

小 F 数红外双波段无热化折衍摄远物镜设计田晓航^{1,2}, 薛常喜^{1,2*}¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学先进光学设计与制造技术吉林省高校重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 衍射光学元件(DOE)在红外双波段甚至多波段的应用逐渐成为热点。基于双层DOE的多色光积分衍射效率(PIDE)最大化的设计思想,在工作波段范围内设计最佳工作波长,从而计算双层DOE的最佳微结构高度,并给出了适用于多波段光学系统的PIDE权重分配的数学分析模型。基于此双层DOE,设计了 F 数为1.1、焦距为75 mm的双波段(3.7~4.8 μm 和8.0~12.0 μm)红外光学系统。在29.4 lp/mm空间频率处,系统中、长波红外所有视场调制传递函数(MTF)分别高于0.60和0.45,在-40~60 $^{\circ}\text{C}$ 范围内实现了无热化设计。该系统在改善成像质量、小型化、轻量化,以及红外双波段消热差等方面表现出了巨大的优势。

关键词 光学设计; 衍射光学; 双层衍射光学元件; 红外双波段

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1422002

Athermalization Design of Small F -Number Refractive-Diffractive Telephoto Objective Lens in Infrared Dual-BandTian Xiaohang^{1,2}, Xue Changxi^{1,2*}¹School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;²Key Laboratory of Advanced Optical System Design and Manufacturing Technology of Universities of Jilin Province, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract The application of diffractive optical elements (DOEs) in infrared dual-band and even multi-band has become a hotspot. Based on the design idea of polychromatic integral diffraction efficiency (PIDE) maximization of the double-layer DOE, the optimal working wavelength is designed in the range of working band, and the optimal microstructure height of the double-layer DOE is calculated. The mathematical analytical model of weight distribution of PIDE of a multi-band optical system is proposed. Based on this double-layer DOE, a dual-band (3.7–4.8 μm and 8.0–12.0 μm) infrared optical system with an F -number of 1.1 and a focal length of 75 mm is designed. When the system is at a spatial frequency of 29.4 lp/mm, the modulation transfer functions of the designed system are above 0.60 and 0.45 for the medium wave infrared (MWIR) and long wave infrared (LWIR), respectively, and the designed optical system realizes athermalization over the temperature range from -40°C to 60°C . The system has shown great advantages in improving image quality, miniaturization, lightweight, and athermalization in infrared dual-band.

Key words optical design; diffractive optics; double-layer diffractive optical element; infrared dual-band

1 引言

红外双波段光学系统在目标信息获取和多目标跟踪等方面具有独特的优势,相比于单波段红外光学系统,其优势在于可通过一个光学系统得到不同类型目标的观测信息。波段较宽、可选用的红外材

料较少且温度系数较大,导致光学系统的结构复杂,给光学系统的应用带来了很大的困难。具有诸多特性优势的衍射光学元件(DOE)与传统的折射光学元件相结合,为光学系统结构的简化带来了更多可能。多层DOE(MLDOE)不仅弥补了单层DOE的缺陷,且具有宽频带的高衍射效率,为成像

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-02-07; 录用日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61905024)

通信作者: *xcx272479@sina.com

光学系统中像差难以校正、光学系统体积的减小和质量的降低等问题提供了新思路^[1-6]。文献[7]提出了适用于红外双波段的双层 DOE 玻璃的选取原则,并设计了含有双层衍射元件的红外双波段光学系统,在 40~100 °C 温度范围内实现无热化。文献[8]仅用 3 种常见红外材料、4 片透镜设计了一种高成像质量的消热差折衍混合红外摄远物镜。文献[9]对比了不同类型 DOE 的衍射效率,并设计了红外双波段折衍混合变焦光学系统。文献[10]基于硫系玻璃设计了紧凑式大相对孔径长波红外无热化光学系统。本文设计了基底材料为硫化锌(ZnS)和硒化锌(ZnSe)的双层 DOE,双层 DOE 的多色光积分衍射效率(PIDE)最大化的设计思想为分别在中、长波红外的设计波段范围内寻找到 PIDE 最大值所对应的波长为最佳设计波长,并使得双层 DOE 的最佳设计波长与红外双波段光学系统的中心波长一致,即保证双层 DOE 在红外双波段光学系统中

的 PIDE 达到了最大值。选用的双色探测器为像素数为 640×512、像元尺寸为 17 μm 的非制冷型探测器,此光学系统在 -40~60 °C 范围内成像质量良好,并实现了光学系统的小型化、轻量化,以及双层 DOE 的高衍射效率。

2 红外双波段双层 DOE 设计

2.1 MLDOE 的 PIDE

MLDOE 在宽波段范围内非中心波长处的衍射效率较高,从而提高了折衍混合光学系统的成像质量。成像光学系统中最常用的 MLDOE 是由两种不同色散性质的基底材料组成的双分离型 DOE,MLDOE 的结构如图 1 所示。

衍射效率是评价成像光学系统中 DOE 性能的重要指标,其大小决定了 DOE 的工作波段范围。PIDE 是指在 DOE 的某一环带上一个波段范围内的衍射效率。

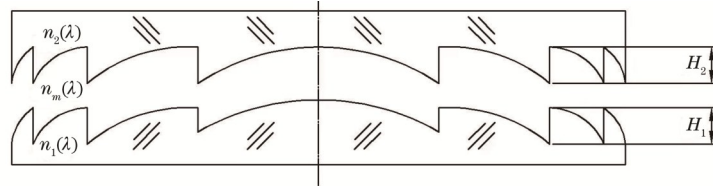


图 1 MLDOE 连续浮雕结构

Fig. 1 Continuous relief structure of MLDOE

MLDOE 的相位延迟表达式为

$$\phi(\lambda) = 2\pi \sum_{j=1}^N \frac{H_j [n_{j_i}(\lambda) \cos \theta_{j_i} - n_{j_t}(\lambda) \cos \theta_{j_t}]}{\lambda}, \quad (1)$$

式中： H_j 为第 j 层 DOE 的表面微结构高度； $n_{j_i}(\lambda)$ 、

$n_{j_t}(\lambda)$ 分别为第 j 层 DOE 的入射基底材料和出射基底材料的折射率； θ_{j_i} 、 θ_{j_t} 分别为第 j 层 DOE 的入射角和出射角； λ 为波长。

双层 DOE 的衍射微结构高度为

$$\begin{cases} H_1 = \frac{m\lambda_1 [n_2(\lambda_2) - 1] - m\lambda_2 [n_2(\lambda_1) - 1]}{[n_1(\lambda_1) - 1][n_2(\lambda_2) - 1] - [n_1(\lambda_2) - 1][n_2(\lambda_1) - 1]}, \\ H_2 = \frac{m\lambda_1 [n_1(\lambda_2) - 1] - m\lambda_2 [n_1(\lambda_1) - 1]}{[n_1(\lambda_1) - 1][n_2(\lambda_2) - 1] - [n_1(\lambda_2) - 1][n_2(\lambda_1) - 1]} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： λ_1 和 λ_2 分别为第 1 层 DOE 和第 2 层 DOE 的设计波长； m 为衍射级次； $n_1(\lambda_1)$ 、 $n_1(\lambda_2)$ 、 $n_2(\lambda_1)$ 、 $n_2(\lambda_2)$ 分别为在 λ_1 波长处第一层衍射光学元件材料的折射率、 λ_2 波长处第一层衍射光学元件材料的折射率、 λ_1 波长处第二层衍射光学元件材料的折射率,以及 λ_2 波长处第二层衍射光学元件材料的折射率。

由式(1)可知,当光斜入射时,MLDOE 的相位延迟表达式为

$$\phi_i(\lambda) = 2\pi \sum_{j=1}^N \frac{H_j \left[\sqrt{n_{(j-1)t}^2 - (n_{li} \sin \theta_{li})^2} - \sqrt{n_{jt}^2(\lambda) - [n_{li}(\lambda) \sin \theta_{li}]^2} \right]}{\lambda}, \quad (3)$$

式中： $n_{0t} = n_{li}$ 。MLDOE 斜入射时第 m 衍射级次的衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\phi_i(\lambda)}{2\pi} \right]. \quad (4)$$

由式(4)可以得出 MLDOE 的第 m 衍射级次的

PIDE 为

$$\bar{\eta}_m(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\phi(\lambda)}{2\pi} \right] d\lambda, \quad (5)$$

式中: λ_{\max} 和 λ_{\min} 分别为在某一环带上波段范围内的最大值和最小值^[11-12]。

多波段的综合 PIDE 即 $\eta_m^{(V)}(\lambda)$ 可以表示为

$$\eta_m^{(V)}(\lambda) = W_1 \eta_m^{-\lambda_1} + W_2 \eta_m^{-\lambda_2} + \dots + W_n \eta_m^{-\lambda_n}, \quad (6)$$

式中: W_1, W_2, \dots, W_n 为在多波段光学系统中每个波段 PIDE 的权重因子; 上标 (V) 代表多波段的综合值; $\eta_m^{-\lambda_1}, \eta_m^{-\lambda_2}, \dots, \eta_m^{-\lambda_n}$ 为在多波段光学系统中 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 对应的 PIDE。

多波段光学系统中权重因子的分配应依据多波段中各个波段在实际应用时对于整个波段的重要程度, 某个波段越重要则该波段的权重因子就越大, 其中各个波段权重因子的总和为 1, 即 $\sum_{i=1}^n W_i = 1$, 故权重因子应根据实际情况进行合理分配。本文设计的光学系统以平均分配权重因子作为例子。

2.2 双层 DOE 的结构设计

分别选取双层 DOE 的两层基底材料为 ZnS 和

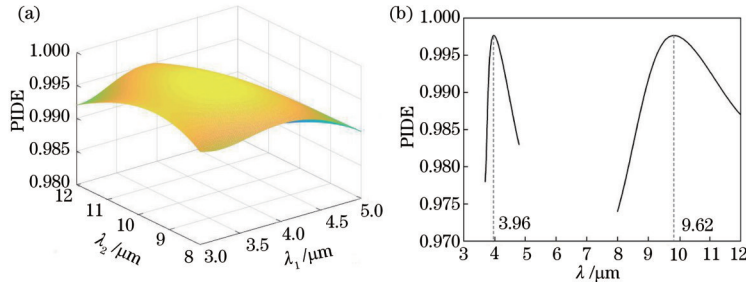


图 2 PIDE 与波长的关系。(a) 三维图; (b) 二维图

Fig. 2 PIDE varying with wavelength. (a) Three-dimensional diagram; (b) two-dimensional diagram

表 1 双层 DOE 的设计结果

Table 1 Design results of double-layer DOE

Parameter	Value
Design band / μm	3.7-4.8, 8.0-12.0
Optimum design wavelength / μm	3.96, 9.62
PIDE in each band / %	99.76 (3.7-4.8 μm) 99.73 (8.0-12.0 μm)
H_1 / μm	-127.80 (ZnS)
H_2 / μm	57.56 (ZnSe)

3 含有双层 DOE 的红外双波段无热化光学系统设计

3.1 红外光学系统消热差设计原理

红外光学系统消热差也就是使光学系统在一定的温度范围内具有良好的成像质量, 在设计时需同时满足光焦度、消色差和消热差的要求。

总光焦度为各光学元件的光焦度之和:

$$\sum_{i=1}^n h_i \phi_i = \phi', \quad (9)$$

式中: h_i 为第一近轴光线在第 i 个透镜的入射高度; ϕ_i

ZnSe, 两层之间的填充介质为空气, 采用的波段为中波 3.7~4.8 μm 和长波 8.0~12.0 μm 。衍射级次为 $m=1$, 采用 MATLAB 软件进行模拟^[13-14]。

ZnS 的折射率可以表示为

$$n_{\text{ZnS}}^2 - 1 = \frac{0.33904026\lambda^2}{\lambda^2 - 0.31423026^2} + \frac{3.76068680\lambda^2}{\lambda^2 - 0.17594170^2} + \frac{2.73123530\lambda^2}{\lambda^2 - 33.88656000^2} \quad (7)$$

ZnSe 的折射率可以表示为

$$n_{\text{ZnSe}}^2 - 1 = \frac{4.29801490\lambda^2}{\lambda^2 - 0.19206300^2} + \frac{0.62776557\lambda^2}{\lambda^2 - 0.37878260^2} + \frac{2.89556330\lambda^2}{\lambda^2 - 46.99459500^2} \quad (8)$$

根据选定的材料和设计波长, 可以得到最大的 PIDE 所对应的最佳设计波长, 双层 DOE 的 PIDE 与波长之间的关系如图 2 所示, 最大的 PIDE 所对应的最佳设计波长分别为 3.96 μm 和 9.62 μm , 由此可以计算出对应的最佳微结构高度, 双层 DOE 的设计结果如表 1 所示。

为第 i 个透镜的光焦度; ϕ' 为透镜的总光焦度。

轴向消色差方程为

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi'} \right)^2 \sum_{i=1}^n h_i^2 \omega_i \phi_i = 0, \quad (10)$$

式中: ω_i 为第 i 个透镜的色散因子。

消热差方程为

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi'} \right)^2 \sum_{i=1}^n h_i^2 \chi_i \phi_i = \alpha_h L, \quad (11)$$

式中: χ_i 为第 i 个透镜的光热膨胀系数; α_h 为外部机械结构材料的线膨胀系数; L 为机械结构的长度^[15-16]。

3.2 红外双波段无热化光学系统设计实例

由于均匀性较好的红外光学材料难以获取, 且同一光学材料在不同的波段所表现出的色散能力不同, 为了保证 DOE 的可加工性, 选用常见的红外双波段光学材料, 再运用 ZEMAX Optic Studio 软件对含有双层 DOE 的光学系统进行设计和优化, 光学设计指标如表 2 所示。

表 2 明确了红外双波段无热化光学系统的设计指标, 此光学系统无需调焦即可在 -40~60 $^{\circ}\text{C}$ 范围内

表 2 光学设计指标
Table 2 Optical design specifications

System	Parameter	Content
Optical system	Working band / μm	3.7-4.8, 8.0-12.0
	F-number	1.1
	Focal length /mm	75
	Field of view /($^{\circ}$)	8
	MTF @ 29.4 lp \cdot mm $^{-1}$	>0.5 (3.7-4.8 μm); >0.4 (8.0-12.0 μm)
Detector	Distortion /%	≤ 2
	Type	Vanadium oxide
	Size of area array	640 \times 512
	Pixel / μm	17

清晰成像,无热化设计需要考虑透镜间隔随温度的变

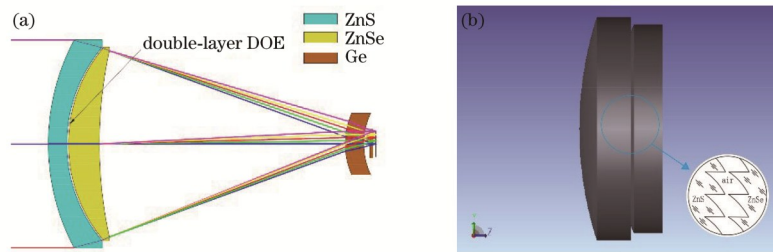


图 3 光学系统结构图。(a)红外双波段光学系统;(b)折衍混合透镜及局部放大图

Fig. 3 Structures of optical system. (a) Infrared dual-band optical system; (b) refractive diffractive hybrid lens diagram and partial enlargement

表 3 光学系统参数
Table 3 Parameters of optical system

Surface	Type	Radius / mm	Thickness / mm	Glass material
Object	Standard	Infinity	Infinity	—
1	Standard	71.793	6.00	ZnS
2	Binary 2	48.662	0.05	—
3	Binary 2	48.662	10.00	ZnSe
Stop	Standard	142.493	79.38	—
5	Standard	24.828	6.00	Ge
6	Even sphere	23.465	1.92	—
7	Standard	Infinity	1.00	Ge
8	Standard	Infinity	1.00	—
Image	Standard	Infinity	—	—

3.3 像质分析

红外双波段无热化光学系统在 -40°C 、 0°C 和 60°C 的 MTF 如图 4 所示,图 4(a)~(f)分别为中波(3.7~4.8 μm)和长波(8.0~12.0 μm)时各温度下的 MTF 曲线,在奈奎斯特采样频率处(29.4 lp/mm)中波红外 MTF 大于 0.6,长波红外 MTF 大于 0.4,在 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内成像质量良好。

点列图也是光学系统像质评价的主要方式,表 4

化,透镜间隔实质上考虑的就是透镜间隔圈材料的热胀冷缩问题,铝的密度较小且强度较好,并具有优秀的机械加工性能,使得加工出的隔圈精度和表面粗糙度较高,因此光学系统的隔圈材料选用铝,其膨胀系数为 $2.36\times 10^{-5}\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 。红外双波段光学系统如图 3 所示,图 3(a)为红外双波段光学系统的结构图,图 3(b)为该光学系统中的折衍混合透镜及其局部放大图。

由图 3 可以看出,该光学系统由 4 片透镜组成,沿同一光轴从左至右第 1 片透镜的光学材料是 ZnS,第 2 片透镜的光学材料是 ZnSe,第 3、4 片透镜的光学材料是锗(Ge),双层衍射元件的第 1 层和第 2 层光学结构分别第 1 片透镜的像方侧表面和第 2 片透镜的物方侧表面,第 4 片透镜为红外探测器的保护玻璃,红外双波段无热化光学系统的透镜数据列于表 3 中。

给出了不同温度下最大视场的弥散斑半径,可以看出在中波红外各个温度下的弥散斑半径小于 8.218 μm ,长波红外各个温度下的弥散斑半径小于 8.653 μm ,均小于红外探测器的像元尺寸。

畸变是由于理想像面与实际像面之间产生的变形影响了成像的视觉效果,因此应对畸变所产生的影响进行约束。图 5(a)、(b)为双波段光学系统的场曲与畸变图,纵轴为视场角(FOV)。中波和长波的最大场曲均小于 0.10 mm,最大畸变均小于 1%。

4 公差分析

为了使现有的加工装调水平满足成像光学系统的性能要求,应用 ZEMAX 的公差分析功能模拟在加工、装配过程中光学系统的结构或其他参数的改变,系统的公差设置如表 5 所示,用 MTF 的平均值变化来评价系统的性能,并用蒙特卡罗分析方法评估公差对系统成像质量的影响。将公差设置代入红外双波段光学系统中进行 500 次蒙特卡罗分析,表 6 所示为 29.4 lp/mm 的特征频率处 90% 以上的蒙特卡罗分析结果,中波红外的中心视场 MTF 大于 0.47,边缘视场的 MTF 大于 0.42;长波红外的中心视场 MTF 大于 0.45,边缘视场的 MTF 大于 0.40。公差分配合理且较为宽松,易于加工生产,装配后可以满足成像质量要求。

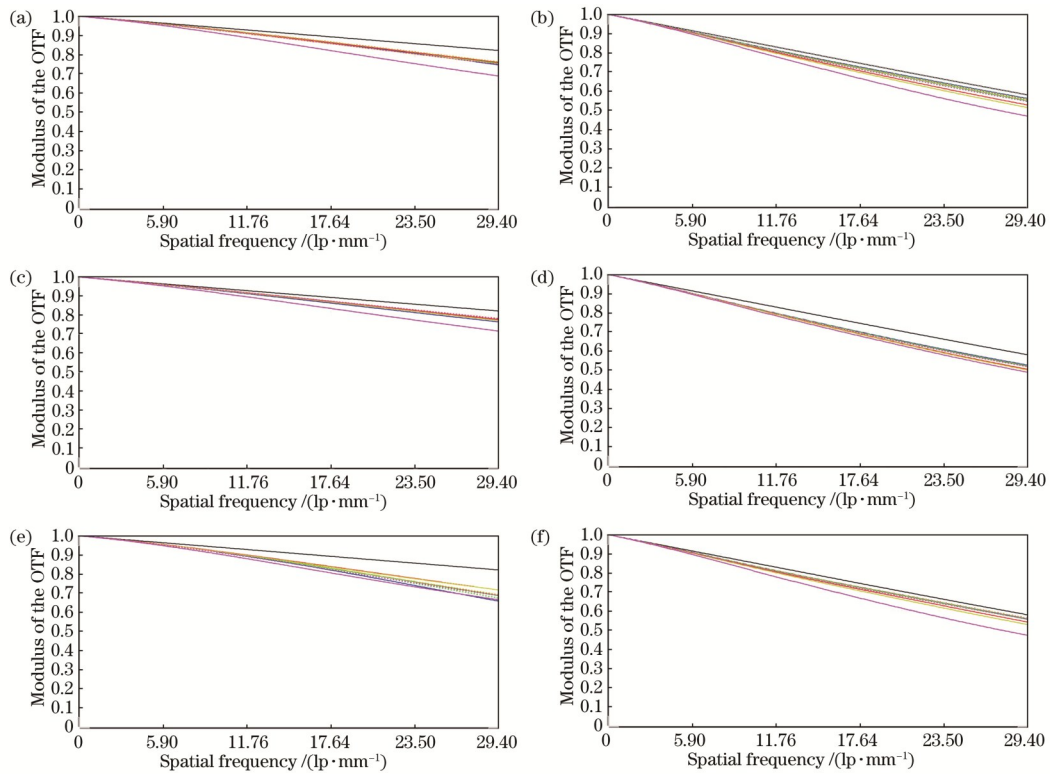


图 4 系统在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 MTF。(a) 中波 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(b) 长波 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(c) 中波 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(d) 长波 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(e) 中波 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(f) 长波 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 4 MTF curves of system at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) Mid-band at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) long-band at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) mid-band at $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) long-band at $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; (e) mid-band at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$; (f) long-band at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

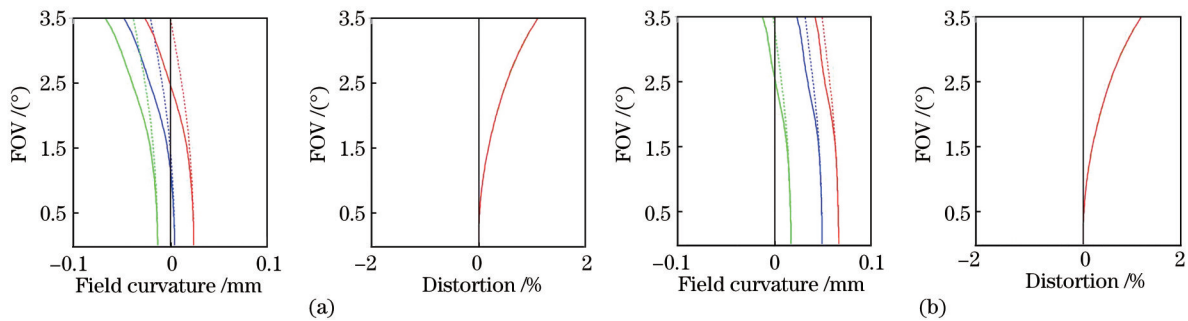


图 5 光学系统的场曲和畸变。(a) 中波波段；(b) 长波波段

Fig. 5 Field curvature and distortion of optical system. (a) Mid-band; (b) long-band

表 4 不同温度下最大视场的弥散斑半径

Table 4 Diffuse spot radius for full field at different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Diffuse spot radius of MWIR / μm	Diffuse spot radius of LWIR / μm
-40	6.877	8.089
-20	6.846	8.233
0	6.839	8.524
40	7.362	8.607
60	8.218	8.653

表 5 系统公差设置

Table 5 Tolerance data of system

Tolerance type	Value
Refractive index	0.0008
Thickness /mm	± 0.0375
Surface irregularity per fringe	± 0.5
Abbe number /%	0.5
Surface tilt /($^{\circ}$)	± 1.5
Element decenter /mm	± 0.03
Element tilt /($^{\circ}$)	± 2.0
Test wavelength /nm	632.8

表 6 蒙特卡罗公差分析结果
Table 6 Results of Monte Carlo tolerance analysis

Wavelength / μm	Field of view /($^{\circ}$)	Geometry MTF average	
		Nominal	Estimated
3.7-4.8	0	0.73	0.47
	2.8	0.66	0.45
	4.0	0.60	0.42
8.0-12.0	0	0.51	0.45
	2.8	0.49	0.44
	4.0	0.45	0.40

5 结 论

基于双波段 PIDE 的权重分配原则,给出了适用于多波段光学系统的数学分析模型,该模型对 DOE 应用于多波段的光学系统设计具有指导意义。基底材料为 ZnS 和 ZnSe 的双层 DOE 在中波和长波的 PIDE 分别为 99.76% 和 99.73%,最佳设计波长为 3.96 μm 和 9.62 μm ,并将此双层 DOE 应用于红外双波段无热化光学系统中,在奈奎斯特采样频率 (29.4 lp/mm) 处,中波红外 MTF 高于 0.6,长波红外 MTF 高于 0.4,最大弥散斑半径小于 8.218 μm ,中波和长波的最大场曲均小于 0.10 mm,最大畸变均小于 1%,该光学系统在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围成像质量良好,可实现无热化,公差分配合理,符合现有的加工装调水平。该光学系统体积小、质量轻且结构简单,在军事和民用等领域应用前景广阔。

参 考 文 献

- [1] 白瑜,杨建峰,薛彬,等.非制冷长波红外热像仪折衍混合双视场光学系统设计[J].应用光学,2009,30(5):853-858.
Bai Y, Yang J F, Xue B, et al. Design of refractive/diffractive dual FOV optical system for uncooled LWIR thermal imager[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(5): 853-858.
- [2] 毛文峰,张新,曲贺盟,等.红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计[J].光学学报,2014,34(10):1022002.
Mao W F, Zhang X, Qu H M, et al. Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022002.
- [3] 胡洋,崔庆丰,孙林,等.红外双波段折衍混合光学-数字联合系统设计[J].光学学报,2020,40(14):1422002.
Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Optical-digital joint design of a dual-waveband infrared refractive-diffractive system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1422002.
- [4] 杨亮亮,沈法华,刘成林,等.含有双层衍射光学元件的红外双波段无热化光学系统的设计[J].红外技术,2019,41(8):699-704.
Yang L L, Shen F H, Liu C L, et al. Athermal design of infrared dual-band optical system with double-layer diffractive optical elements[J]. Infrared Technology, 2019, 41(8): 699-704.

- [5] 付强,张新.中波/长波双色红外光学系统材料选择[J].光学学报,2015,35(2):0208003.
Fu Q, Zhang X. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208003.
- [6] Mao S, Zhao J L. Design and analysis of a hybrid optical system containing a multilayer diffractive optical element with improved diffraction efficiency[J]. Applied Optics, 2020, 59(20): 5888-5895.
- [7] 范长江,王肇圻,樊新岩.含有双层谐衍射元件的红外双波段光学系统消热差设计[J].光子学报,2008,37(8):1617-1621.
Fan C J, Wang Z Q, Fan X Y. The design of infrared dual-band athermalized optical system with double-layer harmonic diffractive element[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1617-1621.
- [8] 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.
Zhang W Y. Athermalization design of infrared refractive-diffractive telephoto objective[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(1): 12-18.
- [9] 杨洪涛,杨晓帆,梅超,等.折衍混合红外双波段变焦光学系统设计[J].红外与激光工程,2020,49(10):20200036.
Yang H T, Yang X F, Mei C, et al. Design of hybrid refractive-diffractive infrared dual-band zoom optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20200036.
- [10] 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 J Y, Lin H F, Huang Z C. Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 790-795.
- [11] 张博,崔庆丰,朴明旭,等.双波段多层衍射光学元件的基底材料选择方法研究及其在变焦系统中的应用[J].光学学报,2020,40(6):0605001.
Zhang B, Cui Q F, Piao M X, et al. Substrate material selection method for dual-band multilayer diffractive optical elements and its application in the zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0605001.
- [12] 裴雪丹,崔庆丰,冷家开,等.多层衍射光学元件设计原理与衍射效率的研究[J].光子学报,2009,38(5):1126-1131.
Pei X D, Cui Q F, Leng J K, et al. Design and diffraction efficiency of a multi-layer diffractive optical element[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1126-1131.
- [13] Xue C X, Cui Q F, Liu T, et al. Optimal design of a multilayer diffractive optical element for dual wavebands[J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4157-4159.
- [14] Xue C X, Cui Q F. Design of multilayer diffractive optical elements with polychromatic integral diffraction efficiency[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 986-988.
- [15] 李升辉,李欣,李虹静.基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统设计[J].红外技术,2020,42(1):

- 19-24.
- Li S H, Li X, Li H J. Design of infrared dual-band common aperture thermal elimination optical system based on harmonic diffraction[J]. Infrared Technology, 2020, 42(1): 19-24.
- [16] 陶邳, 王敏, 肖维军, 等. 折/衍混合大视场消热差红外双波段光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1122004.
- Tao Z, Wang M, Xiao W J, et al. Design for cooled dual-band infrared refractive-diffractive hybrid optical system of athermalization and wide FOV[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1122004.