

文章编号: 0258-7025(2005)03-0311-04

折/衍混合红外物镜的超宽温消热差设计

张轶楠¹, 王肇圻^{1*}, 孙 强²

(¹南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)
²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 为满足红外光学系统高环境适应性和高灵敏度的发展要求,采用折/衍混合结构改进红外 3.2~4.2 μm 波段, $F/\#$ 为 1.5, 视场角为 ±2.5° 的 Si-Ge 四片式佩茨瓦尔(Petzval)物镜,实现了一60~160 °C 超宽温度范围的光学被动式消热差设计。改进系统并保持原系统光学性能参数,在空间频率 20 lp/mm 处,光学传递函数(MTF)保持在 0.78 以上,接近衍射极限,成像质量高而稳定。该系统可用于像元尺寸大于 25 μm 的非制冷凝视式焦平面阵列探测器。

关键词 仪器;红外光学系统;折/衍混合系统;消热差

中图分类号 TH 744 **文献标识码** A

Athermalized Design of Extensive Temperature Range for Infrared Hybrid Refractive-Diffractive Objective

ZHANG Yi-nan¹, WANG Zhao-qi¹, SUN Qiang²

(¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, The Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071, China*
²*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China*)

Abstract For the requirement of extensive temperature adaptability of infrared optical systems, a refractive-diffractive hybrid approach is applied to an optical system with 114.7 mm focal length, $F/1.5$ F -number, ±2.5° field-of-view in the 3.2~4.2 μm waveband. The new designed hybrid system is passively athermalized over the temperature range from -60 °C to 160 °C with very high and stable imaging quality. The theoretical polychromatic modulation transfer function (MTF) is above 0.78 at space frequency of 20 lp/mm and is near to the diffraction-limitation. The lens is compatible with uncooled staring array imager with the picture element size over 25 μm.

Key words instrumentation; infrared system; hybrid refractive-diffractive system; athermalization

1 引 言

军用和空间光学仪器与绝大部分民用光学仪器不同,通常期望在较宽的温度范围内成像质量高而稳定^[1]。由于红外材料折射率温度变化系数 dn/dT 值较大,比可见光材料要大一个或两个数量级,因此环境温度的变化对红外光学系统成像质量的影响更为显著。同时,考虑到红外材料的吸收,还应使系统

的结构尽量简单。因此,在较宽温度范围内具有高像质、结构简单的红外光学系统便成为现代高质量红外光学系统的一个研究重点。

从 20 世纪 90 年代开始, G. P. Behrmann^[2] 和 Russell M. Hudyma^[3] 等研究人员开始研究衍射元件的热效应在消热差光学系统中的作用。利用衍射元件负的色散系数和独特的温度特性,可突破传统光学的限制,巧妙地简化设计难度,设计出高质量的

收稿日期:2003-08-18;收到修改稿日期:2003-12-29

基金项目:国家自然科学基金(60277021)资助项目。

作者简介:张轶楠(1978—),女,南开大学现代光学研究所硕士研究生,主要从事衍射光学和光学设计方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

红外光学系统。我们在近年的研究中,对折/衍混合系统在目视系统和红外系统中的应用做了相当多的工作,并取得了较为成功的结果^[4~9]。已有的一个红外 3.2~4.2 μm 波段, Si-Ge 四片式佩茨瓦尔物镜具有 $F/\#$ 为 1.5, 有效焦距为 114.7 mm, 视场角为 5° 的光学性能^[10]。然而该物镜工作温度范围窄, 远远不能满足高环境适应性这一要求。基于该物镜的高斯参量, 加入一衍射面, 对新的折/衍混合系统重新优化, 实现了 $-60\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ 超宽温度范围的光学被动式消热差设计。

2 设计原理

有间距的多元薄透镜系统的光焦距分配方程、轴向色差方程和热像差方程可表述为^[11]

$$\Phi = \frac{1}{h_1} \sum h_i \varphi_i, \quad (1)$$

$$\Delta f_b = \frac{1}{h_1^2 \Phi^2} \sum h_i^2 \frac{\varphi_i}{\nu_i}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f_b}{\partial T} = -\frac{1}{h_1^2 \Phi^2} \sum h_i^2 \theta_i \varphi_i, \quad (3)$$

式中 h_i 为第一近轴光线在各镜组的高度, Φ 为系统的总光焦度, φ_i, ν_i 分别为各元件的光焦度和阿贝常数, f_b 为系统的后焦距, θ_i 为材料的热系数, 定义为

$$\theta_i = \frac{1}{\varphi_i} \frac{\partial \varphi_i}{\partial T}. \quad (4)$$

消色差和消热差的光学系统要求(2)式描述的由光学元件的色散引起的离焦即轴向色差为零, 还要求(3)式描述的温度变化时, 光学元件产生的离焦同框架结构产生的离焦相补偿。

对于折射光学元件, 由(4)式, 材料的热系数为

$$\theta_i = \frac{1}{n_i - 1} \frac{\partial n_i}{\partial T} - \alpha_i, \quad (5)$$

它不仅与材料的热膨胀系数 α_i 有关, 还和材料的折射率温度系数有关。

衍射元件的光焦度和光焦度随温度的变化可表示为

$$\varphi = 2m\lambda/r_m^2, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \frac{2m\lambda}{r_m^2} (-2\alpha_g) = \varphi(-2\alpha_g), \quad (7)$$

r_m 为第 m 个环带的半径, α_g 为基底材料的热膨胀系数。由(4), (7)式可知, 衍射光学元件的热系数为

$$\theta_d = -2\alpha_g, \quad (8)$$

它只与基底材料的热膨胀系数 α_g 有关, 这是衍射元件和折射元件的根本差异。

由于大多数红外材料的 $\partial n/\partial T$ 值远远大于其热膨胀系数, 从式(5), (8)可以看出衍射元件的热系数相对于折射元件很小, 可忽略不计。因此可以利用衍射面消色差, 再合理分配折射元件的光焦度消热差。而不必像传统的折射光学那样, 必须使材料的阿贝常数及热系数同时满足(2), (3)式, 才能使光学系统同时消热差和消色差。

3 设计结果和性能分析

所参考的 Si-Ge 四片式佩茨瓦尔物镜的外形如图 1 所示。该系统共由四片元件组成, 第一片和第四片的材料为 Si, 第二片和第三片的材料为 Ge。由于非制冷型红外热像仪不用液氮制冷, 不需要冷却光阑, 孔径光阑可置于光学系统内任意位置。保持原系统的光学性能参数, 在第三面上加衍射面, 利用 Focus Software 公司的 ZEMAX-EE 光学设计软件, 对系统重新优化, 设计的折/衍混合消热差系统的结构参数如表 1 所示。

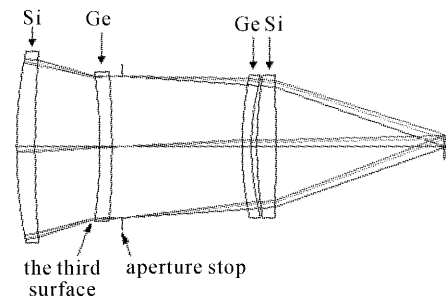


图 1 Si-Ge 四片式佩茨瓦尔物镜的外形图
Fig. 1 Optical layout of the Si-Ge 4-element Petzval objective

环境温度的变化对红外光学系统性能的影响主要表现为离焦, 而离焦将严重影响系统的光学传递函数(MTF)。图 2 为原折射系统和改进的折/衍混合消热差系统的 0 视场光学传递函数比较图。从图中可看出, 原折射系统的光学传递函数在 $-60\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ 的温差范围内波动很大, 在空间频率 20 lp/mm 处, 从 0.8354 降到 0.2318, 温度变化严重影响了系统的成像质量。而改进的折/衍混合消热差系统的光学传递函数值几乎不变, 在 20 lp/mm 处保持在 0.83 左右, 接近衍射极限。说明改进系统的环境温度适应性大幅度提高。

图 3 为系统在像面 20 lp/mm 空间频率处, 0 视场和全视场的子午面、弧矢面归一化调制传递函数

表 1 折/衍混合消热差系统的结构参数

Table 1 Constructional parameters of the hybrid athermal system

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
1	409.732	5.324	Si
2	593.751	25.276	
3*	-149.568	6.729	Ge
4	-225.685	5.268	
STO	0	40.251	
6	275.665	5.320	Ge
7	139.201	3.210	
8	253.002	6.128	Si
9	-353.302	79.521	
10	0	0.532	
IMA	0		

* Radial phase distribution of surface 3 is $\varphi(r) = 13.811r^2 + 2.655r^4$; STO denotes stop plane; IMA denotes image plane (STO 代表光阑面; IMA 代表像平面)。

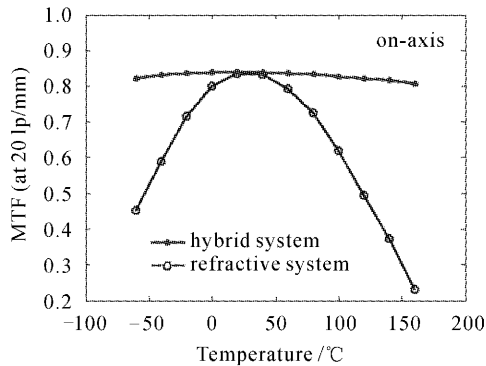


图 2 原折射系统和改进的折/衍混合系统 0 视场光学传递函数比较图

Fig. 2 On-axis MTF comparison of refractive and hybrid optical system

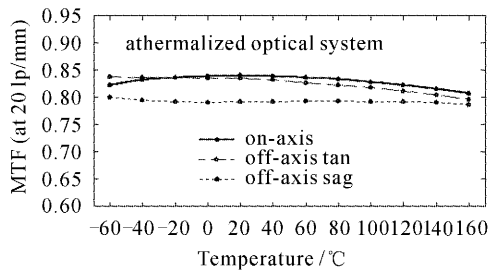


图 3 消热差光学系统的光学传递函数

Fig. 3 MTF of the athermalized optical system

值随温度变化曲线。它能更全面地反映改进系统的成像质量。从图上可以看出,在设计温度范围内,全视场的子午面光学传递函数值与衍射极限值(0.8575)之差为 0.05 左右,弧矢面光学传递函数值

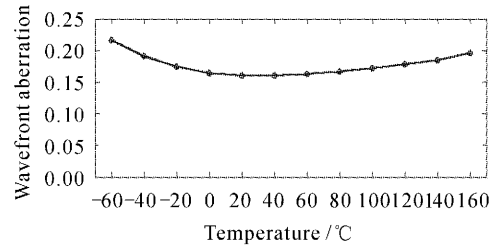


图 4 -60~160 °C 之间波像差随环境温度的变化

Fig. 4 Relationship between environment temperature and wavefront aberration from -60°C to 160°C

与衍射极限值之差为 0.07 左右。设计结果接近衍射极限。说明该系统在设计温度范围内成像质量高而稳定。该系统可用于像素尺寸大于 $25 \mu\text{m}$ 的非制冷凝视式面阵探测器。

图 4 为设计温度范围内波像差随温度的变化,最大值为 -60°C 时的 0.2166λ , 小于像质评价“瑞利判据”的标准,即当实际波面与理想波面的最大差别不超过 $\pm\lambda/4$ 时,此波面可看作无缺陷的。根据波像差和焦深的关系式,此系统在设计温度范围内的最大离焦量约为 $14.1 \mu\text{m}$, 小于系统的焦深 $16.3 \mu\text{m}$, 说明该光学系统在设计温度范围内焦平面位置几乎不变,实现了消热差。而原系统在此温度范围内的最大离焦量为 $75.2 \mu\text{m}$, 远远大于系统的焦深。

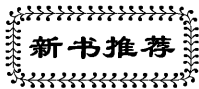
4 结 论

采用折/衍混合结构改进红外 $3.2\sim 4.2 \mu\text{m}$ 波段的 Si-Ge 四片式佩茨瓦尔物镜,设计了一 $60\sim 160^\circ\text{C}$ 超宽温度范围内的光学被动式消热差光学系统。改进系统保持了原系统的光学性能参数,在设计温度范围内,离焦量小于系统的焦深。在空间频率 20lp/mm 处,光学传递函数保持在 0.78 以上,接近衍射极限。该系统可用于像元尺寸大于 $25 \mu\text{m}$ 的非制冷凝视式焦平面阵列探测器。结果表明,采用折/衍混合系统消热差,不仅增加了选材自由度,还巧妙地简化了红外光学系统的设计难度。

参 考 文 献

- Li Lin, Wang Xuan. Current status and prospects for thermal effects on optical systems and athermalisation techniques [J]. *Optical Technology*, 1997, 23(5):26~29
李林,王焯. 环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望[J]. *光学技术*, 1997, 23(5):26~29
- Gregory P. Behrmann, John P. Bowen. Influence of temperature on diffractive lens performance [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(14):2483~2489

- 3 Russell M. Hudyma. Athermal MWIR objectives [C]. *SPIE*, 1995, **2540**:229~235
- 4 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Zhao Qiuling *et al.*. Hybrid diffractive refractive optical system design of head-mounted display for augmented reality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):121~124
张慧娟,王肇圻,赵秋玲等.折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计[J].*光学学报*,2004,**24**(1):121~124
- 5 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. The study of hybrid refractive-diffractive singlet in the eyepiece [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2):236~239
张慧娟,王肇圻,李凤友等.折/衍混合单透镜在目镜中的应用研究[J].*光学学报*,2003,**23**(2):236~239
- 6 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive ultra-wide-angle eyepieces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):85~88
张慧娟,王肇圻,傅汝廉等.折-衍混合超广角视场目镜系统的设计[J].*光学学报*,2003,**23**(1):85~88
- 7 Sun Qiang, Yu Bin, Wang Zhaoqi *et al.*. Application of binary optical element to infrared hyperspectral detection [J]. *Science in China (Series E)*, 2003, **33**(9):839~844
孙强,于斌,王肇圻等.二元光学在红外超光谱探测中的应用[J].*中国科学(E辑)*,2003,**33**(9):839~844
- 8 Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. Study of an athermal infrared dual band optical system design containing harmonic diffractive element [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(6):557~561
孙强,王肇圻,李凤友等.含有谐衍射元件的红外双波段减热差系统设计[J].*科学通报*,2003,**48**(6):557~561
- 9 Sun Qiang, Yu Bin, Wang Zhaoqi *et al.*. Study on hyperspectral detection system with the harmonic diffractive element in infrared dual-band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(3):756~761
孙强,于斌,王肇圻等.谐衍射双波段红外超光谱探测系统研究[J].*物理学报*,2004,**53**(3):756~761
- 10 Milton Laikin. *Lens Design* [M]. Third edition, revised and expanded. New York, Basel; Marcel Dekker, Inc., 2001. 211~220
- 11 Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(10):3001~3006



正交偏振激光原理

张书练 著

偏振是激光器的普遍现象。任何一个激光纵模都是偏振的,而相邻纵模偏振方向成固定关系,平行或正交偏振。本书是一部关于激光与偏振的专著,可供国内外从事激光教学和研究的教师、科技人员,科技管理人员,研究生和大专院校本科学子阅读,也可供其它行业的科技工作者参考。

第1章 系统而简洁的概括了激光原理的基本内容;

第2章 介绍了塞曼激光和四频环形激光器的原理;

第3章 大量激光实验、现象、理论分析及其应用新知识。

第3章 在激光物理和激光器件方面,您可以看到各种量子光学现象使气体、Nd:YAG微片、半导体等激光器的一个频率变成频差可调的两个正交线偏振频率。

第4章 与第3章原理对应的是一系列正交偏振激光器的结构及设计;

第5章 强烈模竞争或中度模竞争之间的转换等;

第6章 激光器应用。

本专著引用的研究成果是最近十几年做出的,主要来自张书练课题组(中国),部分来自 A. Le Floch 课题组(法国)和 W. Holzapfel的课题组(德国),同时也介绍了美国、英国、日本、瑞士等国家科学家的研究。

本书由周炳琨院士作序,清华大学出版社,68元/本,书店有售,或直接与清华大学出版社的龚华蓉老师(010-62781712 转 4113),张秋玲老师(zhangql@tup.tsinghua.edu.cn,010-62781712 转 4107)联系。