

基于复合带宽积分平均衍射效率的倾斜误差研究

杨亮亮*, 刘成林, 陆法林, 童巧英, 赵勇兵, 郭仁甲

盐城师范学院物理与电子工程学院, 江苏 盐城 224007

摘要 在系统装调过程中引入的倾斜误差会影响衍射光学元件(DOE)的衍射效率。入射角度的增大也会影响 DOE 的衍射效率。基于多层衍射光学元件(MLDOE)的相位延迟表达式,提出了斜入射时衍射效率和带宽积分平均衍射效率(BIADE)与倾斜误差的理论关系模型。分析了斜入射时倾斜误差对衍射效率和 BIADE 的影响。建立了工作在一定入射角度范围内的复合 BIADE 与倾斜误差的关系。当工作在 8~12 μm 波段的 MLDOE 的入射角度范围为 $0^\circ\sim 20^\circ$ 时,若要实现 98% 的复合 BIADE,倾斜误差角度应控制在 0.25° 范围内。进一步分析了存在偏心误差和相对微结构高度误差等其他误差因素时,要达到一定的复合 BIADE,所需对应的倾斜误差大小。该方法 and 结论可以用于指导混合光学系统中 MLDOE 的设计与装调。

关键词 衍射光学; 衍射效率; 倾斜误差; 斜入射; 多层衍射光学元件

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0805001

Tilt Error Based on Comprehensive Bandwidth Integral Average Diffraction Efficiency

Yang Liangliang*, Liu Chenglin, Lu Falin, Tong Qiaoying, Zhao Yongbing, Guo Renjia

School of Physics and Electronics Engineering, Yancheng Teachers University,

Yancheng, Jiangsu 224007, China

Abstract The tilt error introduced in the system assembling process affects the diffraction efficiency of diffractive optical elements (DOEs). An increase in the incident angle also affects the diffraction efficiency of DOEs. Based on the phase delay expression of multilayer DOEs (MLDOEs), this paper proposes a theoretical model of the relationship between the diffraction efficiency/bandwidth integrated average diffraction efficiency (BIADE) and the tilt error. The effect of the tilt error on the diffraction efficiency/BIADE at oblique incidence is analyzed. The relationship between the comprehensive BIADE working within a certain incidence angle and the tilt error is established. When the range of incident angle for the MLDOEs, operating within the 8–12- μm infrared waveband, is $0^\circ\sim 20^\circ$, if the comprehensive BIADE is required to be higher than 98%, the tilt error should be less than 0.25° . When there are other errors, such as the decenter error and the microstructure height error, the tilt error is further analyzed to reach the required comprehensive BIADE. The method and conclusions can be used to assist in designing and assembling the MLDOEs in hybrid optical systems.

Key words diffractive optics; diffraction efficiency; tilt error; oblique incidence; multilayer diffractive optical elements

OCIS codes 050.1970; 220.4000; 050.1960

1 引 言

鉴于衍射光学元件(DOE)的相位延迟表达式中有许多参数可以优化设计,所以,其能够为系统提供更多的自由度。近年来 DOE 在各种光学系统中的应用越来越多^[1-5]。衍射效率和带宽积分平均衍

射效率(BIADE)是 DOE 使用时应关注的重要参数,其决定了其工作的波段范围和入射角度范围,另一方面也会影响衍射混合光学系统的成像质量^[6]。通常单层 DOE 适用工作的波段范围较窄,多层衍射光学元件(MLDOE)可以在较宽的波段范围内得到较高的衍射效率和 BIADE^[7-9]。

收稿日期: 2019-12-06; 修回日期: 2019-12-31; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(11847161, 11847166)、江苏省高校自然科学基金项目(19KJD140005)

* E-mail: yang_liangliang@163.com

目前,可以采用多种不同的方法加工DOEs^[10-11]。无论采用何种加工方法,DOEs在加工过程中都会引入加工误差。对于含有DOEs的光学系统,在装调过程中也会引入装调误差。加工误差和装调误差都会影响DOEs的衍射效率和BIADE,进而导致光学系统的成像质量下降。有相关学者分析了MLDOEs的微结构高度误差、周期宽度误差等加工误差对衍射效率的影响,并提出了斜入射时基于复合BIADE的最大化实现微结构高度误差的设计^[12-15]。文献[16]分析了正入射时MLDOEs的偏心误差、倾斜误差等装调误差对衍射效率的影响,文献[17]进一步给出了斜入射时偏心误差的公差分析。对于斜入射时倾斜误差对衍射效率或BIADE的影响还没有相关文章给出分析。

入射角度的增大会引起DOEs的衍射效率降低,所以对于装调误差的分析也需要考虑入射角度的影响。本文基于标量衍射理论,首先建立了斜入射时MLDOEs衍射效率与倾斜误差的关系,分析了倾斜误差对衍射效率和BIADE的影响。然后,提出了工作在一定波段范围内、一定入射角度范围内的复合BIADE与倾斜误差的关系,讨论了一定入射角度范围内工作时的MLDOEs的倾斜误差对复合BIADE的影响。该分析方法和结论对于DOEs的设计和装调具有重要的指导意义。

2 倾斜误差与衍射效率的理论模型

分离型双层DOEs是最常用、最简单的MLDOEs,由两个谐衍射元件组成,中介质为空气。对于应用于成像光学系统中的MLDOEs,其特征尺寸远大于入射光线的波长,所以,标量衍射理论可以满足设计的准确度要求。根据标量的衍射理论,双层DOEs的衍射面可以采用二元光学元件的台阶结构作近似模拟,当台阶数 N 趋于无穷大时,可实现从二元光学元件到连续面型DOEs的转换^[18-19]。斜入射的光线在第一层和第二层谐衍射元件的相邻台阶之间传播光路示意图,如图1中虚线所示。相邻台阶之间的相位延迟为

$$\phi(\lambda) = \frac{2\pi\Delta_1[n_1(\lambda)\cos\theta_{i,1} - \sqrt{1-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_{i,1}}]}{\lambda} + \frac{2\pi\Delta_2[\sqrt{n_2^2(\lambda) - \sin^2\theta_{i,2}} - \cos\theta_{i,2}]}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: Δ_1 和 Δ_2 分别为MLDOEs相邻台阶的高度; $n_j(\lambda)$ 为第 j 层谐衍射元件的折射率; $\theta_{i,j}$ 为第 j 层谐衍射元件的入射角度。MLDOEs的微结构高度

分别为 $d_1=N\Delta_1$, $d_2=N\Delta_2$,则总的相位延迟为

$$\phi(\lambda) = N\phi(\lambda) = \frac{2\pi d_1[n_1(\lambda)\cos\theta_{i,1} - \sqrt{1-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_{i,1}}]}{\lambda} + \frac{2\pi d_2[\sqrt{n_2^2(\lambda) - \sin^2\theta_{i,2}} - \cos\theta_{i,2}]}{\lambda}. \quad (2)$$

当MLDOEs在装调过程中引入倾斜误差时,因为倾斜量是一个相对值,是针对一层谐衍射元件相对于另一层谐衍射元件来表征的,所以,如图1中实线所示仅给出了第二层谐衍射元件发生倾斜的情况,倾斜误差对应的角度记为 α ,图中 y_1 、 y_2 和 y_3 、 y_4 是入射光线通过MLDOEs第一和第二表面时的变化值。根据折射定律,入射角度和倾斜误差角度满足

$$\begin{cases} \theta_{i,2} = \theta_{t,1} + \alpha \\ n_1 \sin\theta_{i,1} = \sin\theta_{t,1} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\theta_{t,1}$ 为光线经过第一层谐衍射元件的出射角度。把(3)式代入到(2)式中,可得考虑倾斜误差因素在内的相位延迟表达式为

$$\phi(\lambda) = \frac{2\pi d_1[n_1(\lambda)\cos\theta_{i,1} - \sqrt{1-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_{i,1}}]}{\lambda} + \frac{2\pi d_2[n_1(\lambda)\sin\theta_{i,1}\sin\alpha - \cos\alpha\sqrt{1-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_{i,1}}]}{\lambda} + \frac{2\pi d_2[n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_{i,1}\cos 2\alpha - \sin^2\alpha - n_1(\lambda)\sin\theta_{i,1}\sin 2\alpha\sqrt{1-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_{i,1}}]^{\frac{1}{2}}}{\lambda}. \quad (4)$$

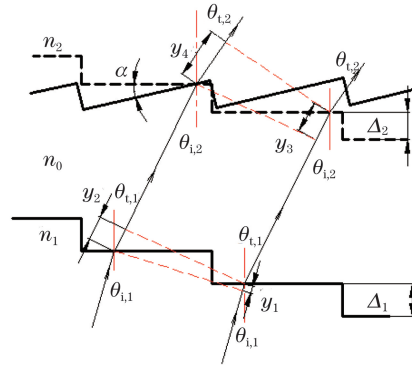


图1 MLDOEs表面入射光的折射

Fig. 1 Refraction of incident rays at surface of MLDOEs

MLDOEs第 m 衍射级次的衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2\left(m - \frac{\phi\lambda}{2\pi}\right). \quad (5)$$

工作在一定波段范围内的MLDOEs的BIADE为

$$\bar{\eta}_m(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda, \quad (6)$$

式中: λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别表示MLDOEs工作波段范围

内的最小和最大波长值。工作在一定的入射角度范围内的 MLDOEs,其复合 BIADe 为

$$\bar{\eta}_{cm}(\theta) = \frac{1}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \bar{\eta}_m d\theta = \frac{1}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \cdot \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda d\theta, \quad (7)$$

式中: θ_{\min} 和 θ_{\max} 分别表示 MLDOEs 工作角度范围内的最小和最大入射角度值。根据(7)式,可得工作在一定入射角度范围内的 MLDOEs 存在一定倾斜误差时,对应的复合 BIADe 值。

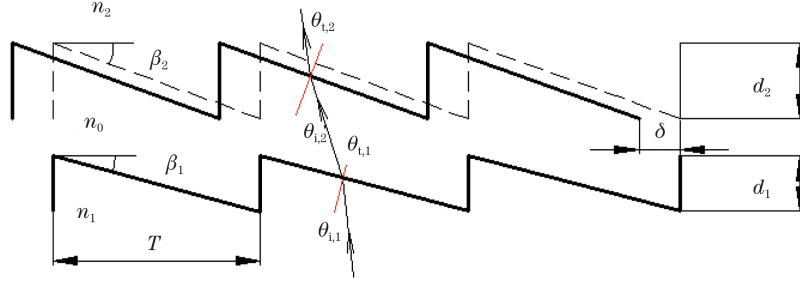


图 2 MLDOEs 的偏心误差

Fig. 2 Decenter error of MLDOEs

若考虑多层衍射元件在加工过程中引入的微结构高度误差,则第*i*层谐衍射元件的实际微结构高度为

$$d'_i = d_i + \Delta d_i = d_i(1 + \epsilon_i), \quad (9)$$

式中: Δd_i 和 ϵ_i ($i=1,2$)分别表示第*i*层谐衍射元件的微结构高度误差和相对微结构高度误差。那么,考虑到微结构高度误差、偏心误差和倾斜误差时的相位延迟表达式为

$$\begin{aligned} \phi(\lambda) = & \frac{2\pi d'_1}{\lambda} [n_1(\lambda) \cos \theta_{i,1} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}}] + \\ & \frac{2\pi d'_2}{\lambda} [n_1(\lambda) \sin \theta_{i,1} \sin \alpha - \cos \alpha \sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}}] + \\ & \frac{2\pi d'_2}{\lambda} [n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1} \cos 2\alpha - \sin^2 \alpha - \\ & n_1(\lambda) \sin \theta_{i,1} \sin 2\alpha \sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}}]^{\frac{1}{2}} + \\ & \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta \sin \beta_2}{\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}}} [\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}} \cdot \\ & \sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}} + n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1} - 1]. \end{aligned} \quad (10)$$

把(10)式代入到(7)式中即可计算出工作在一定的入射角度范围内、存在一定偏心误差、微结构高度误差和倾斜误差的 MLDOEs 的复合 BIADe。

3 分析和讨论

以工作在 8~12 μm 波段的成像光学系统中

若 MLDOEs 存在如图 2 所示的偏心误差 δ ,则会引入附加相位,即

$$\phi_\delta(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta \sin \beta_2}{\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}}} \cdot [\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}} \cdot \sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1}} + n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i,1} - 1], \quad (8)$$

式中: $\sin \beta_2 = \frac{d_2}{\sqrt{T^2 + d_2^2}}$, T 为元件的微结构周期宽度。

所持有的 MLDOEs 为例,分析斜入射时倾斜误差对衍射效率和 BIADe 的影响。基底材料采用硒化锌(ZnSe)和硫化锌(ZnS),衍射级次取 $m=1$ 。基于正入射时 BIADe 的最大化^[20],得到设计波长为 8.80 μm 和 11.12 μm,对应的微结构高度为 120.60 μm 和 -133.11 μm。

3.1 正入射时的倾斜误差分析

正入射时,MLDOEs 在 8.80 μm 和 11.12 μm 两个设计波长处对应的衍射效率与倾斜误差角度的关系如图 3 所示。当倾斜误差为 5°时,在设计波长 8.80 μm 和 11.12 μm 处对应的衍射效率分别为 99.67% 和 99.80%。MLDOEs 在 8~12 μm 整个波段范围内对应的 BIADe 与倾斜误差的关系如图 4 所示。当倾斜误差为 5°时,对应的 BIADe 为 99.71%。从图 3、4 可知,正入射时,随倾斜误差的增大,设计波长处的衍射效率和 BIADe 逐渐减小。若要求 MLDOEs 在整个波段范围内的 BIADe 高于 98%,倾斜误差上限应小于 8.29°。

3.2 斜入射时的倾斜误差分析

在折衍射混合成像光学系统中,入射光照射 MLDOEs 的微结构表面时一般都有一定的入射角度,呈现斜入射的工作状态。根据(4)式和(7)式,可得当入射角度分别为 0°,5°,10°,15°,20°时,MLDOEs 在 8~12 μm 整个波段范围内的 BIADe 与倾斜误差的关系,如图 5 所示。当入射角度为 5°时,若倾斜误

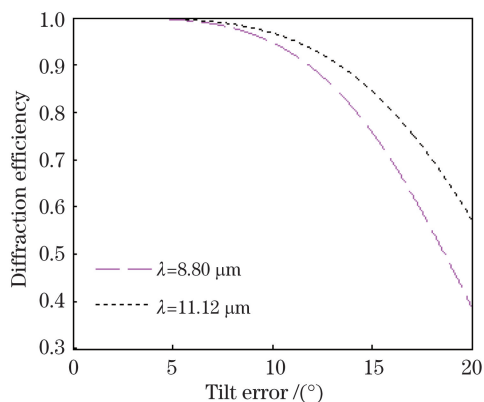


图 3 正入射时两个波长处的衍射效率与倾斜误差的关系

Fig. 3 Diffraction efficiency versus tilt error at two wavelengths at normal incidence

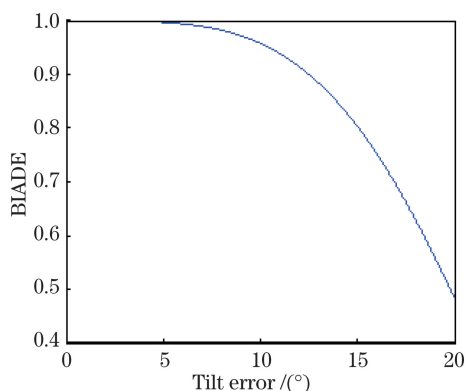


图 4 正入射时 BIADE 与倾斜误差的关系

Fig. 4 BIADE versus tilt error at normal incidence

差为 5°, 对应的 BIADE 为 90.65%, 相比正入射下降了 9.06 个百分点, 如表 1 所示。表 1 中给出了在上述几个入射角度状态下, 倾斜误差分别为 0°, 2°, 5°, 10° 时的 BIADE。可见, 入射角度越大, MLDOEs 的 BIADE 随倾斜误差的增大下降得越迅速, 与正入射时的偏差越大。所以, 倾斜误差对 BIADE 影响的分析需要考虑 MLDOEs 实际工作的入射角度大小。

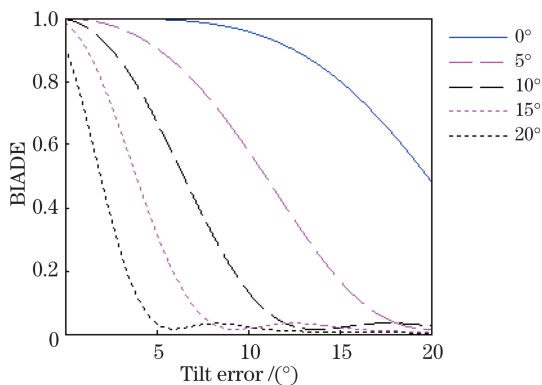


图 5 斜入射时 BIADE 与倾斜误差的关系

Fig. 5 BIADE versus tilt error at oblique incidence

表 1 斜入射时 BIADE 与倾斜误差 α 的关系

Table 1 Relationship between BIADE and tilt error α at oblique incidence

Incident angle / (°)	BIADE / %			
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 2^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
0	99.97	99.96	99.71	95.83
5	99.96	98.60	90.65	58.13
10	99.80	93.44	67.35	13.47
15	98.57	80.21	31.99	1.78
20	90.90	48.56	3.39	2.33 *

Note: “*” has no reference significance. As can be seen from figure 5, it is the corresponding value that increases after BIADE decreases.

3.3 倾斜误差对复合 BIADE 的影响

当 MLDOEs 工作的入射角度范围确定后, 根据复合 BIADE 与倾斜误差的关系, 可以确定倾斜误差的公差。当 MLDOEs 的入射角度范围为 0°~10° 时, 在整个工作波段范围内对应的复合 BIADE 与倾斜误差的关系如图 6 所示。随倾斜误差的增大, MLDOEs 在整个波段范围内的复合 BIADE 从最大值 99.94% 逐渐减小; 若要求 BIADE 高于 98%, 对应的倾斜误差应小于 1.99°, 对比无误差时下降了 6.30%。

同理可得, 当 MLDOEs 分别工作在 0°~5°、0°~15° 和 0°~20° 的入射角度范围内时, 复合 BIADE 与倾斜误差的关系如表 2 所示。对于 0°~20° 的入射角度范围, 若要求复合 BIADE 高于 98%, 对应的倾斜误差上限应小于 0.25°, 与正入射时对比差别十分明显。可见, 随着 MLDOEs 工作入射角度范围的增大, 要实现较高的复合 BIADE 所要求的倾斜误差角度越小。

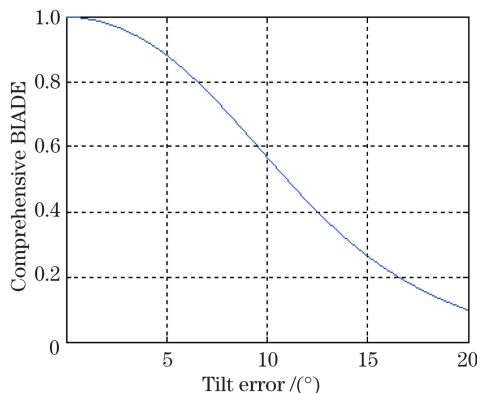


图 6 入射角度范围为 0°~10° 时的复合 BIADE

Fig. 6 Comprehensive BIADE within 0°~10° incident angle range

表 2 入射角度 θ_i 范围不同时复合 BIADE 与倾斜误差的关系

Table 2 Comprehensive BIADE versus tilt error within different incident angle ranges θ_i

Comprehensive BIADE / %	Tilt error / (°)				
	$\theta_i = 0^\circ$	$\theta_i \in (0^\circ, 5^\circ]$	$\theta_i \in (0^\circ, 10^\circ]$	$\theta_i \in (0^\circ, 15^\circ]$	$\theta_i \in (0^\circ, 20^\circ]$
98	8.29	3.84	1.99	1.01	0.25
95	10.48	5.67	3.24	1.90	0.92
90	12.53	7.50	4.61	2.91	1.69

3.4 综合考虑其他误差时的倾斜误差对复合 BIADE 的影响

前文的分析是基于单独考虑倾斜误差得到的结论,实际装调 MLDOEs 通常还会存在偏心误差。若 MLDOEs 仅存在一定的偏心误差,利用(6)式和(10)式可得当入射角度分别为 0° 和 10° , 周期宽度 T 分别为 $1500 \mu\text{m}$ 和 $1000 \mu\text{m}$ 时的 BIADE,如图 7 所示。可见,周期宽度越大,BIADE 随偏心误差的增大而下降,且下降趋势越来越缓慢。对于红外成像光学系统中使用的 MLDOEs,通常其周期宽度都很大,所以下面分析时周期宽度 T 都取 $1500 \mu\text{m}$ 。当入射角度为 10° ,若偏心误差分别为 $0, 5, 10 \mu\text{m}$ 时,BIADE 与倾斜误差的关系如图 8 所示。

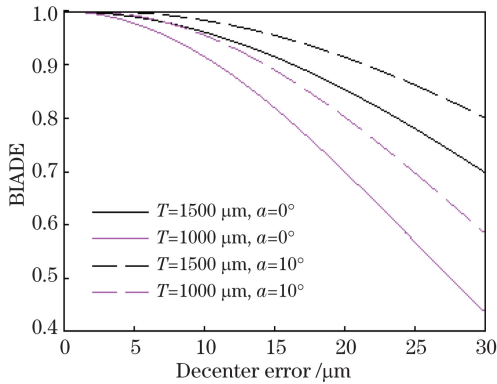


图 7 BIADE 与偏心误差的关系

Fig. 7 BIADE versus decenter error

从图 7 和图 8 可见,周期宽度和误差一定时, 10° 入射角度对应的 BIADE 高于正入射。这一点从图 2 中光线在微结构表面的折射就可以看出,当存在一定的偏心误差时,正入射对应的工作周期宽度随偏心误差的增大而减小;如果光线处于一定的斜入射角度范围内,由偏心误差引起工作周期宽度的减小就会在一定程度上抵消。从图 8 可以看出,入射角度为 10° 确定后,当倾斜误差为 0° 时,MLDOEs 的 BIADE 随偏心误差的增大而下降;随着倾斜误差逐渐增大,在一定范围内会抵消偏心误差带来的影响。例如随倾斜误差的增大,当偏心误差为 $5 \mu\text{m}$

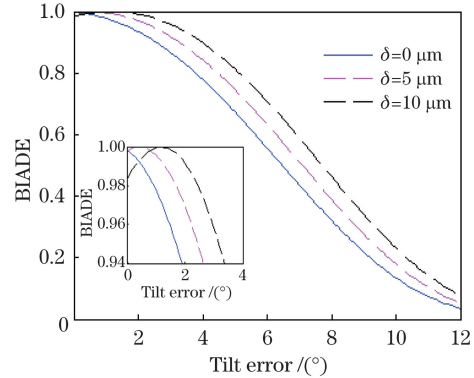


图 8 斜入射时的 BIADE 与倾斜误差和偏心误差的关系 (插图部分放大图)

Fig. 8 BIADE versus tilt error and decenter error at oblique incidence, in which the illustration is an enlarged version

时,BIADE 从 99.79% 先增大到 99.97% (0.4° 的倾斜误差),然后逐渐减小;当偏心误差为 $10 \mu\text{m}$ 时,BIADE 从 98.36% 先增大到 99.97% (1.2° 的倾斜误差),然后逐渐减小。

当 MLDOEs 的入射角度范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时,偏心误差为 $10 \mu\text{m}$ 时,得到复合 BIADE 与倾斜误差的关系如图 9 所示。正因为偏心误差和倾斜误差同时存在,所以,随倾斜误差的增大,MLDOEs 的复合 BIADE 从 96.92% 先增大到最大值 98.95% (倾斜误差为 2.32°),然后逐渐减小。可见:若要求其复合 BIADE 高于 98% ,对应的倾斜误差应在 $0.77^\circ \sim 3.75^\circ$ 范围内;若要求 BIADE 高于 95% ,对应的倾斜误差上限应小于 5.17° 。

除了倾斜误差和偏心误差等装调误差外,若 MLDOEs 存在一定的加工误差,如微结构高度误差,那么,根据(5)、(7)、(10)式,就可以计算得到当入射角度范围确定后,存在一定微结构高度误差和偏心误差时的复合 BIADE 与倾斜误差的关系。如图 10 所示为入射角度范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$,偏心误差为 $10 \mu\text{m}$,组成 MLDOEs 的各谐衍射元件的相对微结构高度误差相等,即 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$,且分别为 $0, \pm 2\%, \pm 5\%, \pm 10\%$ 时,复合 BIADE 与倾斜误差的关系。

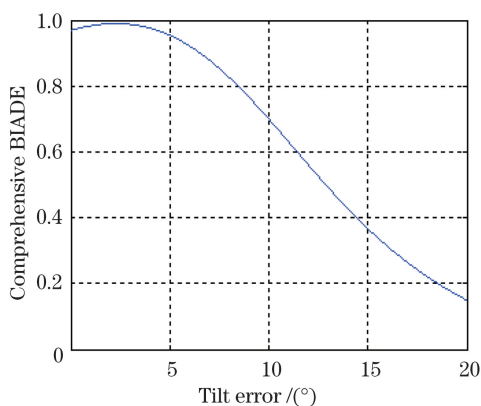


图 9 存在偏心误差时的复合 BIADe

Fig. 9 Comprehensive BIADe with decenter error

此时,复合 BIADe 分别为 98%,95%,90%时对应的倾斜误差大小如表 3 所示。

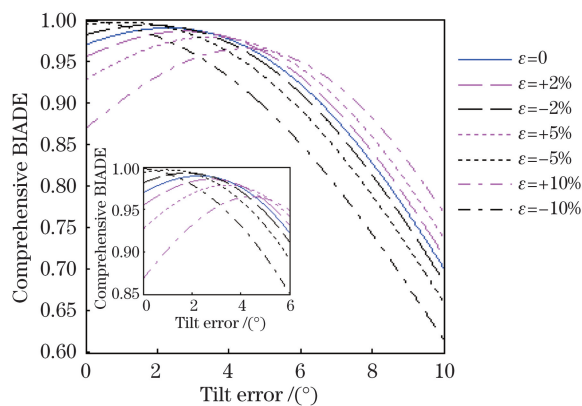


图 10 综合考虑其他误差时的复合 BIADe

(插图为部分放大图)

Fig. 10 Comprehensive BIADe with considering other errors, in which the illustration is an enlarged version

表 3 综合考虑其他误差时的复合 BIADe 与倾斜误差关系

Table 3 Relationship of tilt errors based on comprehensive BIADe with considering other errors

Comprehensive BIADe / %	Tilt error / (°)						
	$\epsilon=0\%$	$\epsilon=+2\%$	$\epsilon=-2\%$	$\epsilon=+5\%$	$\epsilon=-5\%$	$\epsilon=+10\%$	$\epsilon=-10\%$
98	0.77-3.75	1.67-3.86	3.54	—	3.08	—	1.97
95	5.17	5.41	4.89	0.97-5.70	4.40	2.87-5.97	3.36
90	6.55	6.80	6.28	7.14	5.81	0.93-7.57	4.87

从图 10 和表 3 可见,当偏心误差一定时,随着相对微结构高度误差绝对值的逐渐增大,对应相同复合 BIADe 所要求的倾斜误差变化范围逐渐减小。例如:若要求其复合 BIADe 高于 98%, ϵ 为 +2%时对应的倾斜误差应控制在 $1.67^\circ\sim 3.86^\circ$ 范围内, ϵ 为 -2%时对应的倾斜误差上限为 3.54° ;若要求其复合 BIADe 高于 95%, ϵ 为 +5%时对应的倾斜误差应控制在 $0.97^\circ\sim 5.70^\circ$ 范围内, ϵ 为 -5%时对应的倾斜误差上限为 4.40° 。可见,偏心误差和相对微结构高度误差等其他误差的存在会对实现一定复合 BIADe 所要求的倾斜误差有一定的影响。

4 结 论

MLDOEs 的装调误差分析中没有考虑到斜入射时倾斜误差对衍射效率的影响,而入射角度的增大会直接引起衍射效率的下降。本文基于衍射光学的理论,把倾斜误差引入到 MLDOEs 的相位延迟表达式中,得到衍射效率和 BIADe 与倾斜误差的理论关系。以红外波段的 MLDOEs 为例,分析了斜入射时倾斜误差对衍射效率和 BIADe 的影响。给出了工作在一定入射角度范围内的复合 BIADe 与倾斜误差的关系,在数值上分析了倾斜误差对复

合 BIADe 的影响。在此基础上,进一步分析了存在偏心误差和相对微结构高度误差时,达到一定复合 BIADe 时对倾斜误差的要求。结果表明,随着 MLDOEs 工作入射角度范围的增大,要实现较高的复合 BIADe 所要求的倾斜误差角度越来越小,所以,当 MLDOEs 衍射面上入射角度较大时,需要注意倾斜误差的影响。偏心误差和微结构高度误差等其他误差的存在也会影响实现一定复合 BIADe 所对应的倾斜误差角度大小,所以,倾斜误差公差的规定要根据具体的工作条件和加工情况综合考虑。该分析方法能够对混合光学系统中 MLDOEs 装调公差的分析有一定的指导作用。

参 考 文 献

[1] Goncharky A, Goncharky A, Durlevich S. Diffractive optical element for creating visual 3D images[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9140-9148.
 [2] Symeonidis M, Nakagawa W, Kim D C, et al. High-resolution interference microscopy of binary phase diffractive optical elements[J]. OSA Continuum, 2019, 2(9): 2496-2510.
 [3] Wang H, Kang F Z, Zhao W, et al. An optical design for dual-band infrared diffractive telescope[J].

- Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(1): 39-43.
王昊, 康福增, 赵卫, 等. 一种红外双波段衍射望远镜的光学设计[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(1): 39-43.
- [4] Yang M X, Kong Z, Tan Q F, et al. Precise design of diffraction optical elements based on annular beam shaping[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0305002.
杨美霞, 孔哲, 谭峭峰, 等. 基于环形光束整形的DOEs的精确设计[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0305002.
- [5] Li X J, Feng D W, Xiang Y. Refractive-diffractive hybrid panoramic annular optical system design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 182201.
李显杰, 冯大伟, 向阳. 折衍混合环带式全景光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 182201.
- [6] 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.
- [7] Arieli Y, Ozeri S, Eisenberg N, et al. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth[J]. Optics Letters, 1998, 23(11): 823-824.
- [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] Mao S, Zhao L D, Zhao J L. Integral diffraction efficiency model for multilayer diffractive optical elements with wide angles of incidence in case of polychromatic light[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21497-21507.
- [10] Thiele S, Pruss C, Herkommer A M, et al. 3D printed stacked diffractive microlenses[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35621-35630.
- [11] Roeder M, Thiele S, Hera D, et al. Fabrication of curved diffractive optical elements by means of laser direct writing, electroplating, and injection compression molding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 402-409.
- [12] Yang L L, Cui Q F, Liu T, et al. Effects of manufacturing errors on diffraction efficiency for multilayer diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 2011, 50(32): 6128-6133.
- [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] Zhao L D, Cui Q F, Mao S, et al. Effect of the surface roughness on the efficiency of diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10276-10283.
- [15] Yang L L, Liu C L, Li S Q. Optimal design of depth-scaling error for multilayer diffractive optical elements with oblique incidence[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4532-4536.
- [16] Gao L, Xue C X, Yang H F, et al. Effect of decenter errors on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements in long infrared waveband[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 36(6): 0623004.
高龙, 薛常喜, 杨红芳, 等. 偏心误差对长波红外波段MLDOEs衍射效率的影响[J]. 光学学报, 2015, 36(6): 0623004.
- [17] Mao S, Zhao J L. Tolerance analysis on decenter error of multilayer diffractive optical elements based on polychromatic integral diffraction efficiency[J]. Applied Optics, 2019, 58(9): 2422-2428.
- [18] Swanson G J. Binary optics technology: theoretical limits on the diffraction efficiency of multilevel diffractive optical elements [R]. Lexington: MIT Lincoln Laboratory Technical Report, 1991: 914.
- [19] Pei X D, Cui Q F, Leng J K. Effect of incident angle on diffraction efficiency of a two-layer diffractive optical element[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 120-125.
裴雪丹, 崔庆丰, 冷家开. 入射角对双层DOEs衍射效率的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 120-125.
- [20] Xue C X, Cui Q F. Design of multilayer diffractive optical elements with polychromatic integral diffraction efficiency[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 986-988.