

光学材料元件 ·

文章编号 :1001-5078(2004)06-0464-03

用于大相对孔径红外镜头的衍射光学元件

李荣刚,张兴德,贺谊亮

(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:将衍射光学元件应用于非制冷热像仪的大相对孔径红外镜头与传统设计相比,衍射光学元件的引入,增强了此类镜头的色差校正能力,提高了镜头的成像质量,提高了镜头的透过率,减少了光学零件的数量,减轻了系统重量,为提高非制冷热像仪的性能奠定了坚实基础。本文在色差、成像质量、系统透过率与 MRTD 方面比较了不同结构镜头的性能。

关键词:衍射光学元件;红外镜头;光学设计;非制冷热像仪

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A

Diffractive Optical Elements Used in High Relative Aperture Infrared Lenses

LI Rong-gang, ZHANG Xing-de, HE Yi-liang

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to improve performance of uncooled thermal imager, diffractive optical elements (DOEs) are applied in high relative aperture IR lenses. Compared with conventional design, it enhances the ability of color correction, improves the image quality and lenses transmission, and reduces the elements and weight. DOEs provides fundamental basis for enhancing uncooled thermal imager performance. The paper compared four kinds IR lens in term of axial chromatic aberrations, MTF, transmission and MRTD.

Key words: diffractive optical elements; IR lenses; optical design; uncooled thermal imager

1 引言

随着国内外金刚石精密切削技术的飞速发展,具有特殊面型与功能的新型光学元件不断涌现并应用到系统中,衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE)就是其中一种典型的非传统光学元件。衍射光学元件除了可以实现传统光学元件的功能,还可以实现色差校正、热差校正等一些特殊功能。衍射光学元件与传统光学元件混合使用,扩展了光学设计的自由度,为设计制作高性能光学系统提供了新的手段;并且可以在此基础上优化光学系统的结构、减少系统中光学元件的数量,实现系统小型化

设计。

本文将从用于 8~12 μ m 非制冷热像仪大相对孔径红外镜头出发,对比此类红外镜头的多种设计,突出衍射光学元件在此类镜头中的作用。

2 设计中考虑的因素

2.1 非制冷探测器对光学系统的影响

最小可分辨温差(MRTD)是衡量红外成像系统的综合指标,它将系统的温度分辨率与空间分辨率

作者简介:李荣刚(1977-),男,硕士研究生,工程师,从事红外光学系统的设计与研究工作。E-mail:rongganglee@eyou.com

收稿日期:2004-06-21

联系起来,可以全面地表征系统的目标的分辨能力。MRITD 与光学参数之间有如下关系^[1]:

$$MRITD = \frac{F/\#}{\tau \times MTF} \quad (1)$$

其中 $F/\#$ 为镜头 F 数; τ 为镜头透过率; MTF 为镜头光学传递函数。

与制冷型的红外探测器相比,非制冷型探测器的灵敏度较低。如果使 8~12 μm 非制冷热像仪具有较理想性能指标,这就要求增大镜头系统相对孔径,提高系统透过率,并且镜头的成像质量要尽量好。

随着镜头系统相对孔径的增大,色差成为影响系统成像质量的一个重要因素,图 1 为镜头孔径尺寸与色差的关系。当镜头的色差超过探测器像元尺寸时,就要对镜头的色差进行校正。

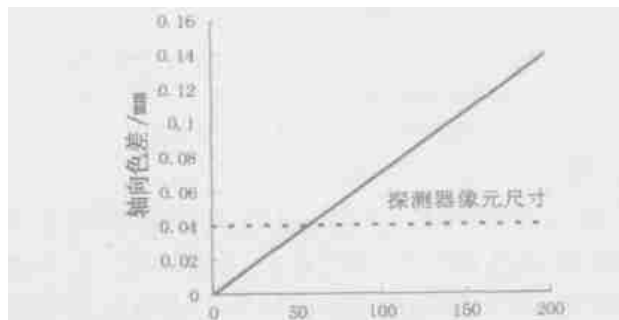


图 1 镜头孔径尺寸与色差的关系

图 1 镜头孔径尺寸与色差的关系

2.2 衍射光学元件设计考虑的因素

对于衍射光学元件,衍射效率与中心波长、波段范围、衍射级以及材料的折射率有关。由于大部分的光学系统均工作在一定的波段范围内,而衍射光学元件只对中心波长的光精确闪耀(衍射效率为 100%),其衍射效率随着使用波长的偏离设计波长而降低。衍射光学元件的第 m 级衍射的衍射效率为^[2]:

$$\eta(m, \lambda) = \frac{\sin^2 \left[-\frac{0 \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] - m}{2} \right]}{\left[-\frac{0 \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] - m}{2} \right]^2} \quad (2)$$

其中 λ_0 为中心波长, m 为衍射级, n 为材料折射率。在 8~12 μm 波段范围内,衍射效率与波长,衍射级的关系如图 2 所示,所以在设计中我们一般采用 +1 级衍射。

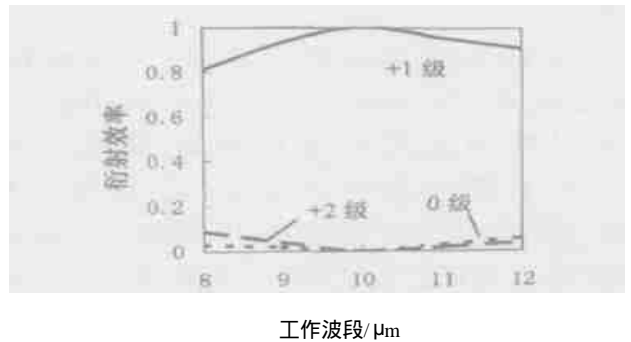


图 2 衍射效率与衍射级、波段的关系

采用 +1 级衍射,工作在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段衍射光学元件的衍射效率为^[3]:

$$\eta = \eta^2(1, \lambda) d \quad (3)$$

最大条件为 $d/\lambda = 0$, 即衍射光学元件的设计波长应为:

$$\lambda_0 = \frac{2 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (4)$$

M. Rossi 指出:衍射效应发生的条件为位相数大于 1;但是利用衍射光学元件实现色差校正,衍射面的位相变换数要大于 4,否则色差校正效果不理想^[4]。这也是衍射光学元件的只能用在在大相对孔径系统的原因之一。

3 光学设计与性能分析

本文采用的 320 × 240 型非制冷探测器,探测器像元尺寸为 40 μm × 40 μm ,镜头参数为:焦距 150mm, $F/1$,工作波段 8~12 μm ,中心波长 10 μm ,对角线视场 6°。下面给出用于 8~12 μm 非制冷热像仪大相对孔径红外镜头的设计结果(如图 3),他们分别为 Ge/Ge/Ge、Ge/ZnSe/Ge、Ge/AMTIR1/ZnSe/Ge、Ge/DOE/Ge 的结构形式,并在设计的基础上对这四种设计进行比较分析。

在四种设计中,为了减小镜头孔径,孔径光阑设在第一透镜的第一面,并且利用非球面技术校正球差(Ge/DOE/Ge 结构形式中的衍射面以非球面为基底)。

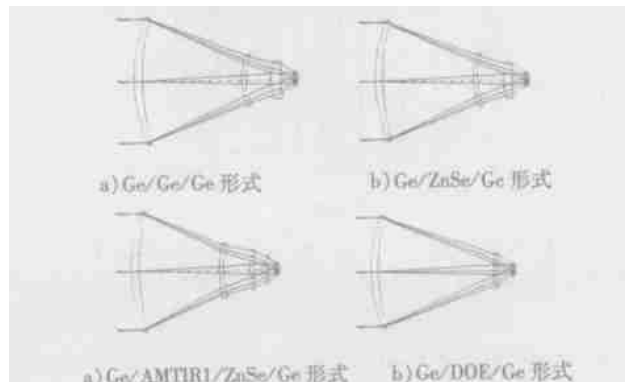


图 3 红外镜头的结构形式

3.1 色差

Ge/ Ge/ Ge 结构形式中只采用了一种材料锗,不能校正色差;Ge/ ZnSe/ Ge 与 Ge/ AMTIR1/ ZnSe/ Ge 结构形式中利用光学材料锗、硒化锌以及 AMTIR1 的搭配进行色差校正,后者只是利用 AMTIR1 消除硒化锌过量色差;Ge/ DOE/ Ge 的结构形式利用衍射面进行色差校正,四种形式色差比较见图 4,可以看出衍射光学元件在校正色差方面的优势。

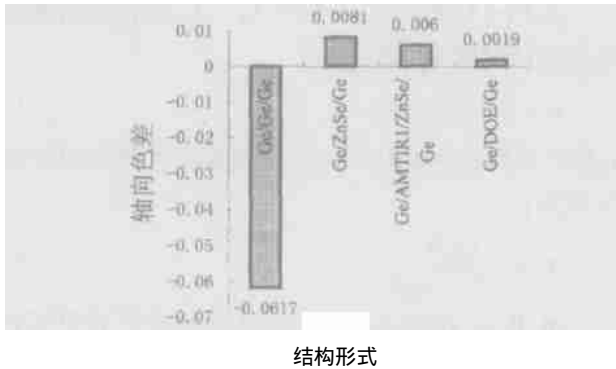


图 4 不同结构镜头色差对比

3.2 成像质量

我们用光学传递函数 (MTF) 这一指标来评价系统的成像质量;四种形式轴上与轴外 2.5 在 30c/mm 处 MTF 见图 5。Ge/ AMTIR1/ ZnSe/ Ge 与 Ge/ DOE/ Ge 结构形式镜头的 MTF 明显好于其他两种形式;由于衍射光学元件只对中心波长的 +1 级衍射有 100% 的衍射效率,其他波长与衍射级的光形成杂散光,降低了像面的对比度^[5],使得 Ge/ DOE/ Ge 结构的 MTF 略低于 AMTIR1/ ZnSe/ Ge 结构的 MTF。

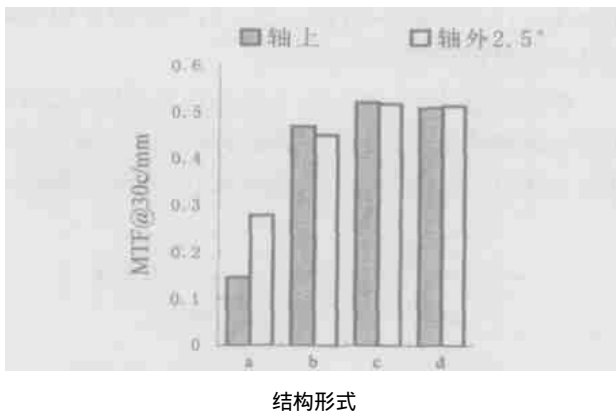


图 5 不同结构镜头的 MTF @30c/mm

3.3 系统透过率与相对 MRTD

随着镜头中光学零件的数量的变化,镜头透过率也发生相应的变化。镜头中除第一光学零件的第

一面镀硬膜以外,其余均镀增透膜。很显然,Ge/ DOE/ Ge 结构的透过率最高,Ge/ AMTIR1/ ZnSe/ Ge 最低,相应地我们利用 (1) 式可以比较他们相对 MRTD,以比较过程中我们将 Ge/ Ge/ Ge 结构的 MRTD 进行了归一化,可以得到 Ge/ DOE/ Ge 结构的 MRTD 最小。系统透过率与相对 MRTD 的对比如图 6 所示。

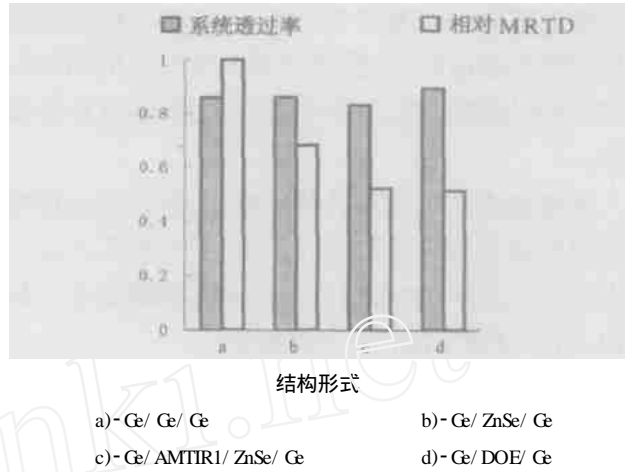


图 6 不同结构镜头的透过率与相对 MRTD

4 结论

从以上四种用于 8 ~ 12μm 非制冷热像仪大相对孔径红外镜头设计与性能比较可以看出:在大相对孔径的非制冷镜头中,Ge/ DOE/ Ge 结构形式的镜头不仅在光学性能上优于其他三种设计,而且可以使非制冷热像仪整机的性能得到提高;另外,衍射光学元件的引入也为简化系统的结构提供了一种比较有效的途径。

参考文献:

- [1] 张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与热成像技术 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1995,240.
- [2] Faklis D, Morris GM. Spectral properties of multi-order diffractive lens [J]. Apply Optics, 1995, 34 (14) : 2464 - 2467.
- [3] M Rossi, et al. Refractive and diffractive Properties of planar micro-optical elements [J]. Applied Optics, 1995, 34 (26) : 5996 - 6007.
- [4] Kudo, et al. Diffractive lens in 8 to 10μm forward-looking infrared system [J]. Applied Optics, 2002, 41 (8) : 1787 - 1791.
- [5] D A Burralli, G M Morris. Effect of diffractive efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses [J]. Applied Optics, 1995, 31 (22) : 4389 - 4396.