

# 宽光谱大视场角的高衍射效率多层衍射元件

范长江 赵亚辉 应朝福 吴浩伟

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321001)

**摘要** 提出一种新颖的多层衍射元件(MLDOE),由具有不同折射率和色散性质的光学材料构成,第一层和最后一层为高折射率低色散和低折射率高色散光学材料的组合,中间填充层为阿贝数较小的光学塑料。此 MLDOE 在最大光束全视场角为  $110^\circ$  情况下,设计波段内的各个波长的衍射效率高达 90% 以上,可有效提高折-衍混合光学系统的能量利用率,提高成像质量。

**关键词** 光学设计;衍射光学;多层衍射光学元件;衍射效率

**中图分类号** TN223 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0516001

## Multilayer Diffraction Element with Wide Field of View and High Diffractive Efficiency

Fan Changjiang Zhao Yahui Ying Chaofu Wu Haowei

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321001, China)

**Abstract** A novel multilayer diffractive optical element (MLDOE) composed with different optical materials is investigated and the materials combination principle is discussed. The results show that the first layer, the last layer and the middle layer should be high refractive index and low dispersion optical material, low refractive index and high dispersion optical material, and smaller Abbe number optical material, respectively. The diffractive efficiency of the MLDOE at each wavelength in designed band is larger than 90% and the full angle of view can reach  $110^\circ$ , which can effectively improve energy utilization ratio and image quality of the hybrid refractive-diffractive optical system.

**Key words** optical design; diffractive optics; multilayer diffractive optical element; diffractive efficiency

**OCIS codes** 220.3620; 050.1965; 050.1970

## 1 引言

衍射相位元件具有大的负色散系数,在光学系统中代替负透镜,可以使光学系统达到轻小化,相关的应用及其设计在文献中已有广泛的研究<sup>[1~9]</sup>。但单层衍射元件(DOE)的衍射效率只有在设计波长才能达到 100%,随着波长逐渐偏离设计波长,衍射效率迅速下降,致使光能利用率低,仅适用于窄光谱波段内。文献[10]中提到的由两种材料构成的双层 DOE,通过改变微结构界面高度分布以及使用具有不同色散材料的组合,增加控制衍射效率的参量,使得各个波长的入射光通过此元件时的相位调制与设计波长的相位调制差别不大,从而使各个波长的光大部分能量能够衍射到设计级次上,获得宽光谱波

段内的高衍射效率;文献[11]将双层 DOE 应用在红外双波段成像中,设计了一个反摄远型的折-衍混合物镜系统,实现了红外双波段探测系统的高能量利用率;文献[12]研究了双层 DOE 基底材料的选择,如要在宽光谱波段内获得高衍射效率,两层基底材料必须是高折射率低色散和低折射率高色散的组合;文献[13]研究了双层 DOE 在整个设计光谱范围内的衍射积分效率,扩展了 DOE 在光学系统中的应用范围;文献[14]研究了光束斜入射对双层衍射效率的影响,研究表明,双层 DOE 不能在大入射角情况下依旧保持高的衍射效率。目前有关多层衍射的文献,尚未解决光束大入射角情况下衍射效率下降的难题。为此,本文提出了由 3 种材料组成的

**收稿日期**: 2011-12-19; **收到修改稿日期**: 2012-02-13

**基金项目**: 浙江省自然科学基金(Y1100524)、浙江师范大学创新团队和浙江师范大学博士启动基金(ZC304009168)资助课题。

**作者简介**: 范长江(1974—),男,博士,主要从事衍射光学、光学设计等方面的研究。E-mail: fancj@zjnu.cn

多层衍射元件 (MLDOE), 能在宽光谱波段和大视场角度情况下, 均具有高的衍射效率, 并指出了 MLDOE 基底材料的选择原则, 进一步扩展了 DOE 在光学系统中的应用范围。

## 2 衍射效率理论分析

### 2.1 双层 DOE 的衍射效率

双层 DOE 的结构如图 1 所示, 由具有不同色散和折射率材料构成的两个单层 DOE 底部对底部、顶部对顶部结合在一起, 中间为空气层构成。图 2 是双层 DOE 元件在入射波长为  $0.55 \mu\text{m}$  时, 衍射效率随着入射角度的变化图。由图 2 可以看到, 当入射角度小于  $17.4^\circ$  时衍射效率保持在  $90\%$  以上, 随着入射角度的增大, 衍射效率迅速下降, 当入射角度达到  $22.5^\circ$  时, 衍射效率开始降低到  $70\%$  以下, 在其他入射波长, 均有类似变化。这表明, 双层 DOE 已不能满足光学系统宽光谱范围、大视场角的成像要求。为克服此难题, 在双层衍射光学元件的基础上, 将中间的空气层填充其他的介质材料, 构成的多

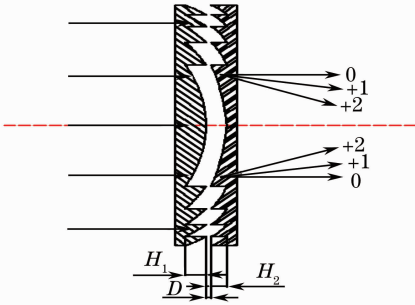


图 1 双层 DOE 结构示意图

Fig. 1 Structure of the double-layer DOE

层衍射光学元件便能满足光学系统宽光谱范围、大视场角的成像要求。

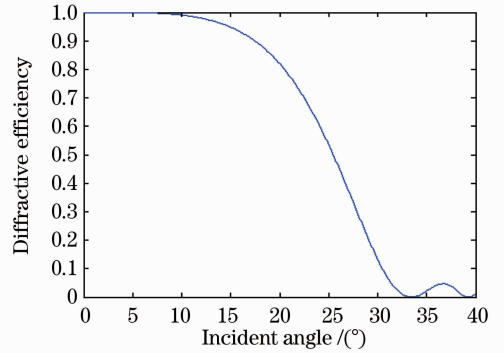


图 2 双层 DOE 衍射效率与入射角度的关系

Fig. 2 Diffractive efficiency of double-layer DOE versus incident angle

### 2.2 MLDOE 的衍射效率

#### 2.2.1 光束正入射时的衍射效率

MLDOE 是将双层 DOE 微结构的中间空气层用其他具有色散性质的材料代替, 使得衍射效率的控制参数增加, 从而达到宽光谱大入射角情况下的高衍射效率。根据标量衍射理论, 光束正入射时相位分布函数为

$$\varphi(\lambda_i) = k_i [n_m(\lambda) - n_1(\lambda_i)] H_1 + k_i [n_2(\lambda_i) - n_m(\lambda)] H_2 = M \cdot 2\pi, \quad (1)$$

式中  $M$  为衍射级次, 通常取一级,  $n_1(\lambda_i)$ 、 $n_m(\lambda_i)$ 、 $n_2(\lambda_i)$  分别为第一层、中间填充层和第三层光学材料的折射率,  $k_i$  为波数,  $H_1$ 、 $H_2$  为两层基底材料的微结构高度, 正负表示每层元件的光焦距的正负。 $M$  取一级衍射, 确定组成器件的光学材料后, 取两个设计波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ , 代入(1)式组成方程组:

$$\begin{cases} k_1 [n_m(\lambda_1) - n_1(\lambda_1)] H_1 + k_1 [n_2(\lambda_1) - n_m(\lambda_1)] H_2 = 2\pi \\ k_2 [n_m(\lambda_2) - n_1(\lambda_2)] H_1 + k_2 [n_2(\lambda_2) - n_m(\lambda_2)] H_2 = 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

可得  $H_1$  和  $H_2$ , 此时衍射效率为

$$\eta(\lambda) = \text{sinc}^2 \left\{ M - \frac{[n_m(\lambda) - n_1(\lambda)] H_1 + [n_2(\lambda) - n_m(\lambda)] H_2}{\lambda} \right\}. \quad (3)$$

#### 2.2.2 光束斜入射时的衍射效率

当光束斜入射进入 MLDOE 时, 由文献[14]可进一步推导得到经过 MLDOE 产生的相位差为

$$\varphi'(\lambda) = \frac{H_1 [\sqrt{n_m^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - n_1 \cos \theta_1] + H_2 [\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - \sqrt{n_m^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1}]}{\lambda}, \quad (4)$$

式中  $\theta_1$  为光束入射到二元光学元件表面上的入射角。光束正入射情况下由方程组(2)可解得  $H_1$  和  $H_2$ , 此时光束斜入射时的衍射效率为

$$\eta'(\lambda) = \text{sinc}^2 \left\{ M - \frac{H_1 [\sqrt{n_m^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - n_1 \cos \theta_1] + H_2 [\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - \sqrt{n_m^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1}]}{\lambda} \right\}. \quad (5)$$

### 3 衍射效率的应用

如三层 DOE 中第一层材料为 FCD1, 第二层材料为 FD6, 中间填充光学塑料 Polycarb, 将 g 谱线和 d 谱线波长分别代入(1)式可得  $H_1 = 5.917 \mu\text{m}$ ,  $H_2 = 9.833 \mu\text{m}$ 。将  $H_1$  和  $H_2$  的值代入(5)式, 得到此三层 DOE 衍射效率随波长和入射角变化的关系, 如图 3 所示。由图 3 可知, 当波长从  $0.4 \mu\text{m}$  增大到  $0.7 \mu\text{m}$  时, 在一定的入射角范围内(即电子版彩图中红色区域), 三层 DOE 的衍射效率保持在较高水平, 当入射角超过一定的角度时, 衍射效率迅速

下降; 由俯视图可以看到, 在短波段  $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ , 衍射效率随着入射角的增大变化比较大, 当入射波长大于  $0.5 \mu\text{m}$  以后, 保持高衍射效率的入射角基本保持在  $50^\circ \sim 60^\circ$  之间。当构成 MLDOE 的材料和入射角度确定后, 有可能在需要的设计波段不能使衍射效率达到  $90\%$  以上, 可在不改变光束通过 MLDOE 的相位变化前提下, 微调微结构的高度<sup>[12]</sup>; 或者在不影响成像质量的前提下, 适当调整成像的光谱范围<sup>[15]</sup>, 使得 MLDOE 在整个设计波段的衍射效率均能达到  $90\%$  以上。

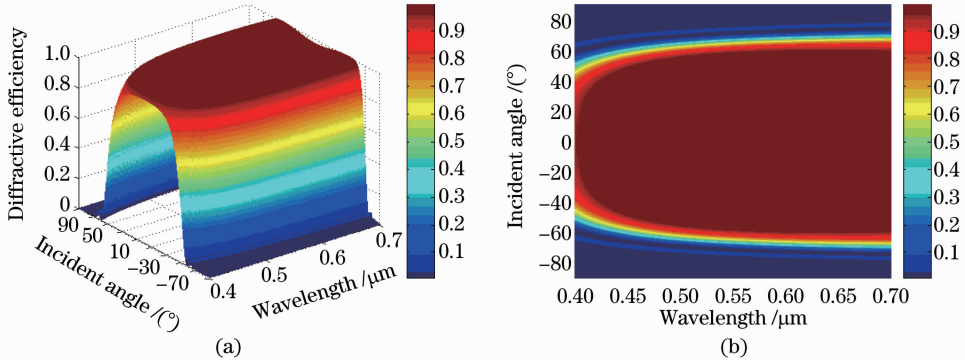


图 3 MLDOE 衍射效率与波长、入射角度的关系。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 3 Diffraction efficiency of MLDOE versus wavelength and incident angle. (a) Side view; (b) vertical view

图 4 为设计波段内不同波长下入射角度变化对衍射效率的影响, 分别给出了入射波长为  $0.40$ 、 $0.45$ 、 $0.50$ 、 $0.55$ 、 $0.60$ 、 $0.65$ 、 $0.70 \mu\text{m}$  时的入射角和衍射效率的关系。设计波长为  $0.40 \mu\text{m}$  时, 在入射角小于  $29.7^\circ$  的范围内, 衍射效率可以保持在  $90\%$  以上, 当入射波长大于  $0.45 \mu\text{m}$  后, 保持  $90\%$  衍射效率所对应的入射角大于  $51.6^\circ$ , 此时的入射角度能够满足大多数光学系统对视场角的要求。不同入射波长对应衍射效率保持在  $90\%$  以上的最大入射角度如表 1 所示。

表 1 不同入射波长下衍射效率为  $90\%$  时的入射角  
Table 1 Incident angles at different wavelengths when the diffraction efficiency exceed  $90\%$

Wavelength / $\mu\text{m}$	Incident angle / ( $^\circ$ )
0.40	29.7
0.45	51.5
0.50	57.4
0.55	60.1
0.60	61.4
0.65	61.9
0.70	61.7

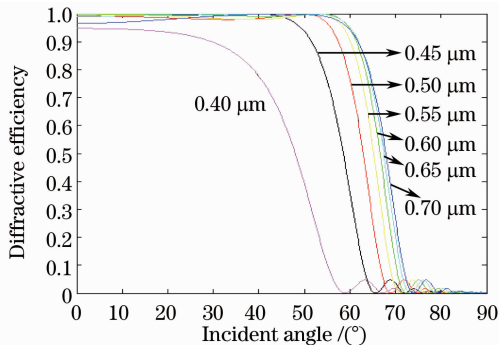


图 4 MLDOE 衍射效率与入射角度的关系

Fig. 4 Diffraction efficiency of MLDOE versus incident angle

为进一步得到 MLDOE 中间材料的选择规律, 依据文献[12]将构成 MLDOE 的两边基底材料组合分别选择为 FCD1 ( $n_d = 1.4970, v_d = 81.6084$ ) 和 FD6 ( $n_d = 1.8052, v_d = 25.4652$ ), FK2 ( $n_d = 1.4866, v_d = 84.4676$ ) 和 ZF6 ( $n_d = 1.7552, v_d = 27.5302$ ) 以及 LAF4 ( $n_d = 1.7495, v_d = 34.9900$ ) 和 FK1 ( $n_d = 1.4861, v_d = 81.8177$ ), 中间填充材料为目前可得到的各种光学塑料, 其中  $n_d$  和  $v_d$  分别为基底材料的折射率和阿贝数。以 FCD1 和 FD6、LAF4 和 FK1 组合为例, 表 2 为在设计波段  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$  MLDOE 的衍射效率达到  $90\%$  以上时最大入射角数值。

表 2 不同填充材料时,衍射效率为 90%对应的入射角  
Table 2 Incident angles versus different filler materials  
when the diffractive efficiency exceed 90%

First layer is FCD1, last layer is FD6			
Filler	$n_d$	$v_d$	Incident angle / (°)
PC	1.5855	29.9092	61.1
PS	1.5905	30.8669	55.6
SAN	1.5674	34.8123	54.4
PMMA	1.4915	57.4408	52.6
CR39	1.5039	58.8000	48.5
TYPEA	1.5151	41.5850	40.9
PYREX	1.4740	65.3864	27.8
QUARTZ	1.5443	70.1320	25.4
SEAWATER	1.3395	57.9177	23.7
WATER	1.3330	55.7943	23.6
First layer is LAF4, last layer is FK1			
Filler	$n_d$	$v_d$	Incident angle / (°)
PS	1.5905	30.8669	52.7
SAN	1.5674	34.8123	50.6
BASF55	1.6998	34.6804	40.9
PC	1.5855	29.9092	38.5
TYPEA	1.5151	41.5850	34.5
ACRYLIC	1.4917	55.3102	31.0
COC	1.5337	56.2279	26.9
BASF5	1.6032	42.5048	25.3
PYREX	1.4740	65.3864	24.4

表 2 中 Incident angle 为 MLDOE 的衍射效率在 90%以上时的最大入射角度。由表 2 可得,除了个别材料,大部分材料随着材料色散的减小,最大入射角逐步地减小,其他基底材料的组合也基本满足这个规律。由此可得:MLDOE 既要满足具有较大入射角度又要保持高的衍射效率,两边的基底材料应该为高折射率低色散和低折射率高色散的组合,中间层尽可能选择阿贝数较小的塑料光学材料作为填充层。

## 4 结 论

将双层 DOE 的中间空气层用具有色散性质的光学塑料代替,所构成的 MLDOE 在宽光谱波段、大视场角情况下能获得高达 90%以上的衍射效率,提高了光能利用率,扩展了 DOE 在光学系统设计中的应用范围;研究了构成 MLDOE 的材料组成,明确指出了高衍射效率 MLDOE 材料的选择应该满足以下要求:前后两层 DOE 的材料应该是高折射率低色散和低折射率高色散的组合,中间填充介质应尽可能选择阿贝数较小的光学塑料或者其他介质。

## 参 考 文 献

- 1 A. P. Wood. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13): 2253~2258
- 2 Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8~12  $\mu\text{m}$ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2089~2092  
陈 潇, 杨建峰, 马小龙 等. 8~12  $\mu\text{m}$  折-衍混合物镜超宽温度消色差设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2089~2092
- 3 Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679  
刘 琳, 沈为民, 周建康. 中波红外大相对孔径消色差光学系统的设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675~679
- 4 Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of infrared (IR) hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088  
刘 峰, 徐熙平, 孙向阳 等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2084~2088
- 5 Haitao Liu, Yingbai Yan, Deer Yi *et al.*. Theories for the design of a hybrid refractive-diffractive superresolution lens with high numerical aperture[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(5): 913~924
- 6 A. Flores, M. R. Wang, J. J. Yang. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(30): 5618~5630
- 7 Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Design of an ultralight and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of head-mounted projective displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 249~253  
赵顺龙, 王肇圻. 超轻小型投影式头盔显示系统折-衍混合物镜设计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 249~253
- 8 Wang Zhaoqi, Zhang Yanan, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive Petzval objective in visible band[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(1): 1~4  
王肇圻, 张轶楠, 傅汝廉 等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1): 1~4
- 9 Wang Zhaoqi, Rao Feng, Wang Yan *et al.*. Design of refractive/diffractive spherocylindrical phakic intraocular lens[J]. *Optica and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 701~705  
王肇圻, 饶 丰, 王 雁 等. 折射/衍射球柱有晶体眼人工晶体的设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(4): 701~705
- 10 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
- 11 Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao *et al.*. The design of infrared dual-band 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 Changjiang Fan, Zhaoqi Wang, Lie Lin *et al.*. Design of infrared inverted telephoto-optical system with double-layer harmonic diffractive element [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(7): 1973~1976
- 13 Xue Changxi, Cui Qingfeng, Pan 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  
薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳 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
- 14 Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai *et al.*. 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 等. 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
- 15 Changxi Xue, Qingfeng Cui. Design of multilayer diffractive optical elements with polychromatic integral diffraction efficiency [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 986~988