

斜入射时一定温度范围内微结构高度误差对衍射效率的影响

杨亮亮*, 刘成林, 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 工作环境温度的改变会降低衍射光学元件的衍射效率,影响混合光学系统的成像质量。基于斜入射时衍射效率的表达式,在双层衍射光学元件的设计中考虑温度变化,提出了工作在一定温度范围内和入射角度范围内的双层衍射光学元件微结构高度误差与衍射效率和带宽积分平均衍射效率的数学模型。以工作在可见光波段的双层衍射光学元件为例进行分析。结果表明,当环境温度确定后,随入射角度范围的增大,最高带宽积分平均衍射效率对应的最优相对微结构高度误差逐渐减小。当双层衍射光学元件工作在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的入射角度范围内、环境温度范围为 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 时,其带宽积分平均衍射效率最高为96.81%,对应的最优相对微结构高度误差为4.42%。该方法进一步完善了双层衍射光学元件加工误差的设计理论。

关键词 衍射; 衍射效率; 温度; 微结构高度误差; 斜入射

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0405001

Effect of Microstructure Height Error on Diffraction Efficiency at Oblique Incidence in a Certain Temperature Range

Yang Liangliang*, Liu Chenglin, Zhao Yongbing, Guo Renjia

School of Physics and Electronics Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224007, China

Abstract The change in environmental temperature can reduce the diffraction efficiency of diffractive optical elements (DOEs) and thus affect the imaging quality of a hybrid optical system. Based on the expression of diffraction efficiency at oblique incidence, the temperature change is considered in the design of the double-layer diffractive optical elements (DLDOEs). The mathematical model of microstructure height error and diffraction efficiency/polychromatic integral diffraction efficiency (PIDE) of the DLDOEs within a certain temperature range and at certain incident angles is developed. The DLDOE that works in a visible waveband is taken as an example. The result shows that when a range of environmental temperature is determined, the optimal relative microstructure height error corresponding to the maximum PIDE decreases with the increase of the incident angle range. For the DLDOEs working within the incident angle range of $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ and the environmental temperature range of $40\sim 80^{\circ}\text{C}$, the maximum PIDE is 96.81%, and the corresponding optimal relative microstructure height error is 4.42%. Accordingly, the proposed model can further improve the design theory of the manufacturing error of the DLDOEs.

Key words diffraction; diffraction efficiency; temperature; microstructure height error; oblique incidence

OCIS codes 050.1970; 220.4000; 050.1960

1 引 言

衍射光学元件(DOEs)具有独特的负色散性质和消热差性质,目前已经广泛应用于各种光学系统中^[1-5]。对于成像光学系统,特别是军用系统,环境温度是影响光学系统成像质量的重要因素之一。当

环境温度改变时,衍射光学元件的衍射效率会下降,进一步降低混合光学系统的成像质量。多层衍射光学元件能够以较高的衍射效率工作在较宽的波段范围内。成像系统中常用的多层衍射光学元件是分离型双层衍射光学元件(DLDOEs),其衍射效率随入射角度的增大而较快下降,并且加工误差的存在会

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-10-10; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(19KJD140005)

* E-mail: yang_liangliang@163.com

导致实际测得的衍射效率较低^[6]。

对于衍射光学元件的研究,近年来的主要焦点在于加工误差、制作方法和镀膜等方面^[7-12]。其中加工误差的研究较多,相关学者研究并分析了周期宽度误差、微结构高度误差等加工误差对衍射效率的影响^[7-10]。文献[13]提出了斜入射时基于复合带宽积分平均衍射效率(PIDE)的微结构高度误差的优化设计方法,但并没有考虑环境温度的影响。文献[14]讨论了三层衍射光学元件的宽积分平均衍射效率随入射角度和环境温度的变化;文献[15]分析了在一定温度范围内工作时多层衍射光学元件的基底材料的选择,均没有考虑温度对加工误差的影响。针对工作在一定温度范围内、一定入射角度范围内的衍射光学元件加工误差的优化设计鲜有报道。

用于光学成像系统的多层衍射光学元件的特征尺寸远远大于入射光的波长,因此一般情况下,标量

衍射理论能够满足设计要求和精度要求。本文利用基于标量衍射理论的双层衍射光学元件斜入射时的衍射效率表达式,研究了工作在一定温度范围内、一定入射角度范围内的双层衍射光学元件的微结构高度误差对衍射效率和带宽积分平均衍射效率的影响。基于带宽积分平均衍射效率最大化方法,提出工作在一定温度范围内、一定入射角度范围内的微结构高度误差的优化设计。该方法和结论有助于进一步完善衍射光学元件的设计理论,指导含有双层衍射光学元件的混合光学系统中微结构高度误差的制定。

2 理论模型

最常用、最简单的多层衍射光学元件是中间介质为空气的分离型双层衍射光学元件。考虑到入射角度,斜入射时双层衍射光学元件的第 m 衍射级次的衍射效率与入射角度关系的表达式^[16]为

$$\eta = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{d_{10}[n_1(\lambda)\cos\theta - A] + d_{20}[B - A]}{\lambda} \right\}, \quad (1)$$

式中: $A = \sqrt{1 - n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}$; $B = \sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}$; m 是衍射级次; d_{10} 和 d_{20} 分别为组成双层衍射光学元件的两个谐衍射元件的理论微结构高度; $n_1(\lambda)$ 和 $n_2(\lambda)$ 分别为两个谐衍射元件的基底材料在入射波长为 λ 时的折射率; θ 为光线的入射角度。在双层衍射光学元件加工过程中,若引入的微结构高度误差分别记为 Δd_1 和 Δd_2 , 则

实际的微结构高度为

$$\begin{cases} d_1 = d_{10} + \Delta d_1 = d_{10}(1 + \epsilon_1) \\ d_2 = d_{20} + \Delta d_2 = d_{20}(1 + \epsilon_2) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\epsilon_1 = \Delta d_1/d_{10}$, $\epsilon_2 = \Delta d_2/d_{20}$ 分别表示两个谐衍射元件的相对微结构高度误差。存在微结构高度误差时,双层衍射光学元件第 m 衍射级次的衍射效率为

$$\eta = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{d_{10}(1 + \epsilon_1)[n_1(\lambda)\cos\theta - A] + d_{20}(1 + \epsilon_2)(B - A)}{\lambda} \right\}. \quad (3)$$

当环境温度变化时,双层衍射元件的微结构高度会随之改变。如图 1 所示,微结构高度的大小随温度的变化会大于或小于理论微结构高度。由温度变化引起的两个谐衍射元件的实际微结构高度分别为

$$\begin{cases} d_{1t} = d_{10}(1 + \alpha_{1g}\Delta T) \\ d_{2t} = d_{20}(1 + \alpha_{2g}\Delta T) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\alpha_{ig} = (1/d_{i0})dd_{i0}/dT$ ($i = 1, 2$), 为第 i 个基底材料的热膨胀系数,表示温度变化所引起的微结构高度的相对改变量; ΔT 为环境温度的变化量,数值上等于环境温度 T 与参考温度 T_0 (一般取 20°C) 的差值。

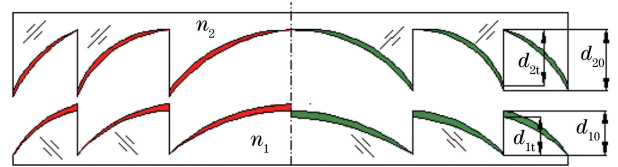


图 1 温度变化引起微结构高度改变的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of microstructure height changes caused by temperature changes

工作在一定温度范围内,斜入射时双层衍射光学元件第 m 衍射级次的衍射效率与相对微结构高度误差的关系为

$$\eta = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{d_{10}(1+\epsilon_1)(1+\alpha_{1g}\Delta T)[n_1(\lambda)\cos\theta - A] + d_{10}(1+\epsilon_1) \left[\frac{dn_1}{dT}\Delta T\cos\theta + n_1^2(\lambda)\sin^2\theta \frac{dn_1}{dT} \frac{\Delta T}{A} \right]}{\lambda} - \frac{d_{20}(1+\epsilon_2)(1+\alpha_{2g}\Delta T)(B-A)}{\lambda} - \frac{d_{20}(1+\epsilon_2) \frac{\Delta T}{B} \left[\left(n_2(\lambda) \frac{dn_2}{dT} - n_1(\lambda)\sin^2\theta \frac{dn_1}{dT} \right) + n_1^2(\lambda)\sin^2\theta \frac{dn_1}{dT} \frac{\Delta T}{A} \right]}{\lambda} \right\}, \quad (5)$$

式中： $\frac{dn_i}{dT}$ 为第*i*个谐衍射元件基底材料的折射率温度系数。

斜入射时双层衍射光学元件第*m*衍射级次的带宽积分平均衍射效率与温度和相对微结构高度误差的关系为

$$\bar{\eta}(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \left\{ m - \frac{d_{10}(1+\epsilon_1)(1+\alpha_{1g}\Delta T)[n_1(\lambda)\cos\theta - A] + d_{10}(1+\epsilon_1) \left[\frac{dn_1}{dT}\Delta T\cos\theta + n_1^2(\lambda)\sin^2\theta \frac{dn_1}{dT} \frac{\Delta T}{A} \right]}{\lambda} - \frac{d_{20}(1+\epsilon_2)(1+\alpha_{2g}\Delta T)(B-A)}{\lambda} - \frac{d_{20}(1+\epsilon_2) \frac{\Delta T}{B} \left[\left(n_2(\lambda) \frac{dn_2}{dT} - n_1(\lambda)\sin^2\theta \frac{dn_1}{dT} \right) + n_1^2(\lambda)\sin^2\theta \frac{dn_1}{dT} \frac{\Delta T}{A} \right]}{\lambda} \right\} d\lambda, \quad (6)$$

式中， λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别表示双层衍射光学元件在工作波段范围内的最小和最大波长值。

3 分析和讨论

工作在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波段的双层衍射光学元件，基底材料采用光学塑料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)，衍射级次取 $m=1$ 。根据正入射时带宽积分平均衍射效率的最大化^[17]得到设计波长为 $0.435 \mu\text{m}$ 和 $0.598 \mu\text{m}$ ，对应的理论微结构高度为 $16.46 \mu\text{m}$ 和 $-12.81 \mu\text{m}$ 。双层衍射光学元件的两个微结构高度误差相等时对衍射效率的影响最小^[7]，文中假设两相对微结构高度误差相等，即 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ 。

3.1 正入射时温度变化和微结构高度误差对衍射效率的影响

当相对微结构高度误差 ϵ 分别为 $0, \pm 5\%, \pm 10\%$ 和 $\pm 15\%$ 时，取参考温度 T_0 ，即设计温度中心值为 20°C ，双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与温度的关系如图2所示。当双层衍射光学元件的 $\epsilon=0$ 时，在 $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ 的整个温度范围内带宽积分平均衍射效率最小值是 99.20% ；在设计温度中心值 20°C 处，带宽积分平均衍射效率最大，为 99.24% ，显然，带宽积分平均衍射效率变化很小。

当 ϵ 分别为 $+5\%$ 和 -5% 时，在整个温度范围内带宽积分平均衍射效率分别高于 98.06% 和 98.11% ；当 ϵ 分别为 $+15\%$ 和 -15% 时，在整个温度范围内的带宽积分平均衍射效率分别高于 91.13% 和 91.40% 。可见，正入射时，当相对微结构高度误差的绝对值相等时，在 $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ 整个温度范围内的带宽积分平均衍射效率最小值近似相等。

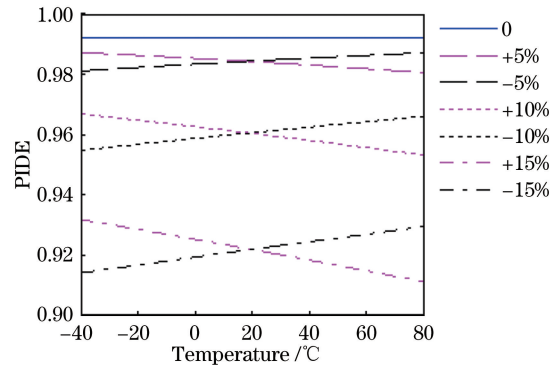


图2 不同相对微结构高度误差处的带宽积分平均衍射效率与温度的关系

Fig. 2 PIDE versus temperature at different relative microstructure height errors

3.2 斜入射时温度变化和微结构高度误差对衍射效率的影响

斜入射是混合成像光学系统中双层衍射光学元

件的普遍工作状态。当不考虑环境温度变化的影响,正入射时双层衍射光学元件最高带宽积分平均衍射效率为 99.24%,对应的相对微结构高度误差 ϵ 为 0。图 3 所示为不考虑环境温度变化时,在 5°、10°、15°、20°几个不同入射角度工作时,双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与相对微结构高度误差的关系。当入射角度范围为 0°~10°时,最高带宽积分平均衍射效率为 98.18%,对应的 ϵ 为 -1.52%;当入射角度范围为 0°~20°时,最高带宽积分平均衍射效率为 98.23%,对应的 ϵ 为 -6.22%。不考虑环境温度变化的影响时,随着入射角度范围的增大,双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率取最大值时对应的相对微结构高度误差逐渐减小。

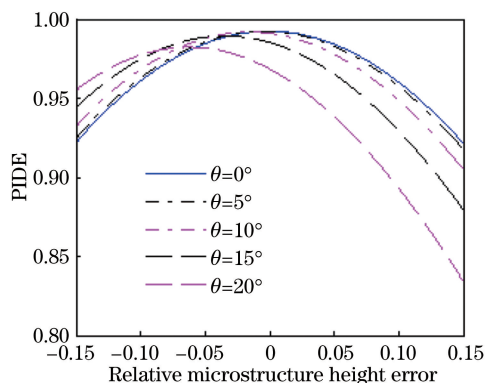


图 3 带宽积分平均衍射效率与相对微结构高度误差的关系
Fig. 3 PIDE versus relative microstructure height error

当双层衍射光学元件工作在 -40~80 °C 的环境温度范围内,相对微结构高度误差 ϵ 分别为 0、±5%、±10%和±15%时,其设计波长 0.435 μm 处的衍射效率与入射角度的关系如图 4 所示。当 ϵ 为 0、+5%、+10%和+15%时,随入射角度的增大,在 -40~80 °C 的温度范围内工作时,双层衍射光学元件的衍射效率从正入射时的最大值逐渐降低;而当 ϵ 为负值时,随入射角度的增大,衍射效率先逐渐增大到最大值,然后逐渐降低。

图 5 给出了双层衍射光学元件在整个波段范围内的带宽积分平均衍射效率随入射角度的变化关系,情况与图 4 不同。可以看到,当相对微结构高度的绝对值相等时,+ $|\epsilon|$ 和- $|\epsilon|$ 对应的带宽积分平均衍射效率在某一入射角度处是相等的。当 ϵ 分别为 +15%和-15%,在 9.62°的入射角度处,+15%对应的带宽积分平均衍射效率高于-15%对应的带宽积分平均衍射效率;当入射角度增大到 15°时,-15%对应的带宽积分平均衍射效率(92.86%)高

于+15%对应的带宽积分平均衍射效率(89.08%)。可见,当入射角度范围较小时,在 -40~80 °C 的环境温度范围,在 0.4~0.7 μm 整个波段范围内的双层衍射光学元件,+ $|\epsilon|$ 对应的带宽积分平均衍射效率高于- $|\epsilon|$ 对应的带宽积分平均衍射效率。

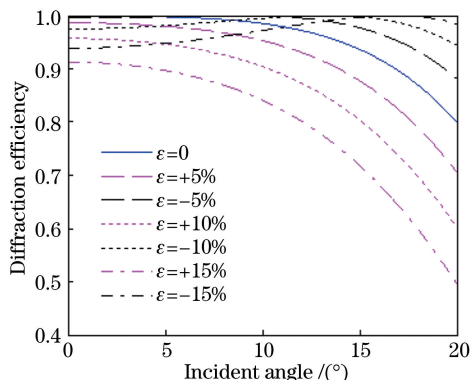


图 4 一定温度范围内的衍射效率和入射角度的关系
Fig. 4 Diffraction efficiency versus incident angle within certain temperature range

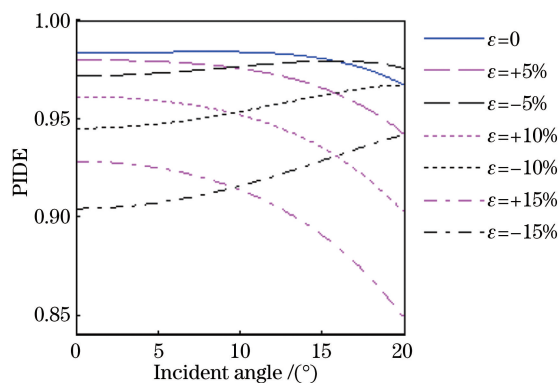


图 5 一定温度范围内的带宽积分平均衍射效率和入射角度的关系
Fig. 5 PIDE versus incident angle within certain temperature range

当双层衍射光学元件的工作环境温度范围确定为 -40~80 °C 时,在最大入射角度分别为 0°、5°、10°、15°、20°五种情况下,利用(5)式计算得到的 0.435 μm 处的衍射效率与相对微结构高度误差 ϵ 的关系如图 6 所示。正入射时,衍射效率最高为 98.42%,对应的最优 ϵ 为 5.40%;当入射角度范围为 0°~20°时,衍射效率最高为 98.22%,对应的最优 ϵ 为 -5.40%,如表 1 所示。可见,当环境温度确定后,入射角度范围的变化会影响最大衍射效率对应的最优相对微结构高度误差的大小;而且,随着入射角度范围的增大,双层衍射光学元件的衍射效率取最大值时对应的相对微结构高度误差逐渐减小。

利用(6)式计算得到的在 0.4~0.7 μm 整个波

段范围内的双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与相对微结构高度误差 ϵ 的关系如图 7 所示。如图 7 和表 2 所示,正入射时双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率最高为 96.36%,对应的最优 ϵ 为 9.40%。当入射角度范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时,带宽积分平均衍射效率最高为 96.63%,对应的最优 ϵ 为 7.39%。可见,随入射角度的增大,双层衍射光学元件在 $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ 的确定温度范围内,最高带宽积分平均衍射效率对应的最优 ϵ 显著减小。同理,表 2 也给出了环境温度为 $-60 \sim 60^\circ\text{C}$ 时,在上述五个入射角度范围内工作的双层衍射光学元件带宽积分平均衍射效率的最大值及其对应的最优 ϵ 。

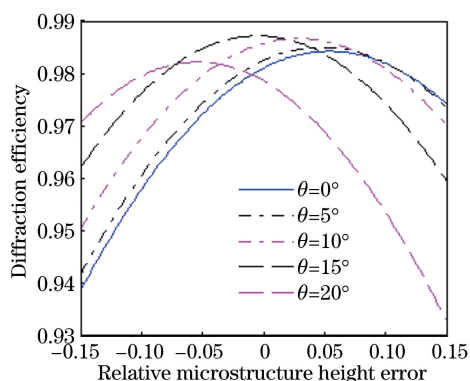


图 6 一定温度范围内衍射效率与相对微结构高度误差的关系
Fig. 6 Diffraction efficiency versus relative microstructure height error within certain temperature range

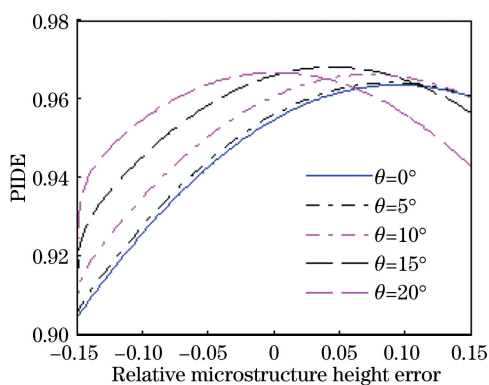


图 7 一定温度范围内带宽积分平均衍射效率与相对微结构高度误差的关系
Fig. 7 PIDE versus relative microstructure height error within certain temperature range

可见,当双层衍射光学元件的工作环境温度范围和入射角度范围确定后,利用文中给出的理论模型,就可以得到衍射效率/带宽积分平均衍射效率最大值对应的最优相对微结构高度误差,进一步改善折衍混合成像光学系统的成像质量。

表 1 最大衍射效率对应的最优相对微结构高度误差
Table 1 Optimal relative microstructure height error corresponding to maximum diffraction efficiency

Incident angle / ($^\circ$)	η / %	ϵ / %
0	98.42	5.40
0-5	98.50	4.72
0-10	98.67	2.84
0-15	98.72	-0.40
0-20	98.22	-5.40

表 2 最大带宽积分平均衍射效率对应的最优相对微结构高度误差

Table 2 Optimal relative microstructure height error corresponding to maximum PIDE

Incident angle / ($^\circ$)	$-40 \sim 80^\circ\text{C}$		$-60 \sim 60^\circ\text{C}$	
	$\bar{\eta}$ / %	ϵ / %	$\bar{\eta}$ / %	ϵ / %
0	96.36	9.40	96.26	9.98
0-5	96.42	9.00	96.33	9.60
0-10	96.63	7.39	96.54	7.81
0-15	96.81	4.42	96.73	4.99
0-20	96.67	0.21	96.61	0.61

4 结 论

双层衍射光学元件加工误差的传统设计方法没有考虑到环境温度对衍射效率的影响。本文所提出的微结构高度误差的优化设计方法在双层衍射光学元件的理论设计中考虑了环境温度因素,通过斜入射时衍射效率对温度的微分,建立了带宽积分平均衍射效率与加工误差、温度和入射角度的关系,实现了高带宽积分平均衍射效率的设计目的。对工作在可见光波段的双层衍射光学元件进行分析,对于考虑和不考虑工作环境温度变化范围的情况,最高带宽积分平均衍射效率对应的最优相对微结构高度误差是不同的。当环境温度确定后,随入射角度范围的增大,最高带宽积分平均衍射效率对应的相对微结构高度误差逐渐减小。该方法和结论从原理上弥补了双层衍射光学元件微结构高度误差的设计缺陷,为工作在一定温度范围内、一定入射角度范围内的双层衍射光学元件相对微结构高度误差的制定提供了理论指导。

参 考 文 献

[1] Wood A P. Design of infrared hybrid refractive -

- diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(13): 2253-2258.
- [2] Cox J A. Application of diffractive optics to infrared imagers[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2552: 304-312.
- [3] Zhang B, Cui Q F, Piao M X, et al. Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2058-2067.
- [4] 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.
- [5] Yang C, Yang H F, Li C, et al. Optimization and analysis of infrared multilayer diffractive optical elements with finite feature sizes[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): 2589-2595.
- [6] Yang L L. Measurement of diffraction efficiency for multi-layer diffractive optical elements with oblique incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0205003.
杨亮亮. 多层衍射光学元件斜入射衍射效率的测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0205003.
- [7] 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.
- [8] 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, 35(6): 0623004.
高龙, 薛常喜, 杨红芳, 等. 偏心误差对长波红外波段多层衍射光学元件衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0623004.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wang L, Xue C X, Lan X R, et al. Manufacturing technology of diffractive optical elements formed by ultraviolet-cured organic-inorganic nanocomposites[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0722001.
王伦, 薛常喜, 兰喜瑞, 等. 紫外光固化有机-无机纳米复合材料成型衍射光学元件制造技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0722001.
- [12] Mao S, Zhao J L. Optimal design for multi-layer diffractive optical elements with antireflection films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0305001.
毛珊, 赵建林. 镀有增透膜的多层衍射光学元件的优化设计方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0305001.
- [13] 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.
- [14] 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): 3549-3554.
- [15] Piao M X, Cui Q F, Zhao C Z, et al. Substrate material selection method for multilayer diffractive optics in a wide environmental temperature range[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2826-2833.
- [16] 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. 入射角对双层衍射光学元件衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 120-125.
- [17] 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.