

# 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

张博, 崔庆丰\*, 朴明旭, 胡洋, 孙林

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 基于双波段系统的多层衍射光学元件(MLDOE)的带宽积分衍射效率(PIDE),建立其与入射角度和基底材料关系的数学模型,提出一种双波段斜入射多层衍射光学元件基底材料的选择方法,并通过该方法选择出双波段多层衍射光学元件基底材料的最佳组合方案。方法的提出以及数学模型的建立,解决了光线斜入射时基底材料选择不当导致多层衍射元件衍射效率和带宽积分衍射效率下降的问题,为多层衍射元件在多波段和宽波段系统中的应用提供理论指导。依据该方法,设计了适用于中波红外 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ (MWIR)和长波红外 $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$ (LWIR)双波段的多层衍射光学元件,并利用该衍射元件设计了10倍中长波折衍混合双波段红外变焦系统。结果表明,该系统在中波红外奈奎斯特频率处的调制传递函数(MTF)均大于0.52,在长波红外奈奎斯特频率处的MTF均大于0.35。

**关键词** 衍射光学; 衍射元件; 透镜; 红外成像

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0605001

## Substrate Material Selection Method for Dual-Band Multilayer Diffractive Optical Elements and Its Application in the Zoom System

Zhang Bo, Cui Qingfeng\*, Piao Mingxu, Hu Yang, Sun Lin

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In this study, a mathematical model of the relationship between the bandwidth integral diffraction efficiency (PIDE) and the incident angle with the substrate material of a multilayer diffractive optical element (MLDOE) for a two-band system is established. A method for selecting a double-band oblique incident MLDOE substrate material is proposed; this method selects the best base material combination of the dual-band MLDOE. The proposed method and the mathematical model solve the problem in which the improper selection of the substrate material leads to a decrease in the diffraction efficiency and bandwidth integral diffraction efficiency of the MLDOE when light is obliquely incident. In addition, the method provides theoretical guidance for the application of MLDOE in multi-band and wide-band systems. According to the method, an MLDOE suitable for a medium wave infrared (MWIR) of  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$  and a long wave infrared (LWIR) of  $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$  is designed, and a  $10\times$  hybrid zoom lens is designed using the diffraction element for the dual-band. The results show that the modulation transfer function (MTF) of the system at the Nyquist frequency of the MWIR is greater than 0.52 and the MTF at the Nyquist frequency of the LWIR is greater than 0.35.

**Key words** diffractive optics; diffractive optical elements; lenses; infrared imaging

**OCIS codes** 050.1965; 050.1970; 080.3620; 080.3630; 110.3080

## 1 引 言

变焦系统是最重要的光学系统之一,常被应用于民用和军用领域。随着探测要求的提高,许多成像应用需要宽波段或多波段变焦镜头,但增加的光

谱带宽引入了系统色差校正难的问题。成像衍射光学元件(DOE)具有特殊的色散特性,因此,研究人员开展了许多基于衍射元件实现系统消色差的研究<sup>[1-3]</sup>。文献[4]中,在中波-长波红外(MWIR-LWIR)光学系统和MWIR激光变焦镜头系统中使

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2019-11-24; 录用日期: 2019-12-05

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)、吉林省科技厅优秀青年人才基金项目(20190103134JH)、吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(JJKH20181110KJ)、长春理工大学青年基金项目(XQNJJ-2017-09)

\* E-mail: qf\_cui@163.com

用特殊的光学分离机构和衍射非球面(DAS)来实现合理的光学性能。文献[5]中,谐衍射元件(HDEs)应用于 MWIR-LWIR 双波段光学系统,在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围内同时实现了消色差和消热差。在参考文献[6]中,使用 2 个 DOE 设计了大变倍比 MWIR 变焦光学系统。然而,这些变焦镜头设计中使用的 DOE 均为单层衍射光学元件,因此在双波段系统中无法实现高衍射效率,进而无法实现高质量成像。

多层衍射光学元件(MLDOE)可以校正宽波段或多波段系统色差,并具有高衍射效率。将 MLDOE 应用于宽波段或者多波段变焦光学系统中,可以实现系统消色差的同时,简化系统结构。当 MLDOE 用于变焦镜头时,MLDOE 的入射角随着焦距的变化而不同。当入射角改变时,MLDOE 的衍射效率降低,从而导致折衍射混合变焦光学系统的成像质量下降。文献[7]中讨论了填充型三层衍射元件的衍射效率受温度和角度影响的情况,文献[8]中讨论了光线斜入射时,以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)-聚碳酸酯(PC)为基底材料的多层衍射元件的衍射效率受阴影效应影响的情况。上述文献虽然讨论时都考虑到了入射角度,但都是针对某一固定基底材料组合进行讨论,并且没有讨论其他基底材料组合的情况。

本文提出了双波段系统中 MLDOE 元件的带宽积分平均衍射效率(PIDE)关于入射角度和基底材料的数学关系模型,给出了应用于双波段系统中的 MLDOE 的设计方法和最佳基底材料选择方法。根据该方法分析得到了中长波红外双波段多层衍射光学元件的最佳基底材料组合为硒化锌(ZNSE)和硫化锌(ZNS),并设计了一个包含该多层衍射元件的 10 倍折衍射混合中长波红外双波段变焦系统,给出了系统设计结果和公差分析结果。

## 2 斜入射双波段 MLDOES 的基底材料选择方法

目前,常用的 MLDOE 结构类型包括双层衍射

光学元件和三层衍射光学元件,他们都由两个相同周期不同微结构高度的谐衍射光学元件 HDEs<sup>[9]</sup> 组成。双层衍射光学元件将衍射微结构加工在两种不同色散性质的基底材料上,中间介质为空气。三层衍射光学元件与双层衍射光学元件类似,只是将中间的介质由空气换成光学塑料等其他光学介质。基于标量衍射理论可知,评价宽波段内多层衍射光学元件综合性能的 PIDE<sup>[10]</sup> 为

$$\bar{\eta}_m(\lambda, \theta) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \text{sinc}^2 \left[ m - \frac{\phi_{\text{MLDOE}}(\lambda, \theta)}{2} \right] d\lambda, \quad (1)$$

式中: $\theta$  是入射角; $m$  是衍射级次; $\lambda$  是波长; $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  是波长的最大值和最小值; $\phi_{\text{MLDOE}}(\lambda, \theta)$  是多层衍射元件的相位延迟。图 1 给出了双层衍射光学元件的结构示意图,图中  $H_1$  和  $H_2$  分别代表双层衍射光学元件的第一个基底材料和第二个基底材料的表面微结构高度。



图 1 双层衍射光学元件的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-layer diffractive optical element

当双层衍射光学元件的基底材料与入射角相关时, $H_1$  和  $H_2$  可以用  $H_{1\theta}$  和  $H_{2\theta}$  表示,其表达式为

$$\begin{cases} H_{1\theta} = \frac{m\lambda_2 \cdot (\sqrt{n_2^2(\lambda_1) - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta}) - m\lambda_1 (\sqrt{n_2^2(\lambda_2) - n_1^2(\lambda_2)\sin^2\theta} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda_2)\sin^2\theta})}{K(\lambda_2)(\sqrt{n_2^2(\lambda_1) - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta}) - K(\lambda_1)(\sqrt{n_2^2(\lambda_2) - n_1^2(\lambda_2)\sin^2\theta} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda_2)\sin^2\theta})}, \\ H_{2\theta} = \frac{m\lambda_1 K(\lambda_2) - m\lambda_2 (\sqrt{n_2^2(\lambda_1) - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta})}{K(\lambda_2)(\sqrt{n_2^2(\lambda_1) - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda_1)\sin^2\theta}) - K(\lambda_1)(\sqrt{n_2^2(\lambda_2) - n_1^2(\lambda_2)\sin^2\theta} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda_2)\sin^2\theta})} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $K(\lambda) = n_1(\lambda) \cos \theta - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta}$ ,  $n_1(\lambda_1)$  是第一个衍射基底在波长 1 下的折射率值,  $n_2(\lambda_1)$  是第二个衍射基底在波长 1 下的折射率值,

$n_1(\lambda_2)$  是第一个衍射基底在波长 2 下的折射率值,  $n_2(\lambda_2)$  是第二个衍射基底在波长 2 下的折射率值。当入射角度为 0 时, (2) 式可以化简为

$$\begin{cases} H_1 = \frac{\lambda_2 [(n_2(\lambda_1) - 1)] - \lambda_1 [(n_2(\lambda_2) - 1)]}{[(n_1(\lambda_2) - 1)][(n_2(\lambda_1) - 1)] - [(n_1(\lambda_1) - 1)][(n_2(\lambda_2) - 1)]}, \\ H_2 = \frac{\lambda_1 [(n_1(\lambda_2) - 1)] - \lambda_2 [(n_1(\lambda_1) - 1)]}{[(n_1(\lambda_2) - 1)][(n_2(\lambda_1) - 1)] - [(n_1(\lambda_1) - 1)][(n_2(\lambda_2) - 1)]} \end{cases}, \quad (3)$$

双波段综合 PIDE,  $\bar{\eta}_m^C(\lambda, \theta)$  可以写成

$$\bar{\eta}_m^C(\lambda, \theta) = W_1 \cdot \bar{\eta}_m^{\lambda_1}(\lambda, \theta) + W_2 \cdot \bar{\eta}_m^{\lambda_2}(\lambda, \theta), \quad (4)$$

式中:  $W_1$  和  $W_2$  是每个波段 PIDE 的权重, 上角标 C 表示双波段综合值;  $\bar{\eta}_m^{\lambda_1}(\lambda, \theta)$  是第一个波段的 PIDE 值,  $\bar{\eta}_m^{\lambda_2}(\lambda, \theta)$  是第二个波段的 PIDE 值。根据不同波段的重要性, 可以选择权重值。通常情况下, 应保证每个波段的成像质量, 权重通常均取为 0.5。

根据参考文献[11], 可知混合光学系统的实际光学传递函数  $F_{r\_OTF}(f_x, f_y)$  可近似为 DOE 的 PIDE 与理论  $F_{OTF}(f_x, f_y)$  之间的乘积。所以实际光学传递函数可以写成

$$F_{r\_OTF}(f_x, f_y) = \bar{\eta}_m(\lambda, \theta) \cdot F_{OTF}(f_x, f_y), \quad (5)$$

其中  $f_x$  和  $f_y$  代表空间频率。PIDE 值越大, 其对双波段系统的成像质量的影响越小。因此, 应该选择最佳的基底材料组合, 在给定的入射角范围内获得高的 PIDE 值。

对于双波段变焦成像镜头中的 MLDOE, 斜入

射是一般情况, 并且入射角随着焦距的变化而不同。然而, 参考文献[12]中仅考虑了双波段 MLDOE 正入射的情况, 并且最大综合 PIDE 即  $\bar{\eta}_m^C(\lambda, \theta)$  可以通过最佳微结构高度  $H_1$  和  $H_2$  计算得到。当入射角为  $\theta (\theta \neq 0)$  时, 由微结构高度  $H_1$  和  $H_2$  计算得到的综合 PIDE 将下降, 进而导致成像质量受到影响。与先前推导出的表达式  $H_1$  和  $H_2$  不同, 我们可以通过计算出的双波段 MLDOE 考虑入射角度的微结构高度  $H_{1\theta}$  和  $H_{2\theta}$ , 进而获得任意入射角的最大综合 PIDE 即  $\bar{\eta}_m^{C,\theta}(\lambda, \theta)$ 。当入射角度  $\theta = 0$  时, 可以通过  $H_{1\theta}$  和  $H_{2\theta}$  计算出另一个综合 PIDE 即  $\bar{\eta}_m^{C,0}(\lambda, \theta)$ 。值得注意的是,  $H_{1\theta}$  和  $H_{2\theta}$  与  $H_1$  和  $H_2$  不同, 因此, 对应的  $\bar{\eta}_m^{C,0}(\lambda, \theta)$  和  $\bar{\eta}_m^{C,\theta}(\lambda, \theta)$  也是不同的。对于给定的基底材料组合, 可以通过  $\bar{\eta}_m^{C,0}(\lambda, \theta)$  和  $\bar{\eta}_m^{C,\theta}(\lambda, \theta)$  计算出唯一的综合 PIDE 差值  $\Delta\bar{\eta}_m^C(\lambda)$ , 即

$$\Delta\bar{\eta}_m^C(\lambda) = \Delta\bar{\eta}_m^{C,0}(\lambda) - \Delta\bar{\eta}_m^{C,\theta}(\lambda), \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \bar{\eta}_m^{C,0}(\lambda) = \frac{W_1}{\lambda_{1MAX} - \lambda_{1MIN}} \int_{\lambda_{1MIN}}^{\lambda_{1MAX}} \text{sinc}^2[m - \phi_0(\lambda)] d\lambda + \frac{W_2}{\lambda_{2MAX} - \lambda_{2MIN}} \int_{\lambda_{2MIN}}^{\lambda_{2MAX}} \text{sinc}^2[m - \phi_0(\lambda)] d\lambda \\ \bar{\eta}_m^{C,\theta}(\lambda) = \frac{W_1}{\lambda_{1MAX} - \lambda_{1MIN}} \int_{\lambda_{1MIN}}^{\lambda_{1MAX}} \text{sinc}^2[m - \phi_\theta(\lambda)] d\lambda + \frac{W_2}{\lambda_{2MAX} - \lambda_{2MIN}} \int_{\lambda_{2MIN}}^{\lambda_{2MAX}} \text{sinc}^2[m - \phi_\theta(\lambda)] d\lambda \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $\phi_0(\lambda)$  是通过  $H_1$  和  $H_2$  计算得到的正入射时的相位延迟;  $\phi_\theta(\lambda)$  是通过  $H_{1\theta}$  和  $H_{2\theta}$  计算得到的  $\theta = 0$  时的相位延迟。  $\phi_0(\lambda)$  和  $\phi_\theta(\lambda)$  的表达式为

$$\begin{cases} \phi_0(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^2 H_i [n_i(\lambda) - 1] \\ \phi_\theta(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^2 H_{i\theta} [n_i(\lambda) - 1] \end{cases}. \quad (8)$$

可以通过比较双波段 MLDOE 的综合 PIDE 差值来选择最佳的基底材料组合。  $\Delta\bar{\eta}_m^C(\lambda)$  的值越小, 表示入射角的影响越小, 并且对应的基底材料组合更适

用于大入射角度范围。

### 3 具有 MLDOE 的红外双波段变焦镜头的设计与分析

通常情况下, 变焦镜头由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组等四部分组成。变焦系统通常是保证系统的总长度不变, 通过变倍组和补偿组的连续移动来实现系统变焦。传统的双波段 MWIR/LWIR 光学系统通常使用致冷型探测器。然而考虑到体积、质量、成本和致冷要求限制等诸多因素, 本

研究中选择非致冷型探测器。同时,为了简化变焦系统的结构,光学系统包含的光学元件数量越少越好。因此,本研究将利用 MLDOE 实现红外双波段变焦系统的色差校正,简化了系统结构。根据本研究推导的双波段 MLDOE 基底材料选择模型得到多层衍射元件最佳基底材料组合并设计出对应的双波段多层衍射元件,利用该衍射元件完成了一个 10 倍的中波  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ (MWIR)-长波  $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$ (LWIR)双波段红外折衍射混合变焦系统设计,系统焦距范围为  $20\sim 200\ \text{mm}$ 。

### 3.1 双波段 MLDOE 基底材料的优化选择

通过单点金刚石车削(SPDT)<sup>[13]</sup>或精密模压工艺制造的高透过率材料包括锗(GE)、硫化锌(ZNS)、硒化锌(ZNSE)<sup>[14]</sup>、GASIR1<sup>[15]</sup>和 IRG26<sup>[16]</sup>。基于上述材料,可以得到 10 种可能的基底材料组合。其中一部分基底材料组合对应的表面微结构高度太大,不易于加工,同时阴影效应<sup>[17]</sup>明显,因此不予考虑。

根据本文中提出的双波段基底材料优化选择模型,分析每种可能的基底材料组合。当成像光束正入射至 MLDOE( $\theta=0$ )时,对应的最优表面微结构高度  $H_1$  和  $H_2$  可以通过(3)式计算得出,其最大综合 PIDE 可以通过(4)式计算得到。当 MLDOE 的入射角为  $\theta=5^\circ$  时,另一组最优表面微结构高度  $H_{1\theta}$  和  $H_{2\theta}$  可以由(2)式得到,并且相应的最大综合 PIDE 也可以通过(4)式计算得到。对每一种特定的材料组合都可以通过(6)式计算得到对应的 PIDE 差值  $\Delta\bar{\eta}_m^c(\lambda)$ ,如表 1 所示。综合 PIDE 与入射角之间的关系如图 2 所示。

表 1 不同基底材料组合对应的综合带宽积分平均衍射效率差值

Table 1 Comprehensive PIDE difference for different substrate material combinations

| Substrate material combination | $\Delta\bar{\eta}_m^c(\lambda) / \%$ |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| ZNSE-ZNS                       | 0.39                                 |
| GASIR1-ZNS                     | 0.47                                 |
| GASIR1-ZNSE                    | 0.56                                 |
| IRG26-ZNS                      | 2.68                                 |
| IRG26-ZNSE                     | 13.70                                |
| GE-ZNS                         | 37.74                                |

从表 1 可以看出,ZNSE-ZNS MLDOE 的综合 PIDE 差  $\Delta\bar{\eta}_m^c(\lambda)$  最小,GE-ZNS MLDOE 的  $\Delta\bar{\eta}_m^c(\lambda)$  最大。如图 2 所示,随着入射角的变化,各种基底材

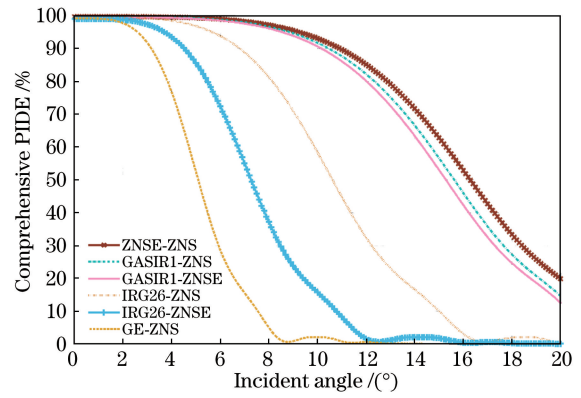


图 2 中长波双波段下不同基底材料组合对应的综合 PIDE 值与入射角度的关系

Fig. 2 PIDE for different combinations in MWIR/LWIR dual-band versus incident angle

料组合的 PIDE 的下降量明显不同,其中 ZNSE-ZNS MLDOE 的 PIDE 随入射角的变化最小,GE-ZNS MLDOE 的 PIDE 变化量随入射角变化最大。基于上述分析可知, $\Delta\bar{\eta}_m^c(\lambda)$  越小表示综合 PIDE 随入射角变化的下降量越小。因此 ZNSE 和 ZNS 是 MWIR-LWIR 双波段中最合适的基底材料,本研究将 ZNSE-ZNS MLDOE 应用于下面的双波段变焦镜头设计中。与单波段多层衍射元件的设计不同,适用于双波段系统的多层衍射光学元件,其设计波长值可以分别从两个波段中进行选取。本研究涉及的工作波段为中波红外  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ (MWIR)和长波红外  $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$ (LWIR),因此,选取波长组合  $\lambda_1=4.2\ \mu\text{m}$  和  $\lambda_2=8.6\ \mu\text{m}$  为设计波长组合。根据本研究推导的双波段多层衍射元件设计模型,将两个设计波长代入(3)式,可以计算出微结构高度  $H_1=207.5134\ \mu\text{m}$  和  $H_2=-234.1835\ \mu\text{m}$ ,至此获得了对入射角度影响最小的中长波红外双波段多层衍射光学元件。

### 3.2 折衍射混合双波段红外变焦镜头的优化设计

为了设计双波段红外变焦系统,本研究选择由 8 个 GE 透镜组成的单波段 LWIR 非致冷变焦镜头作为初始结构<sup>[18]</sup>,如图 3 所示。该系统前固定组的光焦度为正,由 2 个 GE 透镜组成;变倍组的光焦度为负,由 2 个 GE 透镜组成;补偿组的光焦度为正,由单个 GE 透镜组成;后固定组的光焦度为正,由 3 个 GE 透镜组成。变倍组和补偿组的连续移动改变了系统的焦距值,焦距变化的过程中系统总长保持不变。由于 GE 的阿贝数比较大,初始结构可以在 LWIR 中获得高成像质量,色差比较小。然而,GE 的阿贝数在 MWIR 时相对较小,因此初始结构

在红外双波段中色差严重,不能直接将初始结构应用于红外双波段系统中。为了实现 MWIR 和 LWIR 的消色差并且简化系统结构,本课题组在设计中引入双波段 MLDOE 元件。

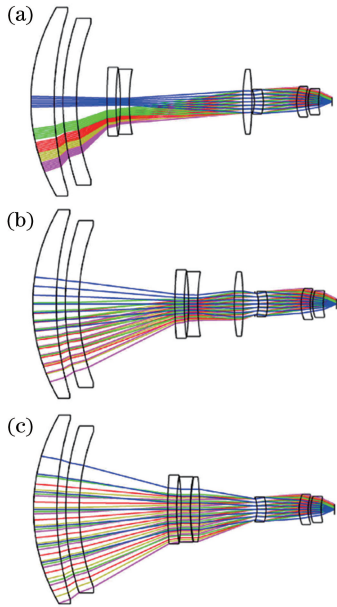


图 3 初始结构。(a)短焦距;(b)中焦距;(c)长焦距

Fig. 3 Initial system. (a) Short focal length; (b) middle focal length; (c) long focal length

关于 MLDOE 的放置位置可能有 3 个,即前固定组、变倍组和后固定组。校正红外双波段系统的色差通常需要 3 种材料<sup>[19]</sup>。本研究将 MLDOE 加在前固定组,主要原因是前固定组的口径最大,实现系统消色差的同时,可大幅度地减小系统的质量和尺寸。将初始结构中的前固定组的 2 个 GE 透镜换成 ZNSE 和 ZNS,ZNSE 替换掉正的 GE 透镜,ZNS 替换掉负的 GE 透镜,MLDOE 的两个 HDE 分别设置在 ZNSE 和 ZNS 透镜表面。同时,其他组元的光学材料也进行相应的替换。由于补偿组和后固定组的光焦度均为正,因此其中的正透镜可以用 ZNSE 或 GASIR1 代替,负透镜可以用 IRG26 或 ZNS 代替。

利用光学设计软件 ZEMAX 对该双波段红外变焦镜头进行优化设计。设定  $3.7\ \mu\text{m}$ ,  $4.2\ \mu\text{m}$  和  $4.8\ \mu\text{m}$  作为 MWIR 的工作波长,设定  $7.7\ \mu\text{m}$ ,  $8.6\ \mu\text{m}$  和  $9.5\ \mu\text{m}$  作为 LWIR 的工作波长。MWIR 和 LWIR 的主波长分别为  $4.2\ \mu\text{m}$  和  $8.6\ \mu\text{m}$ ,根据主波长进行衍射级次的计算。在 MWIR 中,衍射级数  $M_1=33$  且  $M_2=34$ ,在 LWIR 中衍射级数  $M_1=70$  且  $M_2=71$ 。将曲率半径、透镜间隔、透镜厚度、偶次非球面系数和 DOE 的相位系数等设置为变量进行成像质量的优化设计。

通过上述优化后,得到了含有 MLDOE 的折衍射混合红外双波段变焦系统,最终透镜数据列于表 2 中,非球面系数和不同焦距的透镜组间隔列于表 3 和表 4,表 4 中,EFL 为系统焦距值, $d_4$ 、 $d_6$ 、 $d_{10}$  分别表示变倍组与前固定组之间的间隔、变倍组与补偿组之间的间隔、补偿组与后固定组之间的间隔,各个焦距下的系统结构、折衍混合透镜结构图以及多层衍射元件局部放大图如图 4 所示。

表 2 含有 MLDOE 的双波段红外变焦系统数据

Table 2 System data of dual-band infrared zoom system with MLDOE

| Surface         | Type                  | Radius /mm | Thickness /mm   | Glass  |
|-----------------|-----------------------|------------|-----------------|--------|
| 0               | Standard              | Infinity   | Infinity        |        |
| 1               | Standard              | 351.782    | 17              | ZNS    |
| 2               | Binary 2 <sup>a</sup> | 278.522    | 0.5             |        |
| 3               | Binary 2 <sup>a</sup> | 278.522    | 20              | ZNSE   |
| 4               | Standard              | 1318.34    | $d_4$ , zoom    |        |
| 5               | Standard              | -300.987   | 8               | IRG26  |
| 6               | Standard              | 176.598    | $d_6$ , zoom    |        |
| 7               | EA <sup>b</sup>       | 89.258     | 9               | GASIR1 |
| 8               | Standard              | -1664.62   | 3.4             |        |
| 9               | EA <sup>b</sup>       | 208.684    | 7.5             | ZNS    |
| 10              | Standard              | 117.879    | $d_{10}$ , zoom |        |
| Stop            | Standard              | Infinity   | 0.5             |        |
| 12              | Standard              | 31.310     | 5               | ZNSE   |
| 13              | EA <sup>b</sup>       | 35.101     | 1.6             |        |
| 14              | EA <sup>b</sup>       | 86.123     | 5.5             | ZNS    |
| 15              | Standard              | 46.518     | 30              |        |
| 16 <sup>c</sup> | EA <sup>b</sup>       | 15.473     | 6.5             | ZNSE   |
| 17 <sup>c</sup> | EA <sup>b</sup>       | 17.255     | 6.89            |        |
| Image           | Standard              | Infinity   | -               | -      |

Note: Binary 2<sup>a</sup> is diffractive surface, of which the diffractive phase coefficient  $A_1$  for the surface 2 is 99.552, and diffractive phase coefficient  $A_1$  for the surface 3 is -99.552; EA<sup>b</sup> is the even asphere; 16<sup>c</sup> and 17<sup>c</sup> are the surfaces of the detector wind.

最终得到的双波段折衍射混合变焦系统,其前固定组由具有 MLDOE 的折衍射混合透镜组成,变倍组由单个 IRG26 负透镜构成,补偿组由 GASIR1 正透镜和 ZNS 负透镜构成,后固定组由 ZNSE 和 ZNS 透镜组成。该红外双波段变焦系统

表 3 双波段红外变焦系统的偶次非球面系数  
Table 3 Even asphere aspheric coefficient of dual-band infrared zoom system

| Surface | Polynomial coefficient    |                            |                            |
|---------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
|         | $\alpha_2$                | $\alpha_3$                 | $\alpha_4$                 |
| 7       | $6.93662 \times 10^{-8}$  | $-1.43459 \times 10^{-10}$ | $8.43067 \times 10^{-15}$  |
| 9       | $-4.42025 \times 10^{-7}$ | $2.58981 \times 10^{-10}$  | $-2.74896 \times 10^{-14}$ |
| 13      | $6.32016 \times 10^{-7}$  | $1.05777 \times 10^{-8}$   | $1.20469 \times 10^{-10}$  |
| 14      | $7.95772 \times 10^{-7}$  | $1.65771 \times 10^{-8}$   | $1.07461 \times 10^{-10}$  |
| 16      | $6.31433 \times 10^{-6}$  | $6.80261 \times 10^{-8}$   | $-6.01009 \times 10^{-10}$ |
| 17      | $2.71964 \times 10^{-5}$  | $1.91906 \times 10^{-7}$   | $-7.22714 \times 10^{-9}$  |

在短焦、中焦和长焦时的总长均为 360 mm。随着焦距的变化,MLDOE 的入射角度也不同。对于短焦距系统,0.7 视场和 1 视场对应的多层衍射光学元件的入射角度分别为 1.18°和 1.36°;对于长焦距系

统对应入射角度分别为 8.33°和 9.64°。在 2.1 节中,本课题组计算出的 PIDE 降低至 90%时的入射角为 10.9°,因此,衍射效率对该红外双波段变焦系统 MTF 的影响较小。考虑了衍射效率影响的 MWIR 和 LWIR 双波段变焦系统在不同焦距下对应的调制传递函数(MTF)如图 5 所示。

表 4 不同焦距的透镜组间隔  
Table 4 Distance between the lens groups for different focal lengths

| Parameter     | Configuration |         |         |
|---------------|---------------|---------|---------|
|               | Short         | Middle  | Long    |
| EFL / mm      | 20            | 120     | 200     |
| $d_4$ / mm    | 59.542        | 168.043 | 175.680 |
| $d_6$ / mm    | 174.278       | 34.740  | 0.500   |
| $d_{10}$ / mm | 4.787         | 35.825  | 62.428  |

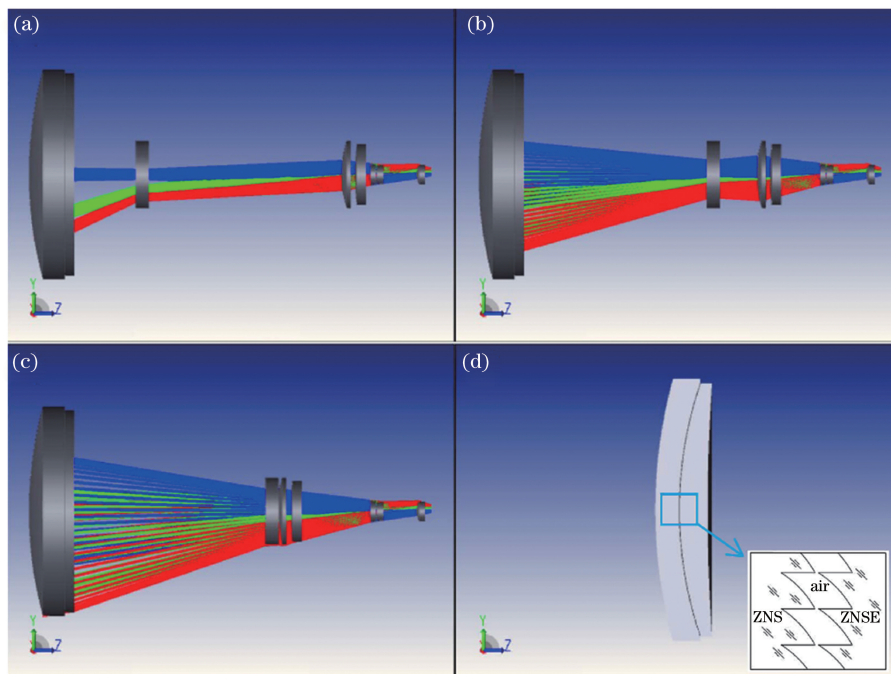


图 4 最终设计结果。(a)短焦距;(b)中焦距;(c)长焦距;(d)折衍混合透镜及局部放大图

Fig. 4 Final designed system. (a) Short focal length; (b) middle focal length; (c) long focal length; (d) diffraction hybrid lens diagram and partial enlargement of multilayer diffraction element

在中波红外波段,系统的短焦[图 5(a1)]、中焦[图 5(a2)]和长焦[图 5(a3)]对应的 MTF 最小值分别为 0.63、0.69 和 0.59;在长波红外波段,系统的短焦[图 5(b1)]、中焦[图 5(b2)]和长焦[图 5(b3)]对应的 MTF 最小值分别为 0.45、0.55 和 0.45。因此,对于设计的 MWIR-LWIR 红外双波段,MTF 最小值分别大于 0.59 和 0.45,红外双波段色差得到校正,实现了高质量成像。

## 4 公差分析

由于系统的理论设计结果与实际加工结果存在差异,为了保证系统在现有的加工装调水平下满足系统的性能要求,对上述设计的折衍射混合双波段红外变焦系统进行了公差分析。表 5 给出了不同的参数对应的典型的加工公差值,每一个公差值均为考虑了实际加工精度的常用公差,表中 PV 代表峰

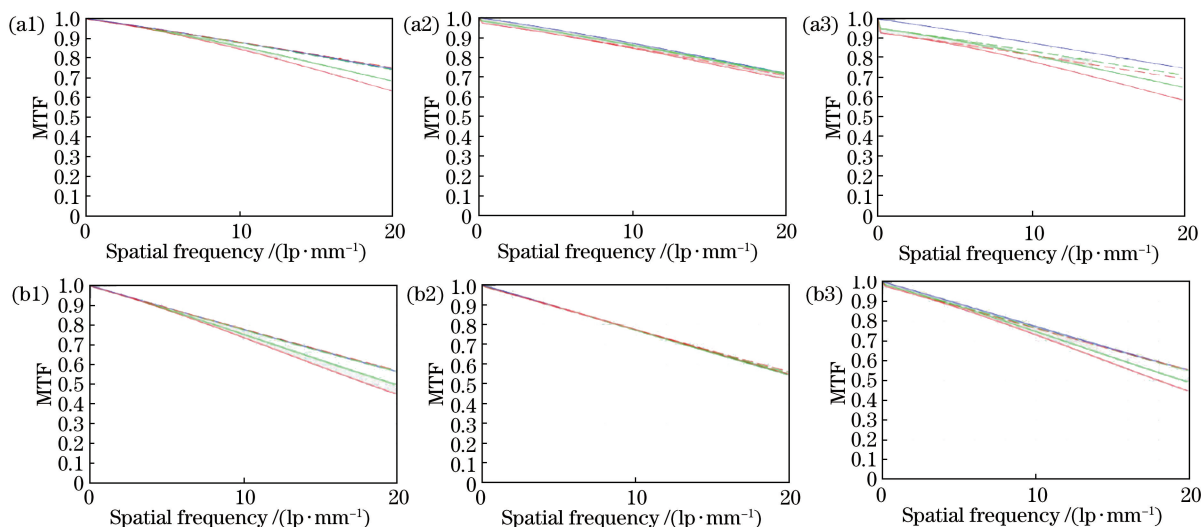


图 5 红外双波段变焦系统的设计 MTF。(a1~a3)中波红外波段;(b1~b3)长波红外波段

Fig. 5 Design MTF of the dual-band infrared zoom system. (a1~a3) MWIR; (b1~b3) LWIR

谷值。依据这些值设置公差,并使用后截距进行补偿。面型精度的干涉条纹数的单位是波长,波长是指干涉仪所用的氦氖激光器的波长 632.8 nm。

表 6 给出了系统公差分析前后不同波段不同焦距下对应的 MTF 值。从表中可以看出,虽然实际的 MTF 值相对于设计值有所下降,但下降量都在可接受范围内。公差分析后得到的 MTF 曲线在奈奎斯特频率处得到的 MTF 值,在中波短焦处、中焦处和长焦处分别为 0.56、0.63 和 0.52,在长波短焦处、中焦处和长焦处分别为 0.4、0.5 和 0.35,满足系统设计的要求。

表 5 系统公差设置

Table 5 Tolerance data of system

| Tolerance type        | Tolerance parameter |
|-----------------------|---------------------|
| Radius                | ±3 Fringe           |
| Surface irregularity  | ±1 Fringe           |
| Thickness /mm         | ±0.03               |
| Surface tilt/(')      | ±2                  |
| Element decenter /mm  | ±0.03               |
| Element tilt/(')      | ±2                  |
| Aspheric PV value /μm | ±0.3                |
| Refractive index      | 0.0005              |
| Abbe number /%        | 0.8                 |
| Test wavelength /nm   | 632.8               |

表 6 双波段红外变焦系统的 MTF 设计值和 MTF 实际值

Table 6 Design and actual values of MTF for the dual-band infrared zoom system

| Field of view            |              | 0    | 0.7T | 0.7S | 1T   | 1S   |
|--------------------------|--------------|------|------|------|------|------|
| Medium wave short focus  | Design value | 0.75 | 0.68 | 0.74 | 0.63 | 0.75 |
|                          | Actual value | 0.70 | 0.64 | 0.72 | 0.56 | 0.73 |
| Long wave short focus    | Design value | 0.57 | 0.50 | 0.57 | 0.45 | 0.57 |
|                          | Actual value | 0.55 | 0.45 | 0.53 | 0.40 | 0.52 |
| Medium wave medium focus | Design value | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.69 | 0.70 |
|                          | Actual value | 0.68 | 0.67 | 0.70 | 0.63 | 0.67 |
| Long wave medium focus   | Design value | 0.55 | 0.55 | 0.56 | 0.55 | 0.56 |
|                          | Actual value | 0.52 | 0.51 | 0.52 | 0.50 | 0.52 |
| Medium wave long focus   | Design value | 0.75 | 0.65 | 0.72 | 0.59 | 0.70 |
|                          | Actual value | 0.73 | 0.60 | 0.67 | 0.52 | 0.65 |
| Long wave long focus     | Design value | 0.55 | 0.49 | 0.55 | 0.45 | 0.55 |
|                          | Actual value | 0.52 | 0.41 | 0.50 | 0.35 | 0.49 |

## 5 结 论

本文研究了斜入射情况下双波段 MLDOE 的基底材料选择对 PIDE 下降的影响机理,并建立了

双波段 MLDOE 基底材料优化选择数学模型。根据该数学模型对中波红外(3.7~4.8 μm)-长波红外(7.7~9.5 μm)双波段红外系统中的多层衍射元件的基底材料组合进行了分析和讨论。研究表明,

$\Delta\eta_m^c(\lambda)$ 最小的材料组合是双波段系统中的最佳多层衍射元件基底材料组合。根据设计波段要求和本文提及的基底材料选择方法,最终得到最佳基底材料组合为 ZNSE 和 ZNS。最后,以 20~200 mm 的 10 倍的中长波红外双波段变焦镜头为例,详细介绍了双波段折衍射混合系统的设计过程。设计结果表明,多层衍射光学元件的应用,校正了系统的色差,拓宽了系统的应用波段,大大简化了系统的结构,减小了系统体积和质量,并实现了高质量成像。由公差分析后得到的 MTF 曲线可知,在奈奎斯特频率处得到的 MTF 值在中波和长波中分别大于 0.52 和 0.35,满足系统的设计要求。

## 参 考 文 献

- [1] Fan C J, Zhao Y H, Ying C F, et al. Multilayer diffraction element with wide field of view and high diffractive efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0516001.  
范长江, 赵亚辉, 应朝福, 等. 宽光谱大视场角的高衍射效率多层衍射元件[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0516001.
- [2] 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.  
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.
- [3] Zhang B, Cui Q F, Xue C X, et al. Achromatism about negative refractive index lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0312004.  
张博, 崔庆丰, 薛常喜, 等. 负折射率材料透镜的消色差[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0312004.
- [4] Nevo Y. Dual-band optics[J]. Optical Engineering, 2013, 52(5): 053002.
- [5] Dong K Y, Zhang L G, Wang J, et al. Design of the infrared dual-band athermalized optical system based on HDE [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7383: 73831B.
- [6] Chen H D, Xue C X. Design of mid-wave infrared optical system with high variable ratio miniaturization [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0222001.  
陈虹达, 薛常喜. 高变倍比小型化的中波红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0222001.
- [7] Mao S, Cui Q F, Piao M X, et al. High diffraction efficiency of three-layer diffractive optics designed for wide temperature range and large incident angle[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3549-3354.
- [8] Yang H F, Xue C X, Li C, et al. Diffraction efficiency sensitivity to oblique incident angle for multilayer diffractive optical elements [J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 7126-7133.
- [9] Sweeney D W, Sommargren G E. Harmonic diffractive lenses[J]. Applied Optics, 1995, 34(14): 2469-2475.
- [10] Swanson G J. Binary optics technology: the theory and design of multi-level diffractive optical elements [R]. Lexington: MIT Lincoln Laboratory Technical Report, 1989: 54.
- [11] Buralli D A, Morris G M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4389-4396.
- [12] Xue C X, Cui Q F, Pan C Y, et al. Design of multi-layer diffractive optical element with bandwidth integral average diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3016-3020.  
薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳, 等. 基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3016-3020.
- [13] Mao S, Cui Q F. Effect on polychromatic integral diffraction efficiency for two-layer diffractive optics [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0105001.  
毛珊, 崔庆丰. 双层衍射元件加工误差对带宽积分平均衍射效率的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0105001.
- [14] Riedl M J. Optical design fundamentals for infrared systems [M]. 2th ed. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [15] Guimond Y, Bellec Y, Rogers K. A new moldable infrared glass for thermal imaging and low cost sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6542: 654225.
- [16] Gerard D, Kristy D, Blaise R. Technical consideration for designing low-cost, long-wave infrared objectives [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9070: 907026.
- [17] Yang H F, Xue C X, Li C, et al. Optimal design of multilayer diffractive optical elements with effective area method [J]. Applied Optics, 2016, 55(7): 1675-1682.
- [18] Wang W S, Mu D, Chen Y. Contemporary optical system design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 229-232.  
王文生, 牟达, 陈宇. 现代光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 229-232.
- [19] Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design [J]. Applied Optics, 1997, 36(1): 297-301.