

文章编号: 0253-2239(2010)10-3016-05

基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计

薛常喜 崔庆丰 潘春艳 佟静波

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 以衍射光学元件(DOE)相位延迟表达式为基础,研究并给出了多层衍射光学元件(MLDOE)的带宽积分平均衍射效率(BIADE)与相应设计波长关系的表达式。在 MLDOE 的基底材料确定后,由所给出的表达式可以得到最大 BIADE 及相应的设计波长,由此可以实现 MLDOE 的 BIADE 最大化、精确化设计。在 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 可见光波段,以聚甲基丙烯酸酯和聚碳酸酯为基底材料,通过优化得到最大 BIADE 为 99.3%,相应的设计波长为 $0.435\ \mu\text{m}$ 和 $0.598\ \mu\text{m}$,各层谐衍射元件(HDE)的微结构高度分别为 $16.460\ \mu\text{m}$ 和 $12.813\ \mu\text{m}$,所得到的 BIADE 比以 $0.4\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \mu\text{m}$ 为设计波长时高 4%。

关键词 衍射光学;多层衍射光学元件;衍射效率;带宽积分平均衍射效率

中图分类号 O436; TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.3016

Design of Multi-Layer Diffractive Optical Element with Bandwidth Integral Average Diffraction Efficiency

Xue Changxi Cui Qingfeng Pan Chunyan Tong Jingbo

(Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The relation between bandwidth integrated average diffraction efficiency (BIADE) of multi-layer diffractive optical elements (MLDOE) and corresponding phase retardation expression is discussed, and the maximum BIADE and the corresponding design wavelengths are determined when the optical materials are selected, then the design of the BIADE of the MLDOE is realized exactly and maximumly. Based on the principle, to design a MLDOE with (PMMA) and polycarbonate as materials respectively, the maximum BIADE is 99.3% in visible waveband ($0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$), the corresponding design wavelengths are $0.435\ \mu\text{m}$ and $0.598\ \mu\text{m}$, the heights of harmonic diffractive element (HDE) are $16.460\ \mu\text{m}$ and $12.813\ \mu\text{m}$ respectively, and the BIADE of the MLDOE designed with this method is 3.9% higher than that with the former method in which design wavelengths are $0.4\ \mu\text{m}$ and $0.7\ \mu\text{m}$.

Key words diffractive optics; multi-layer diffractive optical element (MLDOE); diffraction efficiency; bandwidth integral average diffraction efficiency (BIADE)

1 引 言

在折衍混合光学系统设计过程中,通常采用衍射光学元件(DOE)的带宽积分平均衍射效率与光学系统光学传递函数乘积的方法对折衍混合系统成像质量进行评价^[1]。当入射波长偏离中心波长后,

单层衍射元件的衍射效率急剧下降,成像质量受到影响,因此单层衍射光学元件只能用于有限波带宽度的光学系统^[2~7]。近些年,出现的多层衍射光学元件(MLDOE)克服了这一缺点,实现了宽波段衍射效率的提高^[8~10]。目前,国内外报道的相关

收稿日期: 2009-11-16; 收到修改稿日期: 2010-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(60878030)资助课题。

作者简介: 薛常喜(1979—),男,博士研究生,主要从事衍射光学及光学设计等方面的研究。

E-mail: xcx272479@sina.com

导师简介: 崔庆丰(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事衍射光学及光学设计等方面的研究。

E-mail: cuiqf@yahoo.com.cn

MLDOE 设计的文献中,大多分析了多层衍射光学元件的设计原理^[8~12],但是对于设计波长的选择如何影响带宽积分平均衍射效率未见讨论,因此,有必要对 MLDOE 设计波长的选择与带宽积分平均衍射效率的关系进行深入讨论,实现 MLDOE 的带宽积分平均衍射效率最大化,使带宽积分平均衍射效率对光学传递函数影响降至最小,以保证折衍混合光学系统的最优化设计。

本文根据衍射光学元件的相位延迟表达式,对 MLDOE 的设计原理进行分析。采用不同设计波长对 MLDOE 进行设计,得到了带宽积分平均衍射效率与相应设计波长的关系,使 MLDOE 的最大带宽积分平均衍射效率与设计波长建立联系,快速实现对 MLDOE 的带宽积分平均衍射效率的最大化,以及相关参数的优化设计。本文以聚甲基丙烯酸酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)为基底材料,采用带宽积分平均衍射效率最大化方法对 MLDOE 进行设计,得到的分析结果进一步突显了采用带宽积分平均衍射效率最大化方法设计 MLDOE 的优势。

2 MLDOE 的带宽积分平均衍射效率

D. Faklis 等^[13,14]讨论了谐衍射元件的工作原理,可知 MLDOE 主要是由多个不同光学材料构成的谐衍射元件(HDE)组成^[8~12,15],如图 1 所示。在 MLDOE 设计过程中,通常把第 m 衍射级次的衍射能量 E_m 与入射光的总能量 E_i 之比定义为第 m 衍射级次的衍射效率,即

$$\eta_m = E_m/E_i. \quad (1)$$

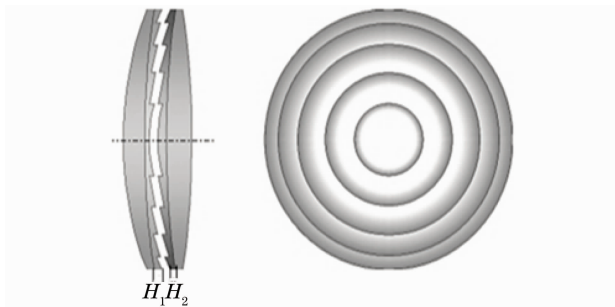


图 1 MLDOE 结构

Fig. 1 Profile of multi-layer DOE

在衍射效率分析过程中,不考虑材料的吸收、反射和散射损失。

MLDOE 的相位延迟与单层衍射光学元件的相似,其相位延迟表达式为

$$\varphi(\lambda_j) = \sum_{x=1}^N k_j [n_x(\lambda_j) - n'_x(\lambda_j)] H_x, \quad (2)$$

式中 k_j 是波长为 λ_j 时的波数, $k_j = 2\pi/\lambda_j$, $n_x(\lambda_j)$ 为 MLDOE 中第 x 层谐衍射元件的材料在波长为 λ_j 时的折射率, $n'_x(\lambda_j)$ 为与第 x 层谐衍射元件密切接触的不同介质在波长为 λ_j 时的折射率, H_x 为第 x 层谐衍射元件的表面微结构高度, N 表示 MLDOE 是由 N 层谐衍射元件组成。

在 MLDOE 设计过程中,为了获得第 m 衍射级次的衍射效率为 100%,则各层谐衍射元件的表面微结构高度必须满足 MLDOE 的相位延迟在设计波长 $(\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N)$ 处为 2π 的整数倍。当 MLDOE 的各层谐衍射元件的组成材料选定后,设计波长 $(\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N)$ 对应的(2)式组成一个 N 元一次方程组

$$\begin{cases} \sum_{x=1}^N k_1 [n_x(\lambda_1) - n'_x(\lambda_1)] H_x = m2\pi, \\ \dots \\ \sum_{x=1}^N k_j [n_x(\lambda_j) - n'_x(\lambda_j)] H_x = m2\pi, \\ \dots \\ \sum_{x=1}^N k_N [n_x(\lambda_N) - n'_x(\lambda_N)] H_x = m2\pi. \end{cases} \quad (3)$$

折衍混合光学系统设计过程中,通常取衍射光学元件的衍射级次 $m=1$,通过求解(3)式,得到方程组的 N 个解,分别对应 N 层谐衍射元件的表面微结构高度。

则 MLDOE 的第 m 衍射级次的衍射效率为

$$\eta_m(\lambda) = \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda} \right], \quad (4)$$

式中光程差 $\Delta(\lambda) = \sum_{x=1}^N [n_x(\lambda) - n'_x(\lambda)] H_x$, $\text{sinc } x = \sin \pi x / \pi x$ 。

当 MLDOE 的设计波长 $(\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N)$ 为工作波段内不同值时,即 $\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N$ 分别取不同的设计波长,通过解(3)式,得到 MLDOE 中的各层谐衍射元件的表面微结构高度 $H_1, \dots, H_x, \dots, H_N$,同时得到该组设计波长对应的 MLDOE 的第 m 衍射级次的唯一的带宽积分平均衍射效率值,即第 m 衍射级次在设计波长为 $(\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N)$ 时的带宽积分平均衍射效率 $\bar{\eta}_{m \text{ int}}(\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N)$ 为

$$\bar{\eta}_{m \text{ int}}(\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda} \right] d\lambda, \quad (5)$$

式中 λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别表示工作波段的最小波长和最

大波长。由(5)式可知,MLDOE的带宽积分平均衍射效率是在确定各层谐衍射元件的材料后,通过选定设计波长 $(\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_N)$,依据(3)式,计算得出MLDOE中的各层谐衍射元件的表面微结构高度,同时得到在特定波带宽度的带宽积分平均衍射效率值,而MLDOE的微结构高度只是一个过渡值,因此MLDOE的设计波长与带宽积分平均衍射效率值是对应的关系。

3 带宽积分平均衍射效率最大化方法设计 MLDOE

在含有MLDOE的折衍混合光学系统设计过程中,由于MLDOE的带宽积分平均衍射效率对光学系统的光学传递函数具有一定影响,因此有必要对折衍混合光学系统中的MLDOE进行优化设计,使其带宽积分平均衍射效率对光学系统的光学传递函数影响降至最小,即MLDOE的带宽积分平均衍射效率为最大值。

根据MLDOE的带宽积分平均衍射效率与设计波长的一一对应关系,得到MLDOE的最大带宽积分平均衍射效率对应一组确定的设计波长 $(\lambda_1^{(a)}, \dots,$

$\lambda_j^{(a)}, \dots, \lambda_N^{(a)})$,把这组设计波长代入(3)式,得到MLDOE中的各层谐衍射元件的表面微结构高度。因此,寻找实现MLDOE的带宽积分平均衍射效率最大时的一组设计波长,是实现MLDOE优化设计的关键。

在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 可见光波段,以PMMA和PC为基底材料,设计了一个MLDOE,其中MLDOE的衍射级次 $m=1$,PMMA为第1层谐衍射元件的基底材料,PC为第2层谐衍射元件的基底材料。随着不同设计波长 λ_1, λ_2 在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 可见光波段的变化,MLDOE中的各层谐衍射元件的高度值也随之变化,如图2所示,水平坐标 x, y 分别表示设计波长 λ_1, λ_2 ,竖直坐标 z 为相应的各层谐衍射元件表面微结构的高度值以及相应的MLDOE的第 $m=1$ 衍射级次的带宽积分平均衍射效率如图3所示。当其中第1个设计波长为定值时,可以得到第2个设计波长变化时对应的所有带宽积分平均衍射效率中的最大值,如图4所示,即第1个设计波长沿横轴变化,得到的第1个设计波长不同值对应的带宽积分平均衍射效率最大值分布。

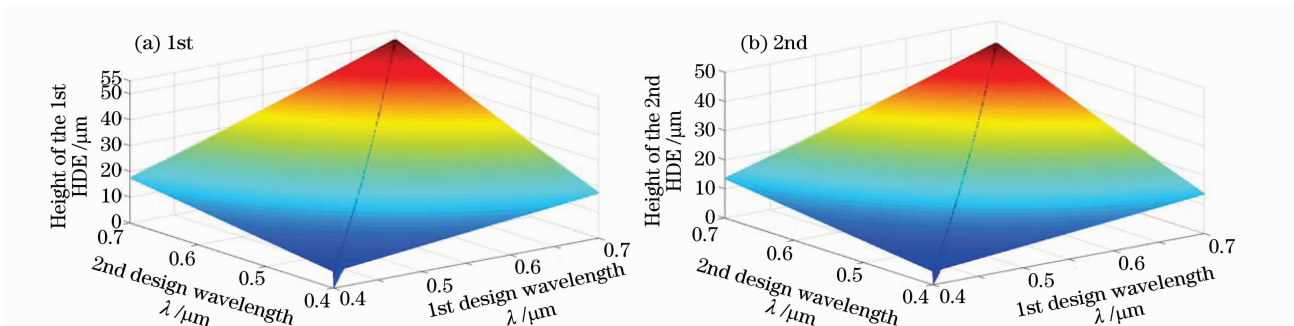


图2 各层谐衍射元件高度与设计波长的关系

Fig. 2 Height of HDE versus design wavelengths

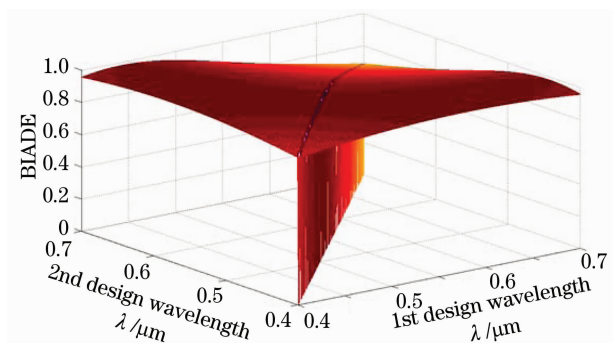


图3 MLDOE的带宽积分平均衍射效率与设计波长的关系

Fig. 3 BIADE of MLDOE versus design wavelengths

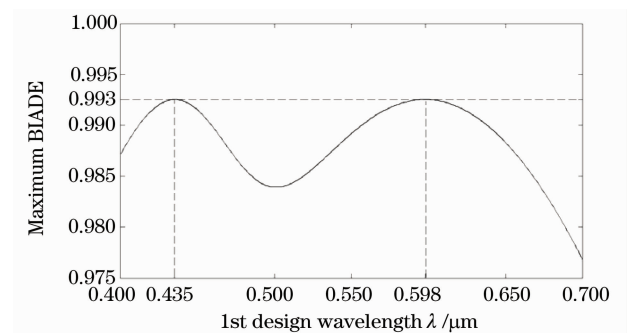


图4 MLDOE的最大带宽积分平均衍射效率与一个设计波长的关系

Fig. 4 Maximum BIADE of MLDOE versus one design wavelength

由图 2 可知,随着 MLDOE 设计波长的变化,各层谐衍射元件的表面微结构高度也随着变化;同时由图 3 可知,MLDOE 的带宽积分平均衍射效率也随着变化;由图 4 可知,当 MLDOE 的材料确定后,最大带宽积分平均衍射效率也随之确定,同时 MLDOE 的设计波长也随之确定,则该 MLDOE 的最大带宽积分平均衍射效率为 99.3%,以及相应的设计波长为 435 nm 和 598 nm。以 PMMA 和 PC 组合的 MLDOE 在不同设计波长时,依据(3)式和(5)式,对相应的带宽积分平均衍射效率和各层谐衍射元件的表面微结构高度进行计算,结果如表 1 所示。3 组不同设计波长的 MLDOE 的衍射效率如图 5 所示。

表 1 不同设计波长的 MLDOE 的带宽积分平均衍射效率和微结构高度

Table 1 BIAD and heights of MLDOE with different design wavelengths

	Design wavelengths λ_1, λ_2 /nm		
	435 and 598	400 and 700	486 and 656
BIAD /%	99.3	95.3	96.8
Height of the 1st HDE / μm	16.460	17.372	24.171
Height of the 2nd HDE / μm	12.813	13.476	19.261

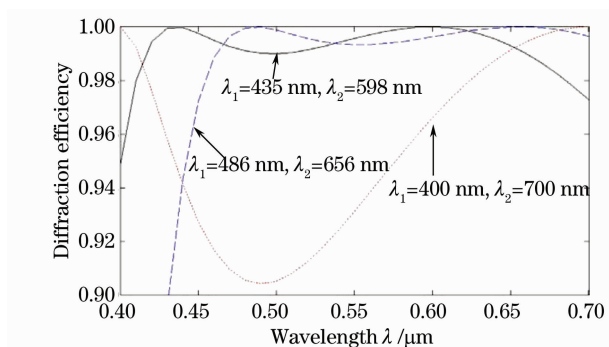


图 5 不同设计波长的 MLDOE 的衍射效率分布

Fig. 5 Diffraction efficiency of MLDOE versus different pairs of design wavelengths

图 5 中虚线、点划线和实线分别是以 400 nm 和 700 nm, 486 nm 和 656 nm 以及 435 nm 和 598 nm 为设计波长的 MLDOE 的第 $m=1$ 级衍射效率。由表 1 可知,MLDOE 在设计波长为 435 nm 和 598 nm 时,第 $m=1$ 衍射级次的带宽积分平均衍射效率最大,比以 400 nm 和 700 nm 为设计波长的带宽积分平均衍射效率高 4%,并且对应的各层谐衍射元件的表面微结构高度比以波段两端,和以 F, C 谱线为设计波长的各层谐衍射元件的表面微结构高

度都小;同时由图 5 可知,当以 435 nm 和 598 nm 为设计波长,在 0.4~0.7 μm 波段,衍射效率都高于 95% 以上,优于其它两组设计波长对应的衍射效率。

因此,通过对 MLDOE 的最大带宽积分平均衍射效率进行优化,由最大带宽积分平均衍射效率确定出 MLDOE 的设计波长,由设计波长计算得出 MLDOE 的各层谐衍射元件的表面微结构高度,实现 MLDOE 的带宽积分平均衍射效率最大化设计,对光学系统的成像质量影响最小。

4 结 论

利用衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率的表达式,研究并得到 MLDOE 的带宽积分平均衍射效率与设计波长之间的关系,对 MLDOE 的带宽积分平均衍射效率最大化,以及定量化设计具有重要的指导意义。通过以 PMMA 与 PC 组合的 MLDOE 为例,实现了在两个设计波长为 435 nm 和 598 nm 的带宽积分平均衍射效率最大,对折衍混合光学系统的传递函数影响降至最小,同时对应的各层谐衍射元件的表面微结构高度比以波段两端,或以 F 和 C 谱线为设计波长的各层谐衍射元件的表面微结构高度都小,突显了带宽积分平均衍射效率最大化方法在 MLDOE 设计过程中对于设计波长的选择方面具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- Dale A. Buralli, G. Michael Morris. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4389~4396
- Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai. 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
- Leng Jiakai, Cui Qingfeng, Pei Xuedan *et al.*. Spherochromatism of hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 981~987
冷家开, 崔庆丰, 裴雪丹等. 折衍射混合复消色差望远镜中的色球差[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 981~987
- Cui Qingfeng. Research on Hybrid Diffractive-Refractive Optical System [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 1996
崔庆丰. 折衍射混合光学系统的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 1996
- Liu Qiang, Wu Rong, Zhang Xiaobo *et al.*. Technical optimization of multi-level diffractive optical elements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1165~1168
刘 强, 邬 融, 张晓波等. 多台阶衍射光学元件的工艺优化 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1165~1168
- Liu Qi, Liu Liping, Yuan Pusheng. Design of hybrid refractive-diffractive optical system of infrared laser scanning testing

- equipment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 263~267
刘琦, 刘丽萍, 原蒲升. 折-衍混合红外激光扫描检测设备的
光学系统设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 263~267
- 7 Bin Tang, Yi Jin, Meiping Jiang *et al.*. Diffraction properties of
four-petal Gaussian beams in uniaxially anisotropic crystal[J].
Chin. Opt. Lett., 2008, **6**(10): 779~781
- 8 T. Nakai, H. Ogawa. Study of multi-layer diffractive optical
elements and method of application to optical lens system[J]. *J.
Society of Photographic Science and Technology of Japan*,
2002, **65**(3): 180~185
中井武彦, 小川秀树. 多层衍射光学元件的研究和使用方法[J].
日本写真学会志, 2002, **65**(3): 180~185
- 9 Andrew Wood, Mane-Si Laure Lee, Simone Cassette. Infrared
hybrid optics with high broadband efficiency[C]. *SPIE*, 2005,
5874: 58740G
- 10 Bai Jian, Ma Tao, Shen Yibing *et al.*. Characteristic analysis of
multi-layer diffractive elements [J]. *Infrared and Laser
Engineering*, 2006, **35**(suppl): 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**(suppl): 44~47
- 11 Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao *et al.*. The design
of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical
system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1266~1270
范长江, 王肇圻, 吴环宝等. 红外双波段双层谐波衍射光学系统设
计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1266~1270
- 12 Dong Hui, Cui Qingfeng, Pei Xuedan *et al.*. Imaging
characteristics of multi-layer diffractive optical elements[J]. *Acta
Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 694~698
董辉, 崔庆丰, 裴雪丹等. MLDOE 成像特性的研究[J]. *光子
学报*, 2009, **38**(3): 694~698
- 13 D. Faklis, G. M. Morris. Spectral properties of multi-order
diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2462~2468
- 14 D. W. Sweeney, G. E. Sommargren. Harmonic diffractive
lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2469~2473
- 15 Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai *et al.*. Design and
diffraction efficiency of a multi-layer diffractive optical element
[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1126~1131
裴雪丹, 崔庆丰, 冷家开等. MLDOE 设计原理与衍射效率的研
究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1126~1131