

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

高 龙 薛常喜 杨红芳 聂 鑫

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 基于衍射光学元件的相位延迟和衍射效率表达式, 推导出了含有偏心误差的多层衍射光学元件衍射效率表达式。建立了含有偏心误差的多层衍射光学元件衍射效率的数学模型, 分析了偏心误差对多层衍射光学元件衍射效率及多色光积分衍射效率的影响。以在8~12 μm 波段内的硫化锌(ZnS)和锗(Ge)为基底材料构成的多层衍射光学元件为例, 其设计波长对为8.79 μm 、11.11 μm , 构成多层衍射光学元件的两层谐波衍射元件微结构高度为78.3391 μm 、34.6076 μm , 当多层衍射光学元件的环带宽度分别为500 μm 和1000 μm 时, 其衍射效率达到95%以上时, 偏心误差须分别控制在5.8 μm 和11.17 μm 以内。该含有偏心误差的多层衍射光学元件的衍射效率分析模型对于多层衍射光学元件的设计与加工具有重要意义。

关键词 光学器件; 多层衍射光学元件; 红外波段; 衍射效率; 偏心误差

中图分类号 O436; NH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0623004

Effect of Decenter Errors on Diffraction Efficiency of Multilayer Diffractive Optical Elements in Long Infrared Waveband

Gao Long Xue Changxi Yang Hongfang Nie Xin

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Based on the expression of phase delay and the expression of diffraction efficiency of diffractive optical elements (DOEs), the expression of diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements (MLDOEs) is described. The mathematical analysis model of diffraction efficiency for MLDOEs with decenter error is presented, and effects of decenter error on diffraction efficiency and polychromatic integral diffraction efficiency of MLDOEs are analyzed in long infrared waveband of 8~12 μm . ZnS and Ge are selected as the material of first and second harmonic diffractive optical elements respectively for the MLDOEs, the design wavelengths λ_1 and λ_2 are determined with 8.79 μm and 11.11 μm . The micro-structure height of MLDOEs are 78.3391 μm and 34.6076 μm , respectively. Finally, with the period width of MLDOEs 500 μm and 1000 μm , the range values of decenter error must be smaller than 5.8 μm and 11.71 μm when polychromatic integral diffraction efficiency is greater than 95%. The analysis model of diffraction efficiency with decenter error is important to manufacture and design process of MLDOEs.

Key words optical devices; multilayer diffractive optical element; infrared waveband; diffraction efficiency; decenter error

OCIS codes 230.3990; 050.1970; 230.4170

1 引 言

衍射光学元件的高衍射效率、独特的色散性能、灵活的材料选择性和特殊的光学功能等优势,以及红外

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61108044)、吉林省自然科学基金(20150101062JC)

作者简介: 高 龙(1988-),男,硕士研究生,主要从事衍射光学方面的研究。E-mail: gaolong_880305@sina.com

导师简介: 薛常喜(1979-),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事衍射光学与超精密光学加工方面的研究。

E-mail: xcx272479@sina.com(通信联系人)

光学系统在信息获取、真伪识别、反隐身、多目标跟踪等方面具有无法比拟的优势,促使含有衍射光学元件的折衍射混合光学系统在红外成像光学系统中得到了快速应用^[1-3]。然而,传统单层衍射光学元件在工作波长偏离设计波长时,衍射效率急剧下降,影响系统在红外波段的成像性能^[4-8]。近年来出现的由两层谐衍射元件构成的多层衍射光学元件(MLDOEs)克服了这一缺陷,实现了宽波段衍射效率的提高。目前,国内外报道的相关文献中,讨论了多层衍射光学元件的设计理论,其中文献[9-15]讨论了由谐衍射元件构成多层衍射光学元件的设计理论,文献[16,17]讨论了单个多层衍射元件用于红外双波段光学成像系统的设计理论,对于影响多层衍射光学元件成像质量的衍射效率与偏心误差的关系及其偏心误差控制范围未见讨论。衍射效率是评价含有衍射光学元件的折衍射混合光学系统成像性能的重要参数^[18]。现有光学设计软件,如 Zemax, CODE V 等都未给出折衍射混合光学系统中多层衍射光学元件偏心误差对其衍射效率影响的分析。因此,有必要进一步深入分析多层衍射光学元件装配过程中产生的偏心误差对其衍射效率的影响,及其装配过程中偏心误差的控制范围。本文根据衍射光学元件的相位延迟表达式和衍射效率表达式,以及光线斜入射单层衍射光学元件的分析模型,建立了多层衍射光学元件衍射效率与装配过程中偏心误差关系的分析数学模型。同时,以硫化锌和锗为基底材料的多层衍射光学元件为例,给出了在长波红外波段(8~12 μm)内获得所需衍射效率时,所允许的多层衍射光学元件偏心误差范围。

2 多层衍射光学元件设计理论

多层衍射光学元件以两层谐衍射元件构成,中间多以空气为主,如图 1 所示,根据标量衍射理论,浮雕表面的衍射光学元件的衍射效率表达式为^[19]

$$\eta_m^z(\lambda) = \text{sinc}^2[m - \varphi(\lambda)], \quad (1)$$

式中 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$, m 为衍射级次, $\varphi(\lambda)$ 为以波长为单位的相位延迟。

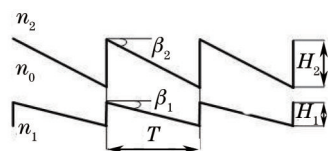


图 1 多层衍射光学元件示意图
Fig.1 Profile of MLDOEs

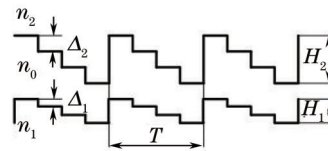


图 2 台阶结构模拟的浮雕表面的衍射光学元件
Fig.2 Profile of relief surface of DOEs simulated by step structure

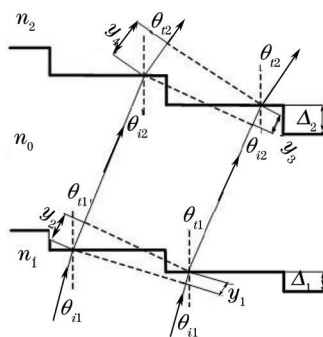


图 3 光线在多层衍射光学元件相邻台阶间的折射
Fig.3 Light rays refract in the neighboring step structure of MLDOEs

根据光线斜入射单层衍射光学元件引起衍射效率变化的分析模型^[20],如图 2 和图 3 所示,首先采用二元台阶结构近似衍射光学元件的微结构,然后再采用台阶数目为无穷多近似连续面型衍射光学元件,即当衍射元件一个周期内的台阶数目为无穷多个时,无穷台阶化衍射光学即为浮雕表面的衍射光学元件,以及结合光线斜入射多层衍射元件衍射效率与入射角度关系的分析模型^[21]。当光线在多层衍射光学元件相邻台阶间传播时,假设中间一层的材料为空气,即 $n_0(\lambda) = 1$,以波长为单位的多层衍射光学元件的相位延迟表达式为

$$\varphi(\lambda) = \frac{H_1}{\lambda} [\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}} - n_1(\lambda) \cos \theta_{i1}] + \frac{H_2}{\lambda} [\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}} - \sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}}], \quad (2)$$

式中 H_1 和 H_2 分别为构成多层衍射光学元件的谐衍射元件的微结构高度, θ_{i1} 为入射角。 $n_1(\lambda)$ 、 $n_2(\lambda)$ 分别

为基底材料在波长 λ 处的折射率。由(2)式可知,对于确定的入射角和基底材料,根据文献[11]优化并得到多层衍射光学元件的微结构高度:

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

式中 λ_1, λ_2 为设计波长, $n_1(\lambda_1), n_2(\lambda_1), n_1(\lambda_2)$ 和 $n_2(\lambda_2)$ 是基底材料在波长为 λ_1, λ_2 时的折射率。

在工作波段内,多层衍射光学元件的多色光积分衍射效率(PIDE)表达式为

$$\bar{\eta}_m(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中 $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ 分别是工作波段内的最小和最大波长, (λ_1, λ_2) 是工作波段内的设计波长对。将(1)、(2)、(3)式代入(4)式可知,当多层衍射光学元件的入射角和基底材料确定后,多色光积分衍射效率的分布取决于设计波长对 (λ_1, λ_2) 。多色光积分衍射效率达到最大值时,可得到一个最优设计波长对 (λ_1, λ_2) ,将该设计波长对代入(3)式得到构成多层衍射光学元件的谐衍射元件的微结构高度值^[15]。

3 多层衍射光学元件偏心误差对其衍射效率的影响

为了进一步分析多层衍射光学元件偏心误差对其衍射效率的影响,根据衍射光学元件相位延迟表达式和衍射效率表达式,以及光线斜入射单层衍射光学元件的分析模型,建立了多层衍射光学元件衍射效率与装配过程中偏心误差关系的分析数学模型。

多层衍射光学元件的两层谐衍射元件的偏心误差是多层衍射元件加工和装配过程中常见的加工误差,如图4(a)所示。假设第二层谐衍射元件相对第一层谐衍射元件发生偏心,虚线和实线分别对应多层衍射元件没有偏心误差的理想情况与存在偏心误差时第二层谐衍射元件的实际位置。以波长为单位,在一个周期内,多层衍射光学元件偏心误差引起的附加相位延迟表达式为

$$\varphi(\lambda)_\Delta = \frac{1}{\lambda} [n_2(\lambda)L_2 - L_1], \quad (5)$$

根据斜入射光线通过多层衍射光学元件的几何关系和折射定律,如图4(b)所示,得

$$\begin{cases} L_1 = \frac{\Delta \sin \beta_2}{\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}}} \\ L_2 = L_1 \left[\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}} \sqrt{1 - \frac{n_2^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}}{n_2^2(\lambda)}} + \frac{n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}}{n_2(\lambda)} \right], \end{cases} \quad (6)$$

式中 Δ 为多层衍射光学元件的偏心误差,将(6)式代入(5)式,则多层衍射光学元件偏心误差引起的附加相位延迟表达式为

$$\varphi(\lambda)_\Delta = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta \sin \beta_2}{\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}}} \left[\sqrt{1 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}} \sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1}} + n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_{i1} - 1 \right], \quad (7)$$

当多层衍射光学元件存在偏心误差时,其总的相位延迟为 $\varphi(\lambda) + \varphi(\lambda)_\Delta$,当光线从第一层谐衍射元件的基底材料垂直入射,即入射光线的入射角 $\theta_{i1} = 0$ 时,有

$$\varphi(\lambda) + \varphi(\lambda)_\Delta = \frac{H_1}{\lambda} [n_1(\lambda) - 1] + \frac{H_2}{\lambda} [n_2(\lambda) - 1] + \frac{\Delta H_2}{\lambda \sqrt{T^2 + H_2^2}} [n_2(\lambda) - 1], \quad (8)$$

则含有偏心误差的多层衍射光学元件的衍射效率表达式为

$$\eta_m(\lambda) = \text{sinc}^2 \left\{ m - \left[\frac{H_1}{\lambda} [n_1(\lambda) - 1] + \frac{H_2}{\lambda} [n_2(\lambda) - 1] + \frac{\Delta H_2}{\lambda \sqrt{T^2 + H_2^2}} [n_2(\lambda) - 1] \right] \right\}, \quad (9)$$

由(9)式可知,多层衍射光学元件的基底材料选定后,其衍射效率与工作波长和偏心误差有关。当多层衍射

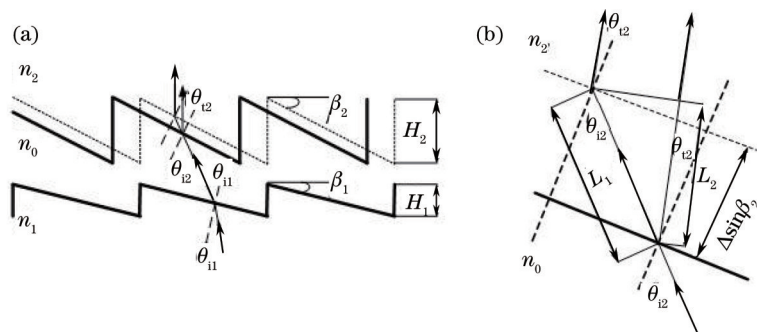


图4 发生偏心误差时光线在多层衍射光学元件间的传播。(a)示意图; (b)光路变化的局部放大图

Fig.4 Light rays refract in MLDOEs with decenter errors. (a) Schematic diagram; (b) partially enlarged view of optical path changing

光学元件的偏心误差 $\Delta = 0$ 时,则(8)式与参考文献[11]中的公式相同。

4 多层衍射元件衍射效率与偏心误差关系的分析和结果

为了进一步说明多层衍射光学元件装配过程中偏心误差对其衍射效率影响,以红外材料硫化锌(ZnS)和锗(Ge)分别作为多层衍射光学元件第一、第二层谐衍射元件的基底材料^[22],在红外波段 8~12 μm 优化的设计波长对为 8.79 μm 和 11.11 μm ,微结构高度 H_1 、 H_2 分别为 78.3391 μm 、34.6076 μm 为例。取周期 T 为 500 μm 和 1000 μm 进行分析并说明多层衍射光学元件的偏心误差对其衍射效率的影响,以及多层衍射光学元件偏心误差所允许的范围。

根据(1)式和(7)式,得到多层衍射光学元件衍射效率与入射波长和偏心误差的关系,如图5所示。

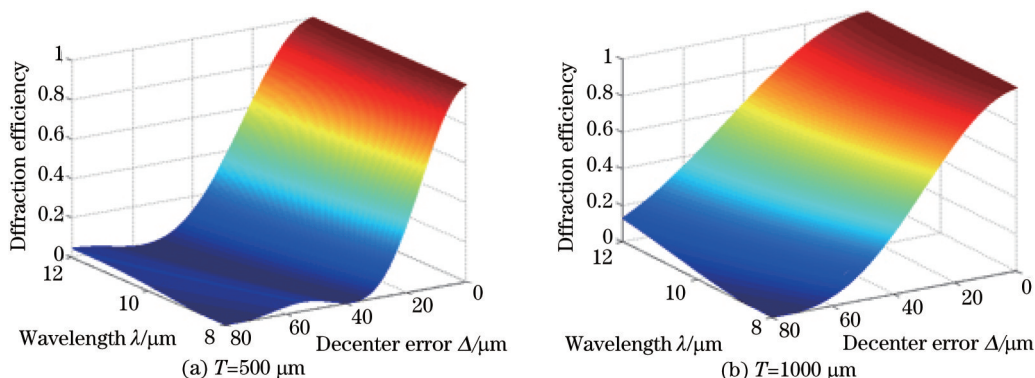


图5 多层衍射光学元件衍射效率与波长和偏心误差的关系

Fig.5 Relationship between diffraction efficiency, wavelength and decenter error of MLDOEs

图5表明,在长波红外波段(8~12 μm)内,存在偏心误差的多层衍射光学元件的衍射效率随其装配过程中的偏心误差增大而减小,相对偏心误差对多层衍射光学元件衍射效率的影响,工作波长的变化对衍射效率变化的影响不大。当多层衍射光学元件的周期从 500 μm 扩大到 1000 μm 之后,其偏心误差逐渐增大时,多层衍射光学元件的衍射效率变化趋于平缓,由此可见偏心误差的允许范围是与环带周期宽度有关,多层衍射光学元件的周期宽度越大,所允许的偏心误差也随之增大。

当多层衍射光学元件要想达到预期的衍射效率时,必须控制多层光学元件的偏心误差和环带周期宽度。但在实际的装配过程中能保证的多层衍射光学元件偏心误差却与实际周期无关,只是将偏心误差控制在一个特定值以内,因此,有必要讨论多层衍射光学元件的衍射效率与偏心误差的关系,多层衍射光学元件在设计波长处的衍射效率与偏心误差的关系,如图6所示。

从图6可以看出在不同的周期下,衍射效率随偏心误差的变化趋势是相同的,都属于在衍射效率曲线两端变化比较平缓,在中间变化比较剧烈。以周期 $T = 500 \mu\text{m}$ 为例,由图6(a)可知,工作波长为 8.79 μm 或者 11.11 μm ,获得 95% 以上的衍射效率时,多层衍射光学元件的偏心误差必须小于 7.54 μm 或者 9.54 μm 。但当多层衍射光学元件的环带周期宽度 $T = 1000 \mu\text{m}$ 时,偏心误差小于 10.52 μm 或者 13.31 μm 即可达到相同

的衍射效率。因此,当多层衍射光学元件的装配无法满足对偏心误差的要求时,光学设计人员有必要适当地调整光学系统中多层衍射光学元件的环带周期宽度以降低偏心误差对光学系统衍射效率的影响。

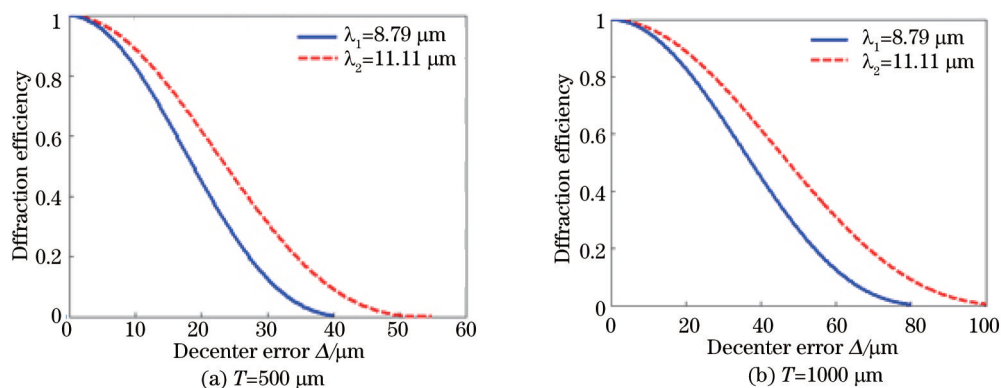


图 6 多层衍射光学元件衍射效率与偏心误差的关系

Fig.6 Relationship between diffraction efficiency and decenter error of MLDOEs

多层衍射光学元件的偏心误差对不同工作波长处的衍射效率的影响也不相同,较短的工作波长处对应的多层衍射光学元件衍射效率对偏心误差的变化亦较敏感。因此,有必要讨论不同周期下多层衍射光学元件多色光积分衍射效率与偏心误差的关系,根据(4)式和(9)式,得到多层衍射光学元件多色光积分衍射效率与其偏心误差的关系,如图 7 所示。以及多层衍射光学元件环带周期宽度为 500 μm 和 1000 μm 时多层衍射光学元件衍射效率和积分衍射效率与偏心误差的最大值,如表 1 所示。

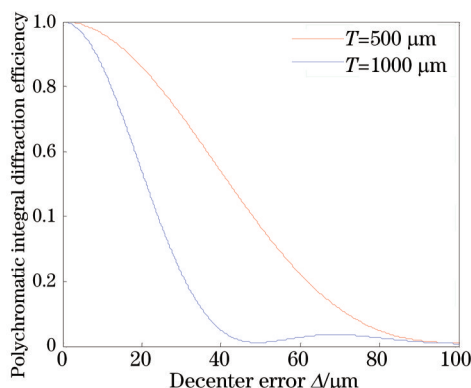


图 7 多层衍射光学元件多色光积分衍射效率与偏心误差的关系

Fig.7 Relationship between PIDE and decenter error of MLDOEs

表 1 多层衍射光学元件周期宽度为 500 μm 和 1000 μm 时衍射效率和积分衍射效率与偏心误差的关系

Table 1 Relationship between diffraction efficiency and PIDE of MLDOEs and decenter error with the period width of 500 μm and 1000 μm

Decenter error /μm	$\eta_i (\lambda = 8.79 \mu\text{m})$			$\eta_i (\lambda = 11.11 \mu\text{m})$			$\bar{\eta}_i (8\sim 12 \mu\text{m})$	
	98%	95%	90%	98%	95%	90%	95%	90%
$T = 500 \mu\text{m}$	3.32	5.28	7.54	4.19	6.67	9.54	5.82	8.43
$T = 1000 \mu\text{m}$	6.63	10.52	15.06	8.37	13.31	19.04	11.71	16.72

由图 7 可以看出多层衍射光学元件的多色光积分衍射效率在 95% 以上时,环带周期宽度为 1000 μm 的多层衍射光学元件的偏心误差必须控制在 11.71 μm 以内。同样,需要获得不同的衍射效率值,由图 7 可以确定出不同的偏心误差范围。同时表 1 列出了环带周期宽度为 500 μm 和 1000 μm 时多层衍射光学元件在设计波长处的衍射效率和设计波段内的积分衍射效率与偏心误差的关系,可以看出多色光积分衍射效率对偏心误差的要求更加严格。

5 结 论

根据标量衍射理论,建立了含有偏心误差的工作于任何波段多层衍射光学元件的衍射效率分析模型,

该模型对含有多层衍射光学元件的折衍射混合光学系统的设计,加工和装配可以提供具体的指导,使得设计人员在初始设计的时候即考虑到装配误差对折衍射混合系统成像性能的影响。文中以实例给出了红外长波多层衍射光学元件的偏心误差对其衍射效率的影响及其所允许的偏心误差范围。该分析方法和结论对促进多层衍射元件在光学工程领域的快速应用具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Wu Zongfan, Liu Meilin, Zhang Shaoju, *et al.*. Infrared and Shimmer Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998, 286-300.
吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 286-300.
- 2 Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou, *et al.*. Design of infrared dual band system to correct thermal difference with HDOE[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 557-561.
孙 强, 王肇圻, 李凤有, 等. 含有谐衍射元件的红外双波段减热差系统设计. 科学通报, 2003, 48(6): 557-561.
- 3 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.
- 4 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
胡中华, 杨宝喜, 朱 菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 5 Nie Shuzhen, Yu Jin, Fan Zhongwei, *et al.*. Research on laser beam shaping technology using diffractive optics[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s105001.
聂树真, 余 锦, 樊仲维, 等. 衍射光学用于激光光束整形技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s105001.
- 6 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.
- 7 Zhao Liping, Wu Minxian, Jin Guofan. Spherochromatism correction of a hybrid refraction-diffractive singlet[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18 (5): 621-626.
赵丽萍, 邬敏贤, 金国藩. 折衍射混合单透镜的色球差校正研究[J]. 光学学报, 1998, 18(5): 621-626.
- 8 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.
- 9 T Nakai, H Ogawa. Research on multi-layer diffractive optical elements and their application to camera lenses[C]. OSA Tech Dig of DOMO Conf. Rochester, 2002.
- 10 A P Wood, P J Rogers. Diffractive optics in modern optical engineering[C]. SPIE, 2005, 5865, 58650B.
- 11 Y Arieli, S Ozeri, N Eisenberg, *et al.*. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth[J]. Opt Lett 1998, 23(11): 823-824.
- 12 Kleemann, B H Seesselberg M, Rupff J. Design concepts for broadband high-efficiency DOEs[J]. Journal of the European Optical Society - Rapid publications, 2008, 3: 08015.
- 13 Bai Jian, Ma Tao, Shen Yibing, *et al.*. Characteristic analysis of multilayer diffractive elements[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s): 44-47.
白 剑, 马 韬, 沈亦兵, 等. 多层衍射光学元件的特性分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s): 44-47.
- 14 Ma Tao, Shen Yibing, Yang Guoguang. Improving diffraction efficiency of DOE in wide waveband application by multilayer micro-structure[C]. The 2006 National Photoelectricity Technology Conference, Chengdu: Chinese Society of Astronautics, 2006: 233-239.
马 韬, 沈亦兵, 杨国光. 利用多层表面微结构提高 DOE 宽波段衍射效率[C]. 2006 年全国光电技术学术交流会会议论文集: F 集, 成都: 中国宇航学会, 2006: 233-239.
- 15 Changxi Xue, Qingfeng Cui. Design of multilayer diffractive optical elements with polychromatic integral diffraction efficiency[J]. Opt lett. 2010, 35(7): 986-988.
- 16 Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao. The design of infrared dual-band at double-layer harmonic diffractive hermalized optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1266-1270.

- 范长江, 王肇圻, 吴环宝, 等. 红外双波段双层衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1266-1270.
- 17 Changxi Xue, Qingfeng Cui, Tao Liu, *et al.*. Optimal design of a multilayer diffractive optical element for dual wavebands[J]. Opt Lett, 2010, 35(24): 4157-4159.
- 18 D A Buralli, G M Morris. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. App Opt, 1992, 31(22): 4389-4396.
- 19 Xue Changxi. Studies on imaging characteristics of multilayer diffractive optical elements [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- 薛常喜. 多层衍射光学元件成像特性的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- 20 Swanson G J. Binary Optics Technology: Theoretical Limits on The Diffraction Efficiency of Multilevel Diffractive Optical Elements[R]. MIT Lincoln Laboratory Technical Report, 1991: 914.
- 21 Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai. Effect of incident angle on diffraction efficiency of a two-tayen 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 .
- 22 Wolfe W L. Handbook of Optics, Third Edition Volume IV[M]. New York: McGraw-Hill, 2001, 223-224.

栏目编辑: 韩 峰