

doi:10.3788/gzxb20134212.1524

双层谐衍射红外消热差系统设计

张欣婷, 安志勇

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要:考虑到消像差和消热差,在谐衍射的基础上提出了双层谐衍射透镜的概念.采用 Ge 和 AMTIR I 两种红外材料组成的三片式折衍射混合结构设计了工作于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 双波段、 $F/\#$ 为 1.2 的大相对孔径红外消热差光学系统.该系统在 $(-40\sim +60)\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内性能稳定,适用于像元尺寸 $25\ \mu\text{m}$,像元数 640×480 的凝视式双波段焦平面阵列探测器,可在 2 km 时分辨 3 m 范围的目标.它既保留了普通衍射透镜的独特性能,又可以在一系列分离的波长处获得相同的光焦度,且大幅度提高各波段的衍射效率.

关键词:光学设计;双波段;大相对孔径;双层谐衍射;消热差光学系统

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)12-1524-4

Design of Infrared Athermal System with Double-layer Harmonic Diffractive Element

ZHANG Xin-ting, AN Zhi-yong

(College of Optoelectronic Engineering Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Considering the requirements of aberration and athermalized aberration, the concept of double harmonic diffractive element (HDE) was put forward based on the HDE. An infrared athermalized optical system that consists of two kinds of infrared materials composed AMTIRI and Ge was designed with work dual-band of $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and $8\sim 12\ \mu\text{m}$ and the large relative aperture of 1.2. This system had stable performance in the range of $(-40\sim +60)\text{ }^\circ\text{C}$, was able to be applied in the dual-band staring focal plane array detector with the pixel size of $25\ \mu\text{m}$ and the number of pixel 640×480 , and could distinguish the goals in 3 m when the role of distance was 2 km. It retained the unique properties of common diffractive lens, and could obtain the same focal power in a series of separate wavelength. So, it can greatly improve the diffraction efficiency of each band.

Key words: Optical design; Dual-band; Large relative aperture; Double-layer harmonic diffractive; Athermal optical system

0 引言

对于双波段光学红外系统,均匀性好的材料很难获取、材料种类少、传统纯折射型的红外双波段光学系统体积大,造成后续的机械结构也很复杂.因此在折射系统中引入衍射光学,利用衍射光学元件具有负色散特性、可实现对光波面的任意相位调制,与

折射元件配合可以改善系统成像质量、减小系统体积和重量^[1-2].

衍射光学的崛起,给现代光学系统设计提供了更多的自由度,然而普通的衍射透镜只在中心波长有很高的衍射效率,无法用于宽波段.1995年, Sweeney、Sommargren、Faklis 和 Morris 分别提出了“谐衍射透镜”的概念^[3-4],它可以在一系列分离波

第一作者:张欣婷(1984-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为光学设计与光学仪器及检测. Email:luoyiwuhens@163.com

导师:安志勇(1943-),男,教授,博导,主要研究方向为光学仪器和光电检测. Email:an_zhiyong@126.com

收稿日期:2013-04-11;录用日期:2013-05-24

长处获得相同的光焦度,在一定程度上克服了衍射元件大色差的缺点,可用于多光谱、宽视场以及大数值孔径的光学成像系统中,但是单层谐衍射元件的衍射效率依旧受到限制.为了提高谐衍射元件宽波段的衍射效率,多层谐衍射元件(Harmonic Diffractive Optical Element, HDOE)应运而生.近年来,关于双层谐衍射元件的物理特性、衍射效率及应用方面时有报道^[5-6],但对谐衍射消热差这部分的理论阐述的还不是很完整.因此本文对双层谐衍射元件消热差的理论进行了深入探讨,采用 Ge 和 AMTIRI 两种红外材料组成的三片式折衍射混合结构,设计了工作于 3~5 μm 和 8~12 μm 双波段、 $F/\#$ 为 1.2 的大相对孔径红外消热差光学系统,可用于远距离的目标探测.

1 谐衍射元件

普通衍射元件的焦距随波长的变化而变化,且只有在中心波长衍射效率高;而单片谐衍射元件适用波段较窄,只在一系列分离波长处获得很高的衍射效率;折/谐衍射混合元件可用于双波段成像,但衍射效率不及多层衍射元件^[7-8].针对以上各种衍射元件的优缺点分析,本文采用双层谐衍射元件与折射元件组合而成的折/谐衍射混合系统,以实现双波段、宽光谱成像,保证较高的衍射效率.用这种方法设计的双波段光学系统可使其光学结构更加紧凑,透镜片数减少,且具有良好的消色差特性.图 1 为几种衍射元件的结构^[9-10].其中图(a)、(b)、(c)分别为普通衍射元件、单层谐衍射元件、双层谐衍射元件.

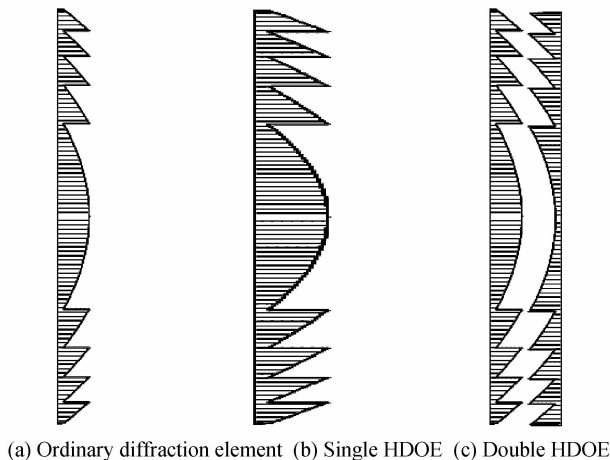


图 1 衍射元件

Fig. 1 Diffractive element

在谐衍射多波段成像中,谐衍射透镜同普通透镜一样会聚入射光线,但它不是根据折射原理,而是利用衍射原理.由于衍射作用,透镜产生色差的有效焦距同波长成反比^[11]

$$f_{m,\lambda} = (p\lambda_0/m\lambda)f_0 \quad (1)$$

式中, P 为相位匹配因子,一般取代表最大相位调制的 2π 的整数倍; m 为衍射级次; λ_0 为设计波长; f_0 为设计波长的焦距; $f_{m,\lambda}$ 为任意波长 λ 处的焦距.

与普通衍射透镜相比,当环境折射率 n_0 取 1 时,其中心厚度为 $P\lambda_0/(n-1)$,是普通衍射元件的 P 倍,环带间光程差为 $p\lambda_0$,相当于设计波长为 $p\lambda_0$,焦距为 f_0 的普通衍射透镜,这就是 HDOE.若对使用波长为 λ 的 m 衍射级次成像,则其焦距 $f_{m,\lambda}$ 为 $P\lambda_0/m\lambda$,如果要求 $f_{m,\lambda}$ 与设计焦距 f_0 重合,即应满足^[12,13]

$$\lambda m = p\lambda_0 \quad (2)$$

分析表明,波长满足式(2)的整数 m 所对应的波长均将会聚到共同的焦点 f_0 处.通过设计参量 p ,在一定光谱区范围内控制哪几种的波长会聚到一个焦平面.我们把具有不同衍射级次、但有相同焦距的各光波波长称为谐振波长.

2 折/谐衍射双波段红外消热差系统设计原理

2.1 谐衍射元件的色差特性

在光学系统中,由不同波段色光的色散所引起的离焦,称为色差^[14].通常环境介质为空气,环境折射率 n_0 取 1,因此可忽略 n_0 对 $\Delta\lambda$ 的影响,相位因子 p 及环带半径 r_m 均不随波长 λ 的变化而改变.在衍射透镜中,除了 $f_1/f_2 = \lambda_1/\lambda_2$ 和 $\Delta\varphi/\varphi = \Delta\lambda/\lambda$ 外,谐振作用使得 $\Delta\varphi/\varphi$ 变为原来的 $1/p$ 倍.随着 p 的增大,衍射元件所引起的色散逐渐减小,相应的厚度增加,这就使得由 $\Delta\lambda$ 引起的 Δn 的变化所产生的色差增大.通过上述分析,可得消色差条件为

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 \omega_i \varphi_i = 0 \quad (3)$$

式中 $\omega_i = \Delta\varphi/\varphi$,表示第 i 片透镜的色散因子,即色散引起的光焦度的相对变化,在数值上等于材料的阿贝数的倒数; φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; h_i 为近轴光线在第 i 个面上的入射高度.

2.2 谐衍射元件的热差特性

在光学系统中,由于温度的变化而引起的离焦,称为热差^[15].

$$\text{光学热膨胀系数为 } x_f = \frac{1}{f} \cdot \frac{df}{dT} = -\frac{d\varphi_i}{\varphi} \quad (4)$$

对于谐衍射透镜,温度的变化主要引起如下因素的改变,如表 1.

表中 $h_p = p\lambda_0/(n-n_0)$, r_m 和 h_p 的变化仅相对于初始的 r_{m0} 和 h_{p0} 而言,而 r_{m0} 和 h_{p0} 一旦被确定就不再变化,因此可由 $r_m(T)$, $h_p(T)$, $n(T)$, $n_0(T)$ 这四个变量求出 $f(T)$,从而确定谐衍射的热差特性.

表1 透镜参量随温度的变化

Table 1 Changes of the lens parameters with temperature

| Temperature t | $(t + \Delta t)$ | |
|------------------------------|------------------|---|
| Zone radius | r_m | $r_m(T) = (1 + \alpha_g \Delta T) r_{m0}$ |
| Phase depth | h_p | $h_p(T) = (1 + \alpha_g \Delta T) h_{p0}$ |
| Medium refractive index | n | $n(T) = n + (dn/dT) \Delta T$ |
| Environment refractive index | n_0 | $n_0(T) = n_0 + (dn_0/dT) \Delta T$ |

当 p 很小时, h_p 也很小, 此时忽略厚度变化, 则谐衍射元件的 x_f 与衍射元件的 $x_{f,d}$ 相近. 随着 p 增大, h_p 增大, $f(T)$ 变的复杂, 谐衍射元件 x_f 介于折射元件 $x_{f,r}$ 和衍射元件 $x_{f,d}$ 之间, 直至厚度的变化起主导作用, 此时变为纯折射透镜.

由于谐衍射元件 p 很小, 因此 x_f 仅与材料热膨胀系数有关, 而与材料折射率无关. 因此, 消热差条件为

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 x_i \varphi_i = \alpha_H L \quad (5)$$

式中 x_i 为第 i 片透镜的光热膨胀系数; α_H 为镜筒的热膨胀系数; L 为系统总长.

2.3 折/谐衍射消热差方程组

若对谐衍射透镜选择合适的 p , 则可在一系列分离的波长上获得相同的光焦度, 选取时需要在双波段中均有谐振波长. 同时, 为了在消色差和消热差时计算方便, 选用相位因子 $p=2$, 既可以提高探测效果, 又可以使制造工艺变得简单.

根据上述理论, 必须在双波段上分别满足式(6)~(8)

$$\text{光焦度分配} \quad \sum h_i \varphi_i = \varphi \quad (6)$$

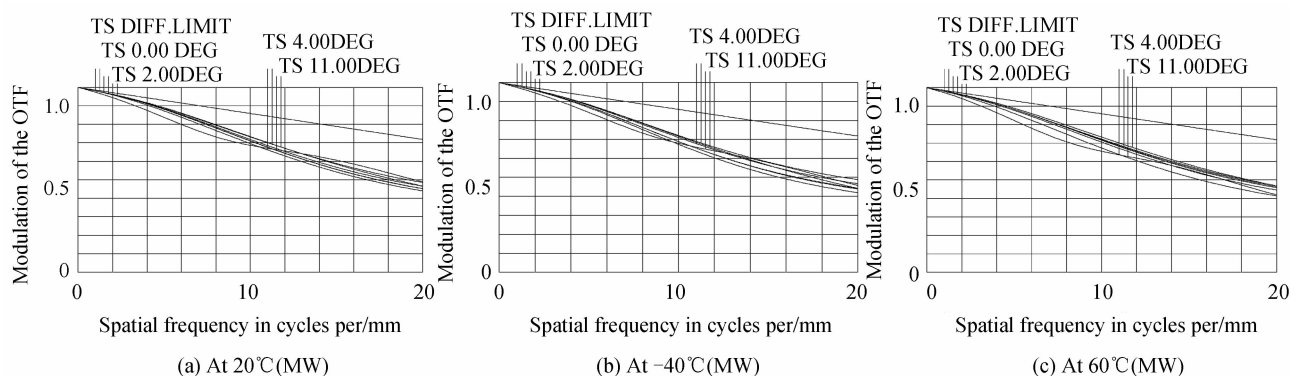
$$\text{消色差方程} \quad \sum_{i=1}^n h_i^2 \varphi_i / \nu_i = 0 \quad (7)$$

$$\text{消热差方程} \quad \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^n h_i^2 x_i \varphi_i = \alpha_H L \quad (8)$$

式中, 谐衍射面在中波红外和长波红外的色散因子分别为

$$\nu_1 = \frac{\lambda_{(1)\text{mid}}}{\lambda_{(1)\text{short}} - \lambda_{(1)\text{long}}} \quad (9)$$

$$\nu_2 = \frac{\lambda_{(2)\text{mid}}}{\lambda_{(2)\text{short}} - \lambda_{(2)\text{long}}} \quad (10)$$



3 设计结果

3.1 技术指标

根据使用要求及谐衍射光学元件的相关特性, 红外无热化系统技术指标为: 1) 工作波段: $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 双波段; 2) 视场角: $2\omega = 22^\circ$; 3) F 数: $F\# = 1.2$; 4) 焦距: 50 mm ; 5) 工作温度范围: $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$; 6) 当探测器奈奎斯特频率为 20 lp/mm 时, 要求最大视场 (Modulation Transfer Function, MTF) 大于 0.4 .

3.2 光学系统像质评价

由于光学系统的相对孔径很大, 引入了较多的高级像差, 而高级像差系数正比于初级像差系数, 因此将第一片透镜的后表面和第二片透镜的前表面设计为衍射面, 在通光孔径范围内共有 12 个环带, 易于用金刚石车床加工. 此外, 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, 而不改变原系统的光学性能参量, 因此选择将光阑居前组正中, 以尽可能减小轴外像差.

图2为红外消热差光学系统结构图, 系统总长 78 mm . 前后两片材料为 Ge , 中间一片为 AMTIRI .

图2 光学系统结构

Fig. 2 Optical system structure

图3(a)~(c)分别为中波波段在 20°C 、 -40°C 和 60°C 的 MTF 曲线; 图3(d)~(f)分别为长波波段在 20°C 、 -40°C 和 60°C 的 MTF 曲线. 像元尺寸 $25 \mu\text{m}$ 对应的奈奎斯特频率, 即 20 lp/mm 处, 0 视场、 0.7 视场和全视场的子午面和弧矢面 MTF 值均大于 0.4 .

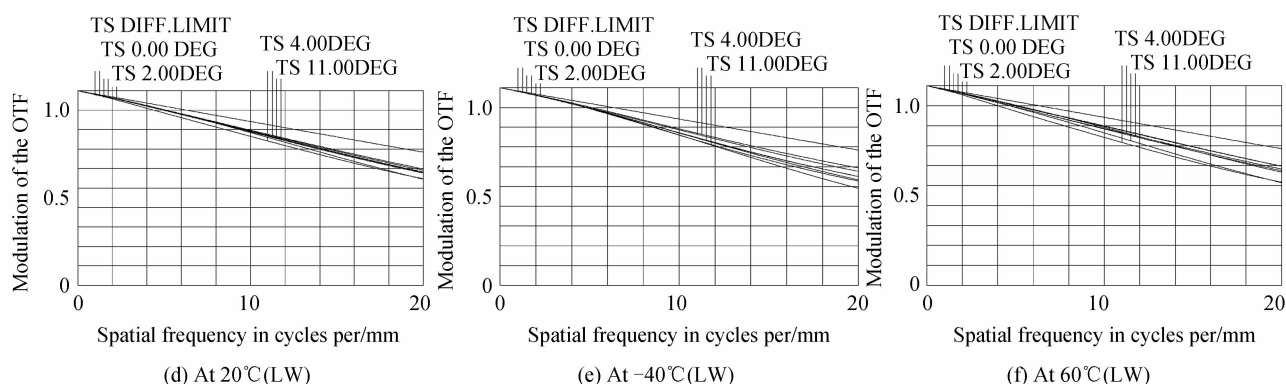


图3 不同温度时的传递函数曲线

Fig.3 Modulation transfer function curves at different temperatures

此外,光学系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内的最大离焦量为 $15\ \mu\text{m}$,而计算所得的系统焦深为 $\Delta=\pm 2\lambda, F\#^2=\pm 23\ \mu\text{m}$,可见,系统的最大离焦量小于焦深,满足成像质量要求.同时,系统点列图中的均方根直径均小于探测器的单个像元尺寸 $25\ \mu\text{m}$,两者的尺寸相匹配,从而获得最佳成像质量.

4 结论

本文采用Ge和AMTIR I两种红外材料组成的三片式结构,引入了一个双层谐衍射元件,设计了工作于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 双波段、 $F/\#$ 为1.2的大相对孔径的红外消热差光学系统.该系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内性能稳定,适用于像元尺寸 $25\ \mu\text{m}$,像元数 640×480 的凝视式双波段焦平面阵列探测器.可在作用距离 $2\ \text{km}$ 时,分辨 $3\ \text{m}$ 范围的目标.

参考文献

- [1] TAMAGAWA Y, TAJIME T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(1): 297-301.
- [2] SWEENEY D W, SOMMARGREN G E. Harmonic diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(14): 2469-2475.
- [3] LI Sheng-hui, YANG Chang-cheng, ZHENG Jia, et al. Optical passive athermalization for infrared zoom system[C]. SPIE, 2007, 6722-67224E.
- [4] 袁旭沧. 光学设计. 北京:北京理工大学出版社[M]. 1988, 96-143.
- [5] HAN Ying, WANG Zhao-qi, YANG Xin-jun, et al. Design on athermal infrared diffractive-refractive hybrid inverted telephoto system in $8\sim 12\ \mu\text{m}$ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 77-80.
韩莹,王肇圻,杨新军,等. $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段折/衍混合反望远系统消热差设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 77-80.
- [6] SUN Qiang, WANG Zhao-qi, LI Feng-you, et al. Infrared dual-band athermal system design with harmonic diffractive element[J]. *Science Bulletin*, 2003, **48**(6): 557-561.
孙强,王肇圻,李凤有,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.
- [7] LIU Huan-yu, ZHANG Liang, LIU yu, et al. Optical design of a dual-band infrared system based on harmonic diffraction[J]. *Electronics optics and control*, 2011, **18**(5): 50-53.
刘环宇,张良,刘玉,等. 红外双波段谐衍射光学系统设计, *光电与控制*, 2011, **18**(5): 50-53.
- [8] LIU Lin, SHEN Wei-min, ZHOU Jian-kang. Design on athermalized middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(3): 675-679.
刘琳,沈为民,周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675-679.
- [9] CHEN Xiao, YANG Jian-feng, MA Xiao-long, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid efractive-diffractive objective in $8\sim 12\ \mu\text{m}$ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2090-2092.
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): 2090-2092.
- [10] HU Yu-xi, ZHOU Shao-xiang. Design of athermalization optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1386-1391.
胡玉禧,周绍祥. 消热差光学系统设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1386-1391.
- [11] CHEN Jie, BAI Jian. Design of athermalization for dual-band infrared optical system based on harmonic diffraction[J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(3): 61-65.
陈杰,白剑. 基于谐衍射特性的双波段红外系统消热差设计[J]. *光学仪器*, 2006, **28**(3): 61-65.
- [12] XING De-cai, FENG Guo-ying. The impact of temperature change on the performance of harmonic diffraction lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 624-627.
邢德财,冯国英. 温度变化对谐衍射透镜性能的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 624-627.
- [13] SUN Qiang, LU Zhen-wu, WANG Zhao-qi. The dual band design of harmonic diffractive-refractive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 830-833.
孙强,卢振武,王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 830-833.
- [14] LIU Ying, PAN Yu-long. Design of imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2065-2070.
刘英,潘玉龙等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2065-2070.
- [15] FAN Chang-jiang, WANG Zhao-qi, FAN Xin-yan. Optical system design of dual-band infrared athermalized with double harmonic diffractive element[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1617-1621.
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.