

多层衍射光学元件斜入射衍射效率的测量

杨亮亮

盐城师范学院新能源与电子工程学院, 江苏 盐城 224051

摘要 为了验证多层衍射光学元件的衍射效率随入射角度的理论变化关系,设计并制作了一个含有多层衍射光学元件(MLDOEs)的光学系统。当次级衍射光通过孔径光阑由探测器接收时,为保证衍射效率的测量精度,提出了一级衍射能量的修正方法。利用搭建的双光路装置,在 $0^\circ\sim 30.6^\circ$ 范围内对该多层衍射光学元件进行了衍射效率的测量。针对设计波长 532 nm,选取 7 个人射角度测量衍射效率,并对测量结果进行了模拟和分析。由于存在一定的加工误差,在不同入射角度状态下实际测量得到的衍射效率比理论分析的结果低,但是实测与理论分析结果均表明,多层衍射光学元件的衍射效率随入射角的增大而下降。

关键词 衍射; 衍射光学; 光学测量; 光学器件; 多层衍射光学元件; 衍射效率

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0205003

Measurement of Diffraction Efficiency for Multi-Layer Diffractive Optical Elements with Oblique Incidence

Yang Liangliang

School of New Energy and Electronics, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224051, China

Abstract In order to verify the theoretical relationship of the diffraction efficiency of multi-layer diffractive optical elements varying with the angle of incidence, an optical system with multi-layer diffractive optical elements is designed and manufactured. To ensure the measurement accuracy of diffraction efficiency when light of secondary order diffraction is received by the detector after passing through the pinhole aperture, a correction method of first-order diffraction energy is proposed. The diffraction efficiency of the multi-layer diffractive optical elements with the incident angles ranging from 0° to 30.6° is measured by the established double light-path measurement device. Diffraction efficiency is measured at seven different incident angles with the designed wavelength of 532 nm, and the measurement results are simulated and analyzed. Due to some manufacturing errors, the diffraction efficiency obtained by the actual measurement is lower than the theoretical analysis results. However, both measured and theoretical results show that the diffraction efficiency of multi-layer diffractive optical elements declines with the increase of incident angle.

Key words diffraction; diffractive optics; optical measurement; optical devices; multi-layer diffractive optical elements; diffraction efficiency

OCIS codes 050.1970; 120.4640; 230.3990

1 引 言

多层衍射光学元件(MLDOEs)能够在很宽的光谱波段范围内获得很高的衍射效率,解决了传统单层衍射光学元件存在的偏离设计波长后衍射效率显著下降的问题^[1]。近年来,多层衍射光学由于其特殊的色散特性和消热差特性,在宽波段、红外双波段等成像光学系统中的应用越来越广泛^[2-5]。衍射效率是衍射光学元件的重要指标之一。因此,对于含有多层衍射光学元件的折衍混合光学系统,实际测量多层衍射光学元件的衍射效率对评价光学系统的成像质量非常重要。

收稿日期: 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-10-08

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(16KJD140001)

作者简介: 杨亮亮(1986—),女,博士,讲师,主要从事衍射光学和光学设计方面的研究。

E-mail: yang_liangliang@163.com

用于成像光学系统中的多层衍射光学元件一般采用单点金刚石车削的方法加工^[6-7]。衍射光学元件在加工过程中,会产生一些加工误差,加工误差对多层衍射光学元件的衍射效率有一定程度的影响^[8-11]。文献[12]提出了测量衍射效率的双光路测量方法,并且在特定的激光波长下,测量了单层衍射光学元件的衍射效率。多层衍射光学元件在结构和衍射效率方面都不同于单层衍射光学元件,然而对多层衍射光学元件衍射效率的测量和其在不同入射角度时衍射效率的实际测量均未见报道。本文设计并加工了一个含有多层衍射光学元件的光学系统,基于理论分析给出了多层衍射光学元件的衍射效率随入射角度增大而逐渐下降的对应关系。采用双光路测量方法,在衍射面上入射角度为 $0^\circ\sim 30.6^\circ$ 范围内进行了多层衍射光学元件衍射效率的实际测量。实际测量过程中,由于光学系统的弥散斑较大,为保证待测的1级衍射光能量全部通过孔径光阑并由探测器接收,临近的次级衍射光也有一部分被探测器接收,对测量得到的1级衍射能量进行了修正,保证测量结果的准确性。

2 多层衍射光学元件的理论衍射效率

最简单的多层衍射光学元件由两个谐衍射元件组成,中间介质为空气。多层衍射光学元件的相位延迟表达式为^[13-14]

$$\phi(\lambda) = 2\pi \sum_{i=1}^N \frac{d_i [n_{ij}(\lambda) \cos \theta_{ij} - n_{i,i}(\lambda) \cos \theta_{ii}]}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 d_i 表示第 i 层谐衍射元件的微结构高度, N 表示多层衍射光学元件是由 N 个谐衍射元件组成, $n_{ij}(\lambda)$ 和 $n_{i,i}(\lambda)$ 分别为第 i 层谐衍射元件的入射介质和出射介质材料的折射率, θ_{ij} 和 θ_{ii} 分别为第 i 层谐衍射元件的入射角度和出射角度。可以进一步推导出光线斜入射时多层衍射光学元件的相位延迟表达式为

$$\phi(\lambda) = 2\pi \sum_{i=1}^N \frac{d_i \{ \sqrt{n_{i-1,i}^2(\lambda) - [n_{1j}(\lambda) \sin \theta_{1j}]^2} - \sqrt{n_{i,i}^2(\lambda) - [n_{1j}(\lambda) \sin \theta_{1j}]^2} \}}{\lambda}, \quad (2)$$

式中当 $i=0$ 时, $n_{0,i} = n_{1j}$ 。光线斜入射到多层衍射光学元件时,第 m 衍射级次的衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\phi(\lambda)}{2\pi} \right]. \quad (3)$$

3 1级衍射能量的修正

采用双光路测量装置^[12]测量多层衍射光学元件的衍射效率时,在考虑参考光路的能量对测量结果准确度影响的前提下,通过测量含有多层衍射光学元件的折衍射混合光学系统的主衍射级次能量 E_1 与光学系统后焦面的总光能 E_0 之比,得到多层衍射光学元件的衍射效率为

$$\eta = \frac{E_1 E'_0}{E'_1 E_0}, \quad (4)$$

式中 E'_1 和 E'_0 分别为记录主衍射级能量 E_1 和后焦面总能量 E_0 时对应的参考光能量。当多层衍射光学元件承担的光焦度比较大时,入射光束经过多层衍射光学元件后,各衍射级次焦点的轴向距离较小。若探测器前针孔光阑的直径选为 d ,为保证主衍射级次的能量全部通过,有部分次级衍射光通过针孔光阑被探测器接收,所占比例为 $\frac{\pi(d/2)^2}{\pi h_m^2}$, m 为次级衍射级次, h_m 是 m 衍射级次在主衍射级次焦面上的成像高度。实验测量多层衍射光学元件的衍射效率时,为消除次级衍射能量对测量结果的干扰,1级衍射的能量为探测器记录的主衍射级能量 E_1 减去进入的次级衍射的能量,即修正后的1级衍射能量 E_{1r} 为

$$E_{1r} = \left[1 - \sum_{m \neq 1} \frac{\pi (d/2)^2}{\pi h_m^2} \eta_m \right] E_1, \quad (5)$$

式中 η_m 是 m 级次衍射对应的衍射效率,多层衍射光学元件测量衍射效率的修正计算公式为

$$\eta = \frac{E_{1r} E'_0}{E'_1 E_0}. \quad (6)$$

4 含有多层衍射光学元件光学系统的设计

设计了一个工作于可见光波段的、便于实验测量的多层衍射光学元件和一个含有该多层衍射光学元件的光学系统。如图 1 所示,光学系统的视场为 $\pm 45^\circ$,系统焦距为 72 mm。光学系统的特点是:1) 光阑前面的两片透镜为多层衍射光学元件,便于实现衍射面上的大角度入射;2) 光学系统的中心波长是 532 nm,对应激光器的波长,便于实际测量。



图 1 含有多层衍射光学元件的光学系统实物图
Fig. 1 Picture of the optical system with MLDOEs

多层衍射光学元件的基底材料为常用的光学塑料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)^[15],主衍射级次为 $m=1$ 。利用带宽积分平均衍射效率的方法优化设计^[16],得到多层衍射光学元件的最大微结构高度分别为 $25.8148 \mu\text{m}$ 和 $-20.6710 \mu\text{m}$ 。为了便于调整光学系统的视场角大小,分别选择光学系统的视场角为 $0^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 和 45° ,根据光线追迹得到对应的多层衍射光学元件衍射面上的入射角分别为 $0^\circ, 14.4^\circ, 16.9^\circ, 19.6^\circ, 22.4^\circ, 25^\circ$ 和 30.6° ,如表 1 所示。

表 1 光学系统的视场角和衍射面上的入射角度的对应关系

Table 1 Relationship of the field of view of the optical system and the incident angle upon the diffractive surface ($^\circ$)

Item	Value						
Field of view	0	20	25	30	35	40	45
Incident angle	0	14.4	16.9	19.6	22.4	25	30.6

光学系统实际的弥散斑较大,为了保证 1 级衍射光能量全部通过,在测量 1 级衍射能量时,探测器前面的针孔光阑半径选取为 0.25 mm,此时不仅 1 级衍射的能量可以全部通过,同时次级衍射的能量有很大一部分也会被探测器接收。利用衍射光学元件的光焦度公式,得到 2 级和 0 级衍射在 1 级衍射焦面上的成像高度为 $h_2=h_0=0.179 \text{ mm}$,全部通过针孔光阑;3 级和 -1 级衍射的高度为 $h_3=h_{-1}=0.359 \text{ mm}$,48.5% 的能量通过针孔光阑被探测器接收。

根据(3)式得到不同衍射级次多层衍射光学元件的衍射效率随入射角度的变化关系曲线如图 2 所示,分别给出了 1 级、2 级、0 级、3 级、-1 级、4 级和 -2 级衍射的衍射效率随入射角度增大的变化情况,其中 4 级衍射和 -2 级衍射的衍射效率在不同的入射角度状态下变化范围较小,所以只考虑 2 级、0 级、3 级和 -1 级衍射对 1 级衍射的衍射效率的影响。从图 2 中可知,当多层衍射光学元件的入射角度从 0° 逐渐增大到 30.6°

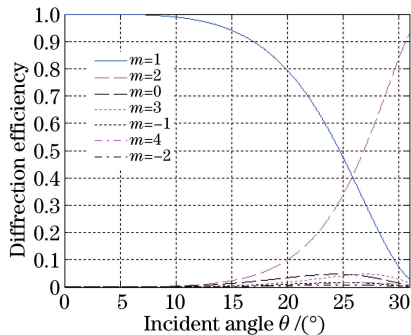


图 2 不同衍射级次的衍射效率与入射角度的关系

Fig. 2 Relationship of diffraction efficiency versus incident angle for different diffraction orders

时,1级衍射效率从100%逐渐下降到4.25%,2级衍射效率从0逐渐增大到90%,0级、3级和-1级衍射的衍射效率变化范围很小(小于4.7%)。所以,在计算1级衍射的衍射效率时,需考虑这些次级衍射对测量结果的影响。多层衍射光学元件衍射面上的入射角分别为0°、14.4°、16.9°、19.6°、22.4°、25°和30.6°时对应的衍射效率如表2所示。

表2 多层衍射光学元件在特定入射角度时不同衍射级次的衍射效率

Table 2 Diffraction efficiency of MLDOEs for different diffraction orders at the measured incident angles

Diffraction order	Incident angle / (°)						
	0	14.4	16.9	19.6	22.4	25	30.6
1	100	95.02	90.07	81.12	66.55	47.50	4.25
2	0	1.92	4.2	9.0	18.4	33.9	90
0	0	1.15	2.0	3.2	4.4	4.7	0.9
3	0	0.41	0.8	1.6	2.8	4.2	2.1
-1	0	0.32	0.6	1.0	1.5	1.7	0.36

利用波长为532 nm的激光器测量多层衍射光学元件的衍射效率。利用(5)式修正1级衍射能量,简化为

$$E_{1r} = (1 - \eta_2 - \eta_0 - 0.485\eta_3 - 0.485\eta_{-1})E_1, \quad (7)$$

式中 η_2 、 η_0 、 η_3 和 η_{-1} 分别是2级、0级、3级和-1级对应的衍射效率。

5 多层衍射光学元件衍射效率的测量结果与分析

当入射角度分别为0°、14.4°、16.9°、19.6°、22.4°、25°和30.6°时,对应的衍射效率的测量结果如表3~表9所示。为了简明地表达测量数据,在每个入射角度的情况下给出了多层衍射光学元件衍射效率的三次测量结果。取三次测量结果的平均值,得到正入射时测量得到的衍射效率为64.88%,入射角度为14.4°、16.9°、19.6°、22.4°、25°和30.6°时对应的测量值分别为55.37%、52.10%、45.03%、37.54%、26.07%和3.80%。

表3 正入射时多层衍射光学元件的衍射效率

Table 3 Diffraction efficiency of MLDOEs with normal incidence

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	1.027	3.142	1.572	3.145	65.39
2	1.035	3.139	1.607	3.140	64.43
3	1.042	3.128	1.610	3.133	64.82

表4 14.4°入射时多层衍射光学元件的衍射效率

Table 4 Diffraction efficiency of MLDOEs with incident angle of 14.4°

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	0.911	3.130	1.578	3.131	55.77
2	0.917	3.127	1.631	3.129	54.33
3	0.924	3.134	1.593	3.133	56.00

表5 16.9°入射时多层衍射光学元件的衍射效率

Table 5 Diffraction efficiency of MLDOEs with incident angle of 16.9°

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	0.773	3.140	1.383	3.141	52.06
2	0.769	3.137	1.377	3.139	52.04
3	0.775	3.139	1.380	3.134	52.21

表6 19.6°入射时多层衍射光学元件的衍射效率

Table 6 Diffraction efficiency of MLDOEs with incident angle of 19.6°

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	0.675	3.135	1.292	3.136	45.23
2	0.677	3.132	1.301	3.140	45.15
3	0.669	3.127	1.297	3.132	44.71

表 7 22.4°入射时多层衍射光学元件的衍射效率

Table 7 Diffraction efficiency of MLDOEs with incident angle of 22.4°

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	0.496	3.136	1.010	3.138	36.91
2	0.510	3.128	1.013	3.129	37.83
3	0.511	3.132	1.014	3.135	37.89

表 8 25°入射时多层衍射光学元件的衍射效率

Table 8 Diffraction efficiency of MLDOEs with incident angle of 25°

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	0.332	3.134	0.752	3.137	25.87
2	0.337	3.137	0.755	3.136	26.12
3	0.341	3.130	0.763	3.137	26.22

表 9 30.6°入射时多层衍射光学元件的衍射效率

Table 9 Diffraction efficiency of MLDOEs with incident angle of 30.6°

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	0.417	3.128	0.874	3.129	3.77
2	0.426	3.133	0.881	3.140	3.83
3	0.423	3.131	0.879	3.134	3.81

利用(3)式得到多层衍射光学元件在不同入射角度下的理论衍射效率 η_{theo} 如表 10 所示;入射角度不同时多层衍射光学元件的衍射效率测量值 η 比理论计算得到的衍射效率低很多,但是衍射效率随入射角度增大的变化趋势是一致的。

表 10 多层衍射光学元件衍射效率的测量结果与理论计算结果的对比

Table 10 Contrast of measured and theoretical values of diffraction efficiency for MLDOEs

Diffraction efficiency	Incident angle / (°)						
	0	14.4	16.9	19.6	22.4	25	30.6
$\eta_{\text{theo}}/\%$	100	95.02	90.07	81.12	66.55	47.50	4.25
$\eta/\%$	64.88	55.37	52.10	45.03	37.54	26.07	3.80

通过测量得到多层衍射光学元件在几个特定的入射角度处的衍射效率值,通过插值算法可以得到测量结果的拟合曲线,如图 3 所示。图中,虚线代表理论衍射效率与入射角度的变化关系曲线,实线代表实验测量结果的拟合曲线,拟合曲线上的几个圆点代表 7 个实际测量的衍射效率值。从图 3 可以得到在 0°~30.6°入射角度范围内任意一个入射角度处对应的衍射效率的测量值大小。组成多层衍射光学元件中的谐衍射元件均采用单点金刚石车削和注塑复制的方法加工,即首先利用单点金刚石车削的方法加工模具,再注塑加工两片谐衍射光学元件。由于实际加工出来的多层衍射光学元件的微结构面形与设计存在明显的差距,导致衍射效率的测量结果与理论计算得到的数值有明显偏差,但是测量得到的多层衍射光学元件的衍射效率随入射角的增大而下降的变化趋势与理论计算的结果一致。

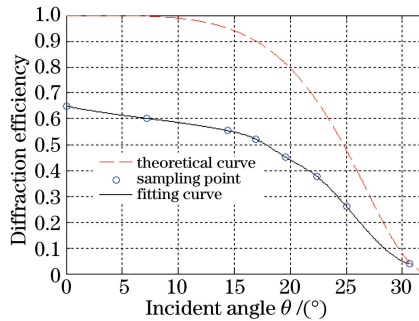


图 3 多层衍射光学元件衍射效率的理论曲线和测量结果拟合曲线

Fig. 3 Theoretical curve and measured results fitting curve of the diffraction efficiency of MLDOEs

6 结 论

当次级衍射光通过孔径光阑由探测器接收时,为保证衍射效率的测量精度,提出了一级衍射能量的修正方法。为了验证多层衍射光学元件的衍射效率随入射角度的变化关系,设计并研制了一个含有多层衍射光学元件的光学系统。基于衍射光学元件衍射效率的双光路测量装置,选取 0° 、 14.4° 、 16.9° 、 19.6° 、 22.4° 、 25° 和 30.6° 作为多层衍射光学元件的实测入射角度,得到多层衍射光学元件衍射效率的测量结果。由于存在一定的加工误差,在不同入射角度状态下实际测量得到的多层衍射光学元件的衍射效率与理论分析结果存在一定的偏差。把测量结果的拟合曲线和理论曲线进行对比,验证了理论推导得到的斜入射时衍射效率随入射角度的增大而下降的变化趋势。测量结果从另一个角度说明了提高多层衍射光学元件的加工技术是拓展其应用的关键问题。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Arieli Y, Ozeri S, Eisenberg N. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(11): 823-824.
- [3] Xue C X, Cui Q F, Liu T, *et al.* Optimal design of a multilayer diffractive optical element for dual waveband[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4157-4159.
- [4] Li J S, Feng K. Optimization and analysis of multi-layer diffractive optical elements in visible waveband[J]. *Optik*, 2014, 125(14): 3596-3598.
- [5] 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.
- [6] Wood A P. A hybrid refractive-diffractive lens for manufacture by diamond turning[C]. *SPIE*, 1991, 1573: 122-128.
- [7] Blough C G, Rossi M, Mack S K, *et al.* Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4648-4654.
- [8] Yin Kewei, Huang Zhiqiang, Lin Wumei, *et al.* Analysis of effect of lateral fabrication errors on binary optical elements[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(9): 46-49.
殷可为, 黄智强, 林妩媚, 等. 二元光学元件横向加工误差对衍射效率的影响[J]. *光电工程*, 2011, 38(9): 46-49.
- [9] 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.
- [10] Gao Long, Xue Changxi, Yang Hongfang, *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.
- [11] Mao Shan, Cui Qingfeng. 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.
- [12] Yang Liangliang, Cui Qingfeng, Liu Tao, *et al.* Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412007.
杨亮亮, 崔庆丰, 刘 涛, 等. 衍射光学元件衍射效率的测量[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412007.
- [13] Zhao Y H, Fan C J, Ying C F, *et al.* The investigation of triple-layer diffraction optical element with wide field of view and high diffraction efficiency[J]. *Optics Communications*, 2013, 295(15): 104-107.
- [14] Yang Liangliang. Studies on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
杨亮亮. 多层衍射光学元件衍射效率的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [15] Bass M. *Handbook of optics II*[M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [16] 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.