

双层衍射元件加工误差对带宽积分平均衍射效率的影响

毛 珊 崔庆丰

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 双层衍射光学元件可以在宽波段范围内获得高的衍射效率。加工误差会导致带宽积分平均衍射效率的下降,进而影响折衍射混合成像光学系统的传递函数。基于位相延迟和带宽积分平均衍射效率的表达式,建立了双层衍射光学元件加工误差与带宽积分平均衍射效率的数学关系。分析了应用于8~12 μm 长波红外光学系统中的两种加工误差对双层衍射光学元件衍射效率的影响。采用带宽积分平均衍射效率,可以直接评价宽波段光学系统的成像质量。通过带宽积分平均衍射效率和双层衍射光学元件加工误差的关系,可以分析含有双层衍射元件混合光学系统的调制传递函数。

关键词 衍射光学; 衍射效率; 加工误差; 红外系统

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0105001

Effect on Polychromatic Integral Diffraction Efficiency for Two-Layer Diffractive Optics

Mao Shan Cui Qingfeng

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

Abstract Two-layer diffractive optics can achieve high diffraction efficiency at broad wavelength band. Manufacturing errors can result in loss of diffraction efficiency and further, influence modulation transfer function (MTF) of refractive and diffractive hybrid imaging optical system. Based on the expression of phase delay and polychromatic integral diffraction efficiency (PIDE), mathematical analysis model of relationship between manufacturing errors and polychromatic integral diffraction efficiency is presented. Two kinds of manufacturing errors applied in 8~12 μm far infrared optical system which results in diffraction efficiency of two-layer diffractive optics are studied. Method of PIDE can evaluate image quality of optical system over broadband wavelength. According to the relationship between PIDE and manufacturing errors, MTF for hybrid optical system consisting of two-layer diffractive optics can be analyzed.

Key words diffractive optics; diffraction efficiency; infrared optical system; manufacturing errors

OCIS codes 050.1970; 220.0220; 050.1965; 230.4170

1 引 言

衍射光学元件由于其特殊色散性质在现代成像光学系统中^[1-5]有重要作用。将衍射光学元件应用于成像光学系统,可以实现色差校正并有利于实现光学系统的热稳定^[6-7]。对于衍射光学元件,衍射效率决定了其应用范围。多层衍射光学元件由两种不同色散材料组成,可以在宽波段范围内实现较高的衍射效率,解决了传统单层衍射光学元件衍射效率随偏离中心波长下降很快的问题^[8-10]。对于成像光学系统中的衍射光学元件,现在多采用单点金刚石车削技术进行加工^[11-12],因此,衍射元件的加工误差会降低折衍射混合光学系统中衍射光学元件的衍射效率,最终导致成像质量的下降。

收稿日期: 2015-07-07; 收到修改稿日期: 2015-08-25

作者简介: 毛 珊(1990—),女,博士研究生,主要从事光学设计和衍射光学方面的研究。E-mail: maoshan8633@sina.com

导师简介: 崔庆丰(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事光学设计和衍射光学方面的研究。

E-mail: qf_cui@163.com(通信联系人)

文献[13]分析了单点金刚石车削方法的加工误差对波前像差的影响。文献[14]讨论了光学设计软件对加工误差导致的光学表面面形采用干涉图样模拟的方法。文献[15]研究了连续面形的单层衍射光学元件的加工误差种类。文献[16]分别讨论了衍射微结构高度误差和衍射微结构周期宽度误差对多层衍射光学元件衍射效率的影响。然而,这些文献都没有讨论双层衍射元件加工误差对带宽积分平均衍射效率的影响。对于成像光学系统,调制传递函数(MTF)是衡量光学系统整个波段范围的成像性质,与衍射光学元件衍射效率有重要关系^[15]。带宽积分平均衍射效率用来评价宽波段衍射光学元件的性能。因此,考虑含有加工误差的双层衍射光学元件带宽积分平均衍射效率对宽波段光学系统的影响是必要的。

本文基于带宽积分平均衍射效率表达式建立了衍射微结构高度误差和衍射微结构周期宽度误差对带宽积分平均衍射效率的数学模型。根据加工误差与宽波段双层衍射光学元件带宽积分平均衍射效率的数学模型,对两种加工误差要求的制定提供了依据。加工误差的分析结论可以应用于多层衍射光学元件的加工工艺中,以满足实际折衍射混合光学系统中对衍射光学元件衍射效率的要求,也可以避免一些不必要的浪费。

2 双层衍射元件加工误差与带宽积分平均衍射效率的关系

多层衍射光学元件可以在宽波段范围内提高衍射效率,从而提高折衍射混合成像光学系统的成像质量。常用的多层衍射光学元件是由两个不同色散特性的谐衍射光学元件组成,中间为空气间隔。两个谐衍射光学元件的周期相同,衍射微结构周期宽度不同。通常,衍射微结构周期宽度误差和衍射微结构高度误差是同时存在的,加工误差对衍射光学元件表面微结构的影响可以表示为图1。其中, $H_{1\text{designed}}$ 和 $H_{1\text{real}}$ 分别代表第一个谐衍射光学元件的理论微结构高度和由于加工误差导致的实际微结构高度。 $H_{2\text{designed}}$ 和 $H_{2\text{real}}$ 代表第二个谐衍射光学元件的理论微结构高度和由于加工误差导致的实际微结构高度。 $T_{1\text{designed}}$ 和 $T_{1\text{real}}$ 分别代表第一个谐衍射光学元件的理论微结构周期宽度和由于加工误差导致的实际微结构周期宽度。 $T_{2\text{designed}}$ 和 $T_{2\text{real}}$ 分别代表第二个谐衍射光学元件的理论微结构周期宽度和由于加工误差导致的实际微结构周期宽度。

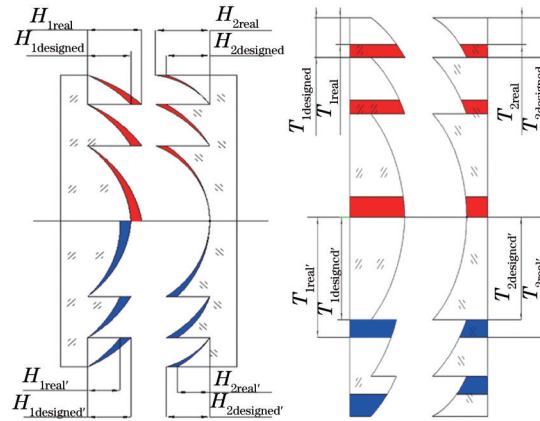


图1 加工误差对多层衍射光学元件面形的影响。(a) 衍射微结构高度误差;(b) 衍射微结构周期宽度误差

Fig.1 Manufacturing errors effect on surface shapes of multilayer diffractive optical elements (MLDOEs).

(a) Diffractive micro-structural height error; (b) diffractive micro-structural periodic width error

实际光学系统的调制传递函数 f_{MT} 值可以近似表示为带宽积分平均衍射效率与理论 f_{MT} 值的乘积,即为

$$F(f_x, f_y) = \bar{\eta}(\lambda) \cdot f_{OTF}(f_x, f_y). \quad (1)$$

根据标量衍射理论,多层衍射光学元件的衍射效率可以表示为

$$\eta_m^\infty = \text{sinc}^2[m - \phi(\lambda)], \quad (2)$$

式中 ϕ 为衍射元件的位相函数,对于衍射光学元件其位相延迟函数可以表示为

$$\phi(\lambda_i) = k_i [n_1(\lambda_i) - 1] \cdot H_{1\text{designed}} + k_i [n_2(\lambda_i) - 1] \cdot H_{2\text{designed}} = m \cdot 2\pi. \quad (3)$$

m 为衍射级次, k_i 为波数, $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$, $n_1(\lambda_i)$ 和 $n_2(\lambda_i)$ 分别表示不同波长对应的折射率带宽积分平均衍射效率

用来表示宽波段折衍射混合光学系统的性能,带宽积分平均衍射效率可以表示为

$$\bar{\eta}(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中 λ_{\min} 和 λ_{\max} 代表实际光学系统最小和最大波长, $\eta_m(\lambda)$ 代表 m 级次的衍射效率, $\bar{\eta}(\lambda)$ 为带宽积分平均衍射效率, 即为实际光学系统的衍射效率。通常情况下, 衍射光学元件的衍射效率为一级衍射, 即 $m = 1$ 。

$$\begin{aligned} \bar{\eta}(\lambda) &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sin^2 \left(1 - \frac{\phi}{2\pi} \right) d\lambda = \\ &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sin^2 \left[1 - \frac{(n_1(\lambda) - 1)H_{1\text{designed}} + (n_2(\lambda) - 1)H_{2\text{designed}}}{\lambda} \right] d\lambda. \end{aligned} \quad (5)$$

由于衍射微结构高度误差和微结构周期宽度误差的存在, 实际双层衍射元件的微结构参数可以表示为

$$\begin{cases} H_{1\text{real}} = H_{1\text{designed}} + \Delta H_1 = H_{1\text{designed}} + (\Delta H_{11} + \Delta H_{12} + \dots + \Delta H_{1N})/N = H_{1\text{designed}}(1 + \varepsilon_1) \\ H_{2\text{real}} = H_{2\text{designed}} + \Delta H_2 = H_{2\text{designed}} + (\Delta H_{21} + \Delta H_{22} + \dots + \Delta H_{2N})/N = H_{2\text{designed}}(1 + \varepsilon_2), \end{cases} \quad (6)$$

和

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{T_{1\text{real}} - T_{1\text{designed}}}{T_{1\text{designed}}} \\ \xi_2 = \frac{T_{2\text{real}} - T_{2\text{designed}}}{T_{2\text{designed}}} \end{cases}, \quad (7)$$

因此, 加工误差影响的双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{\eta}(\lambda) &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sin^2 \left(1 - \frac{\phi}{2\pi} \right) \sin^2(\xi_1) \sin^2(\xi_2) d\lambda = \\ &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sin^2 \left\{ 1 - \frac{[n_1(\lambda) - 1]H_{1\text{designed}} + [n_2(\lambda) - 1]H_{2\text{designed}}}{\lambda} \right\} \sin^2(T_{1\text{real}}) \sin^2(T_{2\text{real}}) d\lambda \end{aligned} \quad (8)$$

$H_{1\text{real}}$ 、 $H_{2\text{real}}$ 为存在加工误差的双层衍射元件微结构实际高度, $T_{1\text{real}}$ 、 $T_{2\text{real}}$ 为存在加工误差的双层衍射元件实际微结构周期宽度。 ΔH_{ij} 为存在加工误差时第 i 个衍射光学元件第 j 个环带加工误差值。

可以看出, 带宽积分平均衍射效率与光学系统的波段和衍射微结构参数都有关。 ε_1 、 ε_2 分别为两层衍射元件衍射微结构相对高度误差, ξ_1 、 ξ_2 分别为两层衍射元件衍射微结构相对周期宽度误差。

由于加工误差的带宽积分平均衍射效率可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{\eta}(\lambda) &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sin^2 \left(1 - \frac{\phi}{2\pi} \right) \sin^2(\xi_1) \sin^2(\xi_2) d\lambda = \\ &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sin^2 \left\{ 1 - \frac{[n_1(\lambda) - 1]H_{1\text{real}}(1 + \varepsilon_1) + [n_2(\lambda) - 1]H_{2\text{real}}(1 + \varepsilon_2)}{\lambda} \right\} \cdot \\ &\quad \sin^2[T_{1\text{real}}(1 + \xi_1)] \sin^2[T_{2\text{real}}(1 + \xi_2)] d\lambda \end{aligned} \quad (9)$$

双层衍射元件衍射效率可以表示为

$$\eta = \sin^2 \left\{ 1 - \frac{[n_1(\lambda) - 1]H_{1\text{real}} + [n_2(\lambda) - 1]H_{2\text{real}}}{\lambda} \right\} \sin^2(T_{1\text{real}}) \sin^2(T_{2\text{real}}), \quad (10)$$

存在加工误差的双层衍射元件衍射效率可以表示为

$$\begin{aligned} \eta &= \sin^2 \left\{ 1 - \frac{[n_1(\lambda) - 1]H_{1\text{designed}}(1 + \varepsilon_1) + [n_2(\lambda) - 1]H_{2\text{designed}}(1 + \varepsilon_2)}{\lambda} \right\} \cdot \\ &\quad \sin^2[T_{1\text{designed}}(1 + \xi_1)] \sin^2[T_{2\text{designed}}(1 + \xi_2)] \end{aligned} \quad (11)$$

考虑到加工误差, 实际带宽积分平均衍射效率可以表示为

$$\begin{aligned} \eta &= \sin^2 \left\{ 1 - \frac{[n_1(\lambda) - 1]H_{1\text{designed}}(1 + \varepsilon_1) + [n_2(\lambda) - 1]H_{2\text{designed}}(1 + \varepsilon_2)}{\lambda} \right\} \cdot \\ &\quad \cdot \sin^2[T_{1\text{designed}}(1 + \xi_1)] \sin^2[T_{2\text{designed}}(1 + \xi_2)] \end{aligned} \quad (12)$$

对于衍射光学元件的加工,同一单点金刚石车削车床的加工精度是相同的。加工误差造成的衍射微结构误差是随意的。为了简化分析,假设相对微结构高度误差和相对微结构周期宽度误差是相同的,即 $\xi_1 = \xi_2$ 和 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ 。

3 实例分析和讨论

以长波红外双层衍射元件为例,说明加工误差对红外折衍射混合成像光学系统的影响,选取的多层衍射光学元件基底材料分别为硫化锌 ZnS 和锗 Ge,采用的光谱波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,根据参考文献[17-20],采用柯西色散公式可以计算出最优设计波长为 $8.79 \mu\text{m}$ 和 $11.11 \mu\text{m}$,对应的衍射微结构高度分别为 $78.3391 \mu\text{m}$ 和 $34.6076 \mu\text{m}$ 。

3.1 加工误差对红外双层衍射元件带宽积分平均衍射效率的影响

由(8)式可以看出由于周期宽度误差对于带宽积分平均衍射效率是一个常数,衍射微结构高度误差对其影响较大,与积分波长有关。当衍射微结构周期相对宽度误差被控制在 $|\xi|$ 范围内, $|\xi|$ 取值分别为 0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1,由此可计算出带宽积分平均衍射效率。假设微结构相对高度误差控制在 $|0.1|$ 范围内,由于加工误差影响的双层衍射光学元件带宽积分平均衍射效率如图 2 所示,计算结果如表 1 和表 2。

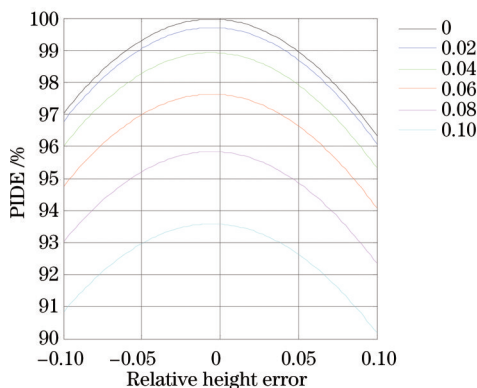


图 2 加工误差对带宽积分平均衍射效率的影响

Fig.2 Manufacturing errors effect on PIDE of MLDOEs

表 1 不同周期宽度误差下的带宽积分平均衍射效率

Table 1 PIDE of MLDOEs for different relative periodic width errors ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$)

$\xi_1 = \xi_2$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
PIDE/%	96.3315	96.0783	95.3222	94.0739	92.3510	90.1776

表 2 不同微结构高度误差下的带宽积分平均衍射效率

Table 2 PIDE of MLDOEs for different micro-structural height errors ($\xi_1 = \xi_2 = 0.1$)

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
PIDE/%	93.5747	93.3830	92.9438	92.2600	91.3360	90.1776

从图 2 中可以看出,当没有加工误差时带宽积分平均衍射效率达到最大值。当双层衍射元件相对微结构高度误差为 0.1 并且微结构相对周期宽度误差从 0 增加到 0.1 时,带宽积分平均衍射效率从 96.3315% 降低到 90.1776%,降低幅度为 6.1539%。当双层衍射元件微结构相对周期宽度误差为 0.1 并且微结构相对高度误差从 0 增加到 0.1 时,带宽积分平均衍射效率从 93.5747% 降低到 90.1776%,降低幅度为 3.3971%。

3.2 相对周期宽度误差对红外双层衍射元件衍射效率的影响

根据带宽积分平均衍射效率的要求,当微结构高度误差为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$,可以计算出双层衍射元件的衍射效率。假设 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ 和 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.05$ 两种情况,根据(12)式,不同的微结构相对周期宽度误差和不同微结构相对高度误差对衍射效率的影响如图 3 和图 4,波段范围内最小衍射效率的计算结果如表 3 和表 4 所示。

相对微结构高度误差对长波红外双层衍射光学元件的衍射效率影响大于相对微结构周期宽度误差的影响。当不存在微结构周期宽度误差的情况下,相对微结构高度误差从 0.05 增加到 0.1 时,波段范围内最小衍射效率从 97.6780% 降低到 94.0574%,降幅为 3.6206%。当相对周期宽度误差从 0 增加到 0.1 时,最小衍射效率从 94.0574% 降低到 88.0487% 降低幅度为 6.0087%。当微结构相对高度误差从 0 增加到 0.1 时,最小衍射效率从 97.6780% 降低到 88.0487%,降低幅度为 9.6293%。

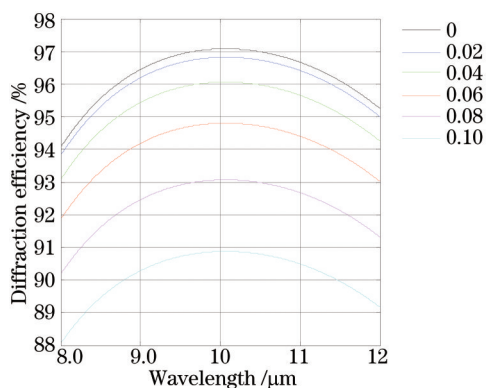


图 3 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ 时周期宽度误差对衍射效率的影响

Fig.3 Periodic width errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$)

表 3 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ 时周期宽度误差对衍射效率的影响

Table 3 Periodic width errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$)

$\xi_1 = \xi_2$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
$\eta_{min}/\%$	94.0574	93.8102	93.0719	91.8531	90.1709	88.0487

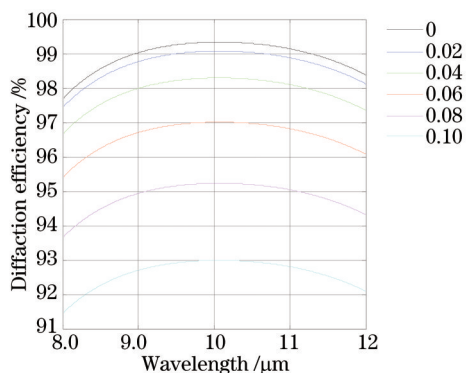


Fig.4 Periodic width errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.05$)

表 4 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.05$ 时周期宽度误差对衍射效率的影响

Table 4 Periodic width errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.05$)

$\xi_1 = \xi_2$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
$\eta_{min}/\%$	97.6780	97.4213	96.6546	95.3888	93.6418	91.4380

3.3 相对微结构高度误差对红外双层衍射元件衍射效率的影响

同理,当衍射微结构高度误差为 $\xi_1 = \xi_2 = 0.1$ 和 $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ 时,衍射微结构高度误差对衍射效率的影响如图 5 和图 6 所示,计算结果为表 5 和表 6 所示。

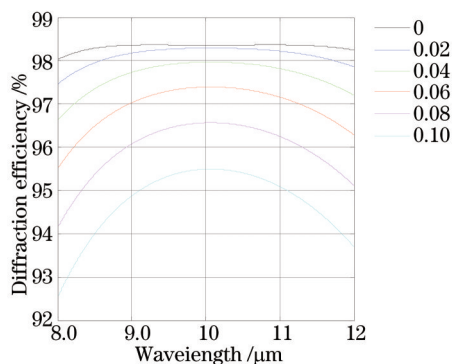


图 5 $\xi_1 = \xi_2 = 0.1$ 时微结构高度误差对衍射效率的影响

Fig.5 Micro-structural height errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\xi_1 = \xi_2 = 0.1$)

表 5 $\xi_1 = \xi_2 = 0.1$ 时微结构高度误差对衍射效率的影响

Table 5 Micro-structural height errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\xi_1 = \xi_2 = 0.1$)

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
$\eta_{min}/\%$	93.2815	92.7360	91.9338	90.8802	89.5823	88.0487

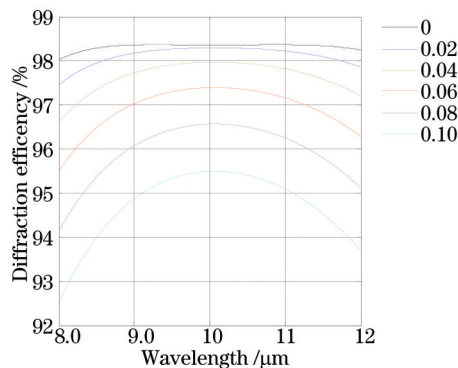


图 6 $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ 时微结构高度误差对衍射效率的影响

Fig.6 Micro-structural height errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\xi_1 = \xi_2 = 0.05$)

表 6 $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ 时微结构高度误差对衍射效率的影响

Table 6 Micro-structural height errors effect on diffraction efficiency of MLDOEs ($\xi_1 = \xi_2 = 0.05$)

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
$\eta_{min}/\%$	98.0202	97.4470	96.6041	95.4970	94.1331	92.5217

当不存在相对微结构高度误差的情况下,相对微结构宽度误差从0.05增加到0.1时,波段范围内衍射效率从98.0202%下降到93.2815%,降幅为4.7387%。当相对微结构周期宽度误差为0.1,衍射微结构高度误差从0增加到0.1时,最小衍射效率从93.2815%降低到88.0487%,降低幅度为5.2328%。当相对微结构周期宽度误差为0.05,衍射微结构高度误差从0增加到0.1时,最小衍射效率从98.0202%降低到92.5217%,降低幅度为5.4985%。

4 结 论

基于多层衍射光学元件带宽积分平均衍射效率的表达式,建立了含有两种类型加工误差的双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率的分析模型,该模型对含有双层衍射光学元件的折衍射混合成像光学系统中双层衍射元件加工误差的制定提供了依据。

对于由ZnS和Ge为基底的双层衍射元件,当其相对微结构高度误差为0.1且相对微结构周期宽度误差从0增加到0.1时,带宽积分平均衍射效率从96.3315%降低到90.1776%,降低幅度为6.1539%。当双层衍射元件相对微结构周期宽度误差为0.1并且相对微结构高度误差从0增加到0.1时,带宽积分平均衍射效率从93.5747%降低到90.1776%,降低幅度为3.3971%。当周期宽度误差和微结构高度误差为给定值时,可以分析波段范围内某一波长处的衍射效率和带宽积分平均衍射效率。微结构高度误差对双层衍射元件带宽积分平均衍射效率的影响大于微结构周期宽度误差。对于不同材料组合和不同加工误差,具体的数值会有所不同,但衍射微结构高度误差的影响大于衍射微结构周期宽度误差的影响,即对光学系统传递函数影响更大,在设计时更应控制。

参 考 文 献

- 1 Missig M D, Morris G M. Diffractive optics applied to eyepiece design[J]. Applied Optics, 1995, 34(14): 2452-3461.
- 2 Bigwood C, Wood A. Two-element lenses for military applications[J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 121705.
- 3 Cox J A. Application of diffractive optics to infrared imagers[C]. SPIE, 1995, 2552: 304-312.
- 4 Wood A, Lee M-S L, Cassette S. Infrared hybrid optics with high broadband efficiency[C]. SPIE, 2005, 5874: 58740G.
- 5 Liu Zhihui, Yang Huan, Shi Zhendong, et al.. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array

- [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102005.
- 刘志辉, 杨 欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102005.
- 6 Mao Wenfeng, Zhang Xin, Qu Hemeng, *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.
- 7 Sun Qiang, Lu Zhenwu, Wang Zhaoqi. 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.
- 8 Song Qiang, Zhu Jing, Wang Jian, *et al.*. A mixed gradient algorithm for high performance DOE design in off-axis lithography illumination system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122005.
- 宋 强, 朱 菁, 王 健, 等. 基于混合梯度下降的高性能光刻机离轴照明衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122005.
- 9 Blough C G, Rossi M, Mack S K, *et al.*. Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 1997, 36(20): 4648 - 4654.
- 10 Wood A P. A hybrid refractive-diffractive lens for manufacture by diamond turning[C]. SPIE, 1992, 1573: 122-128.
- 11 Bittner R. Tolerancing of single point diamond turned diffractive optical elements and optical surfaces[J]. Journal of the European Optical Society Rapid Publications, 2007, 2: 07028.
- 12 Juergens R C, Shepard R H, Schaefer J P. Simulation of single point diamond turning fabrication process errors[C]. SPIE, 2003, 5174: 93-104.
- 13 Hessler T, Rossi M, Kunz R E, *et al.*. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 1998, 37(19): 4069-4079.
- 14 Yang Lingling, Cui Qingfeng, Liu Tao, *et al.*. Effects of manufacturing errors on diffraction efficiency for multilayer diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 2011, 50(32): 6128-6133.
- 15 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.
- 16 Choi H, Kim W C, Lee S H, *et al.*. Effects of fabrication errors in the diffractive optical element on the modulation transfer function of a hybrid lens[J]. Journal of the Optical Society of America, 2008, 25(11): 2764-2766.
- 17 Greisukh G I, Bezus E A, Bykov D A, *et al.*. Suppression of the spectral selectivity of two-layer phase-relief diffraction structures[J]. Optics and Spectroscopy, 2009, 106(4): 621-626.
- 18 Fujita T, Nishihara H, Koyama J. Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography[J]. Optics Letters, 1982, 7(12): 578-580.
- 19 Xue Changxi, Cui Qingfeng. Design of multilayer diffractive optical elements with polychromatic integral diffraction efficiency[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 986-988.
- 20 Xue Changxi, Cui Qingfeng, Pang Chunyan, *et al.*. Design of multi-layer diffractive optical element with bandwidth integral average diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3016-3020.
- 薛长喜, 崔庆丰, 庞春艳, 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.

栏目编辑: 刘丰瑞