

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: 针对衍射光学元件衍射效率测量的双光路实验装置, 当次级衍射光通过孔径光阑由探测器接收时, 为保证测量精度提出了测量衍射效率的修正公式。针对所研制的含有衍射光学元件的折衍射混合成像光学系统, 选取可见光波段中的 3 个激光波长, 当衍射面上入射角度为 12° 时对该衍射光学元件进行了衍射效率的测量, 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和斜入射时遮挡效应的影响, 实际测得的衍射光学元件的衍射效率比理论计算结果低。根据测量结果拟合曲线, 在 473~632.8 nm 波段范围内的带宽积分平均衍射效率对比理论值存在 12.84% 的偏差。

关键词: 衍射光学; 光学测量; 衍射光学元件; 衍射效率

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0117003

Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements with oblique incidence

Yang Liangliang

(School of New Energy and Electronics Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng 224051, China)

Abstract: Based on the double light-path experiment device measuring for diffraction efficiency of diffractive optical elements(DOEs), a correcting formula of diffraction efficiency was introduced to ensure the measurement accuracy of diffraction efficiency when light of secondary order diffraction was received by the detector after passing through the pinhole aperture. The diffraction efficiency of the designed hybrid refractive-diffractive optical system was measured at three laser wavelengths over the visible waveband for the incident angle upon microstructure surface was 12° . The measurement results were simulated and analyzed. Due to some manufacturing errors and blocking effect, the measured diffraction efficiency was smaller than the theoretical. Based on the fitted curve of measurement results, the deviation of the polychromatic integral diffraction efficiency from the theoretical value was 12.84% over the 473–632.8 nm waveband.

Key words: diffractive optics; optical measurement; diffractive optical elements; diffraction efficiency

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-08-25

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, 讲师, 博士, 主要从事衍射光学和光学设计方面的研究。Email: yang_liangliang@163.com

0 引言

衍射光学元件由于其特殊的消色差和非球面等性质广泛应用于可见光波段、红外波段等成像光学系统中^[1-4]。对于应用于成像光学系统中的衍射光学元件,多采用单点金刚石车削方法加工^[5-6]。在加工过程中,会引入一定的加工误差,加工误差对衍射光学元件的衍射效率和带宽积分平均衍射效率有一定的影响^[7-11]。对比周期宽度误差,微结构高度误差对衍射效率的影响更严重。 $\pm 5\%$ 的微结构高度误差会引起单层衍射光学元件的衍射效率最大下降约 5%^[12]。衍射效率的大小决定了衍射光学元件的工作波段范围。光线通过衍射光学元件后,会产生多个衍射级次,主衍射级次的光线参与成像,其他衍射级次的光线在主衍射级像面上形成杂散光,降低像面的对比度。因此,对衍射光学元件衍射效率的精确测量是衡量加工误差的一种实际方法。

目前,许多研究学者研究了衍射光学元件的设计方法和加工误差对衍射效率的影响,并分析了斜入射时的衍射效率^[13-15],但对于衍射光学元件衍射效率的实际测量并不多。参考文献[16]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,测量了正入射时单层衍射光学元件的衍射效率。文中针对衍射光学元件衍射效率测量的双光路实验装置,当次级衍射光通过孔径光阑由探测器接收时,为保证测量精度提出了衍射效率的修正公式。对一个已经研制的折衍射混合光学系统,采用双光路测量装置在可见光波段范围内进行了最大视场的衍射效率的测量。测量结果反映了衍射光学元件的加工误差和遮挡效应的影响。

1 衍射光学元件的理论衍射效率

根据标量衍射理论,当光束从衍射光学元件的基底材料斜入射到空气中时,单层衍射光学元件的第 m 衍射级次的衍射效率^[17]为:

$$\eta_0 = \text{sinc}^2 \left\{ m \frac{d}{\lambda} [n(\lambda) \cos \theta_i - \sqrt{1 - n^2(\lambda) \sin^2 \theta_i}] \right\} \quad (1)$$

式中: m 为衍射级次; d 为衍射光学元件的表面微结构高度; $n(\lambda)$ 为衍射光学元件基底材料在波长为 λ 时的折射率; θ_i 为光线入射到衍射微结构表面上的角度。当光线正入射至单层衍射光学元件时,即 $\theta_i=0$,

公式(1)可简化为:

$$\eta_0 = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{d[n(\lambda)-1]}{\lambda} \right\} \quad (2)$$

衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率为:

$$\bar{\eta}_0 = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_0 d\lambda \quad (3)$$

式中: λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别表示波段范围内的最小波长值和最大波长值。

2 衍射光学元件实际测量衍射效率的修正

采用如图 1 所示的双光路测量装置^[16]可以补偿激光器波动性对测量精度的影响。图 2 给出了光学系统的整个测量装置。从图 1 和图 2 可以看出,由光源发出的光束,一路经过平行光管射出平行光后,照射到放置在角度旋转台上的被测光学系统上,由光电探测器 2 在其后焦面位置处接收能量;另一路光束则直接经过分光镜反射后由光电探测器 1 接收,作为参考光路。在衍射效率的测量过程中,首先测量出主衍射级的能量 E_1 ,并记录此时参考光能量 E_1' ;然后,去掉紧靠光电探测器 2 前方放置的小孔光阑,测量被测系统后焦面上的总能量 E_0 和参考光能量 E_0' ,则衍射光学元件的衍射效率可以通过下式来计算:

$$\eta = \frac{E_1 E_0'}{E_1' E_0} \quad (4)$$

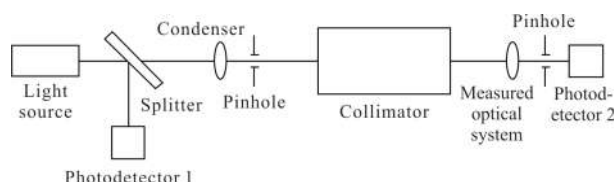


图 1 衍射效率测量实验装置框图

Fig.1 Block diagram of experimental setup of diffraction efficiency measurement system

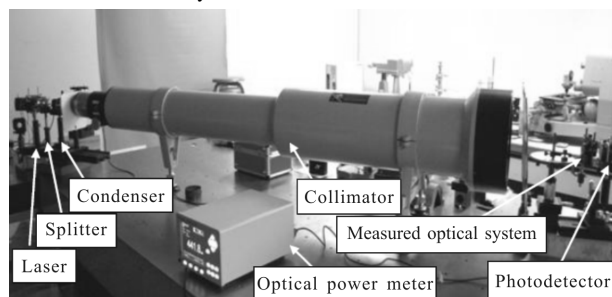


图 2 衍射光学元件衍射效率的测量装置

Fig.2 Measurement device of diffraction efficiency for diffractive optical elements

当衍射光学元件承担的光焦度比较大时,入射光束经过衍射光学元件后,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,可能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。为消除次级衍射能量对实际测量结果的干扰,1 级衍射的能量应该是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,即修正后的一级衍射能量 E_{1r} 为:

$$E_{1r} = \left[1 - \sum_{m \neq 1} \frac{\pi(d/2)^2}{\pi h_m^2} \eta_{0m} \right] E_1 \quad (5)$$

式中: η_{0m} 是 m 衍射次级对应的理论衍射效率。衍射光学元件实测衍射效率的计算公式修正为:

$$\eta = \frac{E_{1r} E_0'}{E_1' E_0} \quad (6)$$

3 衍射光学元件相关参数的分析

所设计的含有单层衍射光学元件的折衍射混合光学系统如图 3 所示,焦距为 26.4 mm,工作波段范围为 486.1~656.3 nm,中心波长为 546.1 nm。衍射光学元件位于透镜的后表面上。在中心波长 546.1 nm 处,第 $m=1$ 衍射级次与邻近的 $m=2, m=0$ 衍射级次的轴向距离分别为 $d_0=1.5045$ mm, $d_1=1.6980$ mm。在一级衍射光的焦平面上,2 级和 0 级衍射光的高度分别为 $h_2=0.8158$ mm, $h_0=0.8158$ mm。

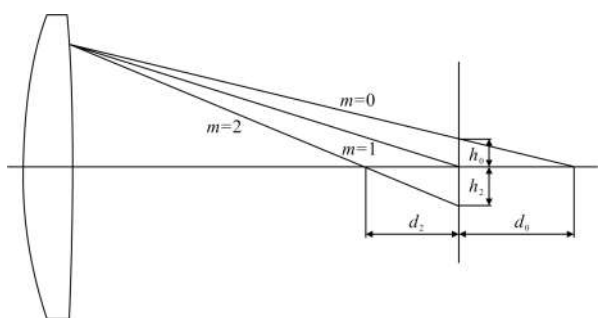


图 3 经过衍射光学元件后各衍射级次的分布图

Fig.3 Distribution of the diffraction orders passing through diffractive optical elements

当探测器前面的针孔光阑直径大小选为 0.1 mm 时,利用圆孔夫琅禾费衍射强度分布计算可以得到

在 0.05 mm 的半径范围内所包含的能量为 99.999 9%,所以,可以认为 1 级衍射光全部通过针孔光阑。通过针孔光阑透过的 2 级和 0 级衍射光所占的比例均为 $(0.05/0.8158)^2=0.3756\%$,通过针孔光阑的次级衍射光所占的比例很小。

图 4 给出了衍射光学元件在 473、532、632.8 nm 三个波长处对应的 1、2、0 三个临近衍射级次的衍射效率。当入射角度分别为 0° 和 12° 时,473 nm 波长处对应的 2 级衍射的衍射效率都是最大,分别为 0.036 5% 和 0.075 7%。由于次级衍射光的衍射效率很低,并且在 1 级衍射光的最佳像面处所占的能量很小,所以所设计的衍射光学元件在测量 1 级衍射效率时,次级衍射光对衍射效率的影响可以忽略。鉴于上述分析,可以认为针孔光阑滤除了次级衍射光而让主衍射级次的光全部通过,公式(6)中的 $E_{1r}=E_1$,等同于直接利用公式(4)计算衍射光学元件的衍射效率。

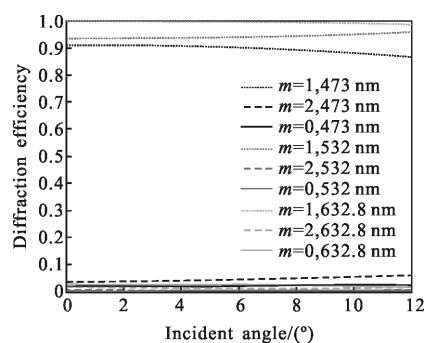


图 4 三个波长处不同衍射级次的衍射效率与入射角度的关系
Fig.4 Relationship of diffraction efficiency versus incident angle for different diffraction orders of three wavelengths

4 衍射光学元件衍射效率的测量结果与分析

为了更准确的评价衍射光学元件在整个工作波段范围内的成像质量,分别选择三个激光波长,在不同时间对被测的折衍射混合光学系统多次进行衍射效率的测量。为了简明地表达衍射效率的测量结果,文中只给出三次实验的测量结果。

4.1 0° 入射角度时衍射效率的测量结果

采用双光路的衍射效率测量装置,通过测量得到混合透镜 1 级衍射光的能量 E_1 和参考光路的能量 E_1' ,后焦面上的总能量 E_0 和同一时刻参考光路的能量 E_0' 。将测得的数据带入公式(4)得到实际测量的衍射效率如表 1 所示^[13], η_0 为利用公式(2)计算得

到的理论衍射效率, 在三个波长处衍射效率测量结果的偏差 Δ 小于 5.0%。

表 1 正入射时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

Tab.1 Contrast of measured and theoretical value of diffraction efficiency for DOEs with normal incidence

Diffraction efficiency	Wavelength/nm		
	473	532	632.8
η_0	91.18%	99.74%	93.38%
η	88.98%	95.02%	89.69%
Δ	2.20	4.72	3.69

4.2 12°入射角度时衍射效率的测量结果

为了评价衍射光学元件最大口径处表面微结构的加工质量, 选择最大视场 13°测量斜入射时衍射光学元件的衍射效率。测量装置中通过角度旋转台控制被测光学系统的入射角度为 13°, 经过光线追迹得到衍射光学元件衍射面上的入射角度是 12°。斜入射衍射效率的具体测量方法与正入射相同。

4.2.1 473 nm 波长处衍射效率的测量结果

当使用波长为 473 nm 的固体激光器作为光源时, 斜入射时的衍射光学元件衍射效率的测量结果如表 2 所示, 衍射光学元件衍射效率的测量平均值为 $\bar{\eta}=83.95\%$; 与利用公式(1)计算得到的衍射效率理论值 88.08% 相对比, 单层衍射光学元件在 473 nm 波长处的衍射效率测量结果有 4.13% 的偏差。

表 2 衍射光学元件在 473 nm 波长处的衍射效率

Tab.2 Diffraction efficiency of DOEs at 473 nm wavelength

No.	$E_i/\mu W$	$E_i'/\mu W$	$E_o/\mu W$	$E_o'/\mu W$	η
1	2.913	10.41	3.472	10.42	83.98%
2	2.925	10.47	3.475	10.43	83.85%
3	2.918	10.42	3.469	10.41	84.03%

4.2.2 532 nm 波长处衍射效率的测量结果

衍射光学元件的设计波长为 546.1 nm, 测试波长选择一个现有的、最接近设计波长的 532 nm 的激光波长。在该波长处, 衍射光学元件衍射效率的理论值为 98.72%。表 3 给出了 12°入射角度下衍射光学元件

的衍射效率测量结果, 在 532 nm 波长处衍射效率的测量平均值为 87.52%, 同理论值的偏差为 11.20%。

表 3 衍射光学元件在 532 nm 波长处的衍射效率

Tab.3 Diffraction efficiency of DOEs at 532 nm wavelength

No.	$E_i/\mu W$	$E_i'/\mu W$	$E_o/\mu W$	$E_o'/\mu W$	η
1	2.047	6.104	2.342	6.107	87.45%
2	2.056	6.158	2.346	6.154	87.58%
3	2.045	6.203	2.337	6.205	87.53%

4.2.3 632.8 nm 波长处衍射效率的测量结果

对于波长为 632.8 nm 的氦氖激光器, 测量结果如表 4 所示, 测得的衍射效率平均值为 75.67%。通过计算得到 12°入射角度时衍射光学元件衍射效率的理论值为 96.31%, 实验测量与理论计算结果的偏差为 20.64%。

表 4 衍射光学元件在 632.8 nm 波长处的衍射效率

Tab.4 Diffraction efficiency of DOEs at 632.8 nm wavelength

No.	$E_i/\mu W$	$E_i'/\mu W$	$E_o/\mu W$	$E_o'/\mu W$	η
1	0.327 4	1.509	0.428 5	1.511	76.51%
2	0.318 0	1.517	0.424 3	1.516	74.90%
3	0.324 9	1.506	0.431 7	1.513	75.61%

通过测量得到衍射光学元件在几个特定波长处的衍射效率, 通过插值算法, 可以得到测量结果的拟合曲线如图 5 所示。图中, 实线代表理论衍射效率, 点画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实际测量值。根据衍射效率测量结果的拟合曲线, 利用公式(3)计算衍射面上入射角度为 12°时, 衍射光学元件在 473~632.8 nm 波段范围内的带宽积分平均衍射效率为 84.55%。对比理论计算结果 97.39%, 偏差为 12.84%。同理, 0°入射角度时衍射光学元件在 473~632.8 nm 波段范围内的带宽积分平均衍射效率与理论值的偏差为 3.96%。由于加工误差的存在, 衍射光学元件实际的微结构面形与设计要求的存在一定的偏差; 微结构表面的边缘周期宽度较小, 斜入射时会引入遮挡误差, 以致衍射效率的测量结果与理论数值有一定的偏差。偏差 12.84% 即反映了衍射光学元件的加工误差, 也体现了斜入射时遮挡效应的影响。

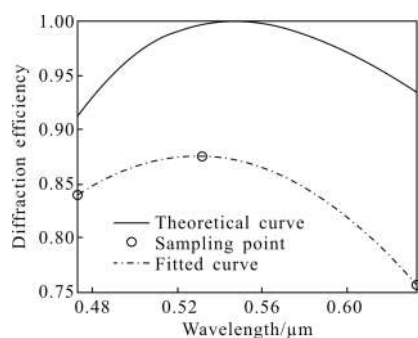


图 5 衍射光学元件衍射效率的理论曲线和测量拟合曲线的对比
Fig.5 Comparison of theoretical curve and simulated curve of measurement fitting of the diffraction efficiency for DOEs

5 结论

成像衍射光学元件的衍射效率可以采用双光路实验装置进行测量,衍射效率的实际测量值是评价衍射光学元件应用的一个主要性能指标。当测量装置中次级衍射光通过孔径光阑被探测器接收时,为了消除临近的次级衍射光的能量对测量结果的影响,对探测器所接收到的一级衍射光的能量进行了修正,提出了主衍射级次衍射效率计算的修正公式。

针对含有衍射光学元件的折衍射混合成像光学系统,选取三个激光波长,在衍射面上的最大入射角度为 12° 时,进行了衍射效率的测量。根据测量结果的拟合曲线,在 $473\sim 632.8\text{ nm}$ 波段范围内的带宽积分平均衍射效率对比理论计算结果存在 12.84% 的偏差,该值包括了 0° 入射角度时存在的 3.96% 的偏差,也反映了斜入射时引入的遮挡误差。从实验上说明了,微结构高度误差、周期宽度误差等加工误差需要控制,斜入射工作的衍射光学元件也要控制其遮挡效应的影响,即在设计、加工时对边缘周期宽度提出要求。

参考文献:

[1] Xue Changxi, Cui Qingfeng, Liu Tao, et al. Optimal design of a multilayer diffractive optical element for dual waveband [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4157-4159.
 [2] Jinsong Li, Ke Feng. Optimization and analysis of multilayer diffractive optical elements in visible waveband [J]. *Optik*, 2014, 125(14): 3596-3598.
 [3] Sun Ting, Zhang Xuanchi, Chang Weijun, et al. Design of infrared wide waveband double-layer harmonic diffractive optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 951-954. (in Chinese)
 [4] Wang Mengjun, Zhao Cuiling, Han Bangjie, et al. Design of

coaxial dual-band IR optical system based on harmonic diffraction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2732-2736. (in Chinese)
 [5] Wood A P. A hybrid refractive-diffractive lens for manufacture by diamond turning[C]//SPIE, 1991, 1573: 122-128.
 [6] 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): 4848-4654.
 [7] Zhao Junyan, Cui Qingfeng, Wang Peng. Scatter analysis of diffractive surface manufactured by single point diamond turning[C]//SPIE, 2007, 6724: 67241N.
 [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. (in Chinese)
 [9] 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. (in Chinese)
 [10] Mao Shan, Cui Qingfeng. Effect on polychromatic integral diffraction efficiency for two-layer diffractive optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0105001. (in Chinese)
 [11] Ma Zebin, Kang Fuzeng, Wang Hao. Effect of fabrication errors of double-layer BOE on diffractive efficiency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0918001. (in Chinese)
 [12] Yang Liangliang, Cui Qingfeng, Liu Tao, et al. Effects of manufacturing errors on diffraction efficiency for multilayer diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(32): 6128-6133.
 [13] 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. (in Chinese)
 [14] Mao Shan, Cui Qingfeng, Piao Mingxu, 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] Yang Hongfang, Xue Changxi, Li Chuang, et al. Diffraction efficiency sensitivity to oblique incident angle for multilayer diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 7126-7133.
 [16] Yang Liangliang, Cui Qingfeng, Liu Tao, et al. Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412007. (in Chinese)
 [17] Swanson G J. Binary optics technology: Theoretical limits on the diffraction efficiency of multilevel diffractive optical elements[D]. US: MIT Lincoln Laboratory Technical, 1991.