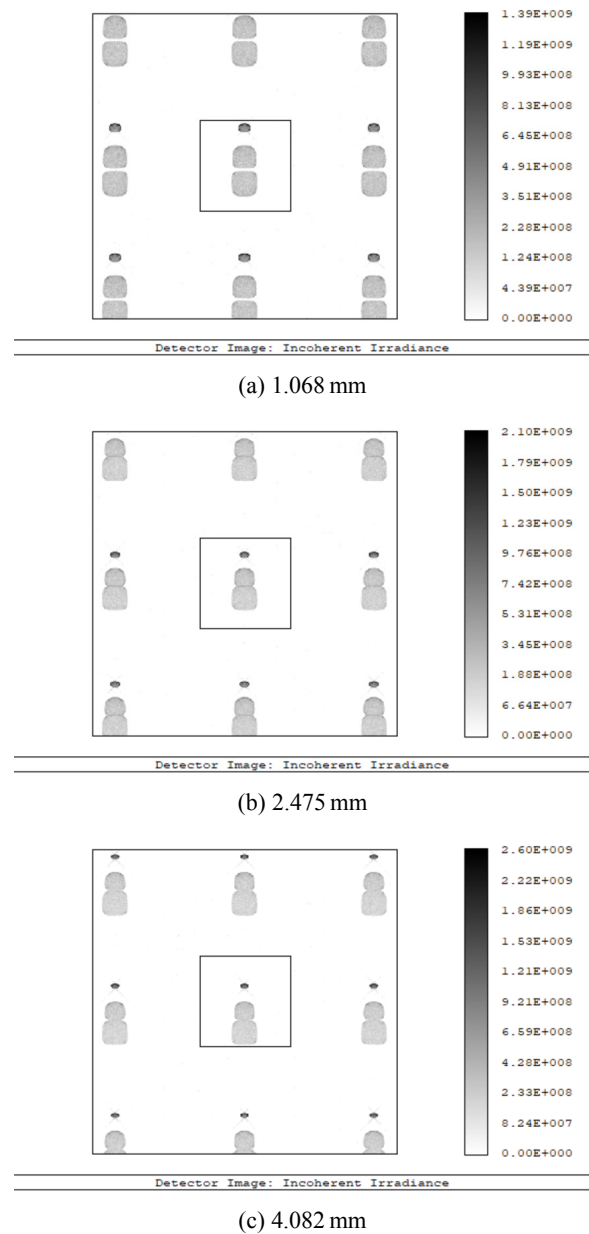


图 9 各像高处的辐照度图
Fig.9 Irradiance at each image height

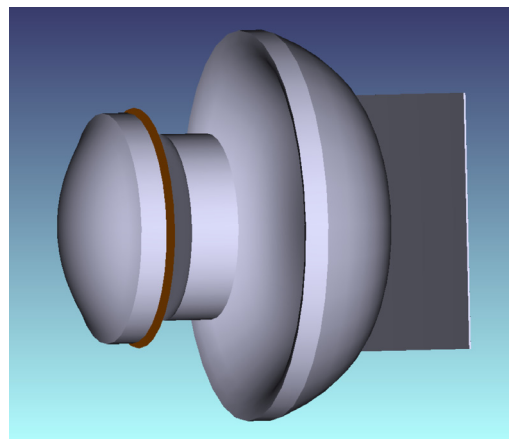


图 10 光学系统阴影模型图
Fig.10 Shaded model of the optical system

4 结论

提出了一种大视场小型无热化长波红外镜组,具备大视场、大像高、小尺寸的特点,采用 IRG203 和 IRG206 两种硫系玻璃,利用两种材料折射率温度系数的差异成功实现系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的无热化。系统中配有置于红外探测器前表面的以硫系玻璃为材料的红外微透镜阵列,能够将各像高、各角度的光线会聚于像元感光区域,增大探测器填充因子,提高信噪比和能量利用率。系统长度小而采用大尺寸红外探测器,在智能手机红外热成像仪领域具有广阔前景。

参考文献:

- [1] 奚晓,岑兆丰,李晓彤. 无热技术在光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(4): 388-390.
XI Xiao, CEN Zhaofeng, LI Xiaotong. Application of athermalisation in optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(4): 388-390.
- [2] 张凌志. 面向移动端的长波红外成像系统光学设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
ZHANG Lingzhi. Option Design of Long-Wave Infrared Imaging System for Mobile Devices[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [3] 田永. 基于非制冷型探测器的红外成像系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
TIAN Yong. Design of Infrared Imaging System Based on Uncooled Detector[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [4] 张继艳,林海峰,黄章超. 基于硫系玻璃的紧凑型大相对孔径长波红外光学系统无热化设计[J]. 应用光学, 2021, **42**(5): 790-795.
ZHANG Jiyan, LIN Haifeng, HUANG Zhangchao. Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, **42**(5): 790-795.
- [5] 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.
WANG Jing, WU Yuehao, DAI Shixun, et al. Application of chalcogenide glass in designing a long-wave infrared athermalized continuous zoom wide-angle lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(3): 165-171.
- [6] 吴晓晴,孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(4): 391-393.
WU Xiaojing, MENG Junhe. Athermalizing infrared optical systems by using simple mechanical framework [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(4): 391-393.
- [7] 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.
WANG Xuexin, JIAO Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(1): 129-133.
- [8] 崔莉,赵新亮,李同海,等. 无调焦非制冷红外光学系统的无热化设计[J]. 红外技术, 2010, **32**(4): 187-190.
CUI Li, ZHAO Xinliang, LI Tonghai, et al. Athermalization of uncooled infrared optical system without focusing mechanism[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(4): 187-190.
- [9] 武岩,高春,魏巍. 基于CMOS图像传感器的微透镜平移算法研究[J]. 现代计算机, 2017(35): 66-70.
WU Yan, GAO Chun, WEI Wei. The research of microlens shifting algorithm for CMOS Image Sensor[J]. *Modern Computer*, 2017(35): 66-70.
- [10] 张以漠. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
ZHANG Yimo. *Applied Optics*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015.
- [11] 尹志东,向阳,高健,等. 1300 万像素手机镜头设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, **51**(1): 012202.
YIN Zhidong, XIANG Yang, GAO Jian, et al. Optical design of a 1300 megapixel mobile phone camera lens optics designs[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(1): 012202.
- [12] 于洋,蹇毅,潘兆鑫,等. 红外二次成像无热化光学系统设计与实测[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(12): 3180-3184.
YU Yang, JIAN Yi, PAN Zhaoxin, et al. Design and test-result of re-imaging athermal infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(12): 3180-3184.
- [13] 路文文,郭景阳,陈善勇. 鸥翼型非球面元件的白光干涉拼接测量[J]. 光学学报, 2022, **42**(9): 112-122.
LU Wenwen, GUO Jingyang, CHEN Shanyong. White light interferometry stitching measurement of gull-wing aspheric optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, **42**(9): 112-122.
- [14] 刘丰,张帆,边浩,等. 折射型红外微透镜阵列器件的发展及制备[J]. 激光与光电子学进展, 2020, **57**(7): 071607.
LIU Feng, ZHANG Fan, BIAN Hao, et al. Development and preparation of refractive infrared microlens array device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, **57**(7): 071607.