

衍射光学元件衍射效率的测量

杨亮亮 崔庆丰 刘 涛 薛常喜

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 根据衍射光学元件衍射效率的测量原理,建立衍射光学元件衍射效率测量的双光路装置,简要介绍了双光路测量的优点。针对衍射光学元件衍射效率的测量装置,讨论了影响衍射效率测量精度的因素,合理地选择测量装置中的针孔光阑,即可以让主衍射级次的光全部通过被探测器接收,又可以滤掉次级衍射光,保证测量结果的准确度。针对所设计研制的一个折衍射混合成像光学系统,测量了可见光波段 3 个激光波长的衍射效率,并对测量结果进行了模拟和分析。在 473~632.8 nm 波段范围内任意一个波长处,衍射效率的测量结果同理论值的偏差均小于 5.0%。实验证明,双光路测量装置可以用于测量衍射光学元件的衍射效率。

关键词 光学测量;光学器件;衍射光学元件;衍射效率;双光路测量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0412007

Measurement of Diffraction Efficiency for Diffractive Optical Elements

Yang Liangliang Cui Qingfeng Liu Tao Xue Changxi

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

Abstract According to the measuring principle of diffraction efficiency for diffractive optical elements, the double light-path measurement device of diffraction efficiency is set up. The advantages of double light-path measurement are briefly introduced. For the measurement device of diffraction efficiency for diffractive optical elements, the factors having influence on the accuracy of the measurement results are discussed by the reasonable choices of the pinhole aperture of the measurement device, the light of the main diffraction order can be received by the detector, and the secondary diffraction light will be filtered out, ensuring the accuracy of the measurement results. The diffraction efficiency of the designed hybrid refractive-diffractive optical system is measured at three laser wavelengths over the visible waveband. The measurement results are simulated and analyzed. The deviation of the measurement results from the theoretical value is less than 5.0% over the 473~632.8 nm waveband. The double light-path measurement device can be used to measure the diffraction efficiency of diffractive optical elements.

Key words optical measurement; optical devices; diffractive optical elements; diffraction efficiency; double light-path measurement

OCIS codes 120.4640; 230.3990; 050.1970

1 引 言

衍射光学元件由于其特殊的性质在各种光学系统中得到了越来越多的发展和应用^[1~5]。对于成像光学系统中的衍射光学元件,通常采用单点金刚石车削的方法加工^[6]。在衍射光学元件加工的过程中,难免会产生一些加工误差影响衍射效率。衍射

效率是评价衍射光学元件以及含有衍射光学元件的折衍射混合光学系统的重要指标之一。光线通过衍射光学元件后,会产生多个衍射级次,一般只是关注主衍射级次的光线,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,衍射光学元件的衍射效率直接影响到衍射光学元件的

收稿日期: 2011-10-19; 收到修改稿日期: 2011-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(60878030)、国际科工局“十一·五”基础科研项目(B1020060365)和吉林省科技发展计划(201105052)资助课题。

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

E-mail: yangliangliang2010@yahoo.com.cn

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

E-mail: qfcui@yahoo.cn(通信联系人)

成像质量,对衍射光学元件衍射效率的精确测量是十分必要的。

目前,已经有相关学者分析了衍射效率的计算方法^[7~9]以及加工误差对衍射效率的影响^[10~12],并提出了测量衍射效率的方法^[13~15]。由于实际测量衍射光学元件的衍射效率对于评价衍射光学元件的成像质量有重要意义。因此,本文讨论了衍射光学元件衍射效率的测量原理,并在此基础上给出了衍射光学元件衍射效率测量的双光路测试方法。对一个已经研制的折衍射混合光学系统,采用双光路测试装置在可见光波段范围内进行了衍射效率的测量。

2 衍射效率的含义

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^[16]为

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

式中 $\text{sinc } x = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$, m 为衍射级次, d 为衍射光学元件的表面微结构高度, $n(\lambda)$ 为衍射光学元件的基底材料在波长为 λ 时的折射率。从(1)式中的可以看出,单层衍射光学元件的衍射效率只在设计波长处具有 100% 的衍射效率;当偏离设计波长时,衍射光学元件的衍射效率会明显下降。

3 衍射效率的测量原理

衍射光学元件衍射效率的测量是通过含有衍射光学元件的折衍射混合成像光学系统的测量实现的。这种测量方法对含有衍射光学元件的折衍射混合成像光学系统的要求是:成像质量较好,星点像能量分布具有典型(标准)的衍射光斑特征,即要求衍射光学元件和整个光学系统的设计和加工质量均达到较高的水平。

通常,选用衍射光学元件的第 1 级衍射级次作为主衍射级次。实际测量衍射光学元件的衍射效率时,通过测量含有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 与透过混合光学系统的后焦面的总能量 E_0 之比来得到衍射效率:

$$\eta = \frac{E_1}{E_0}. \quad (2)$$

衍射光学元件衍射效率的具体测量方法是:在平行光管焦面上放置一个角半径适当的星点孔,以

使被测系统主衍射级次焦面上能够出现一个艾里衍射分布。选择一个适当大小的小孔光阑,放在被测系统焦面上。小孔光阑的大小最好能够使主衍射级的能量全部通过而次衍射级的能量则几乎全被挡住,以保证测量精度。但是,小孔光阑一般不可能使艾里分布的全部能量通过,只能使中央亮斑和邻近的若干亮环能量通过并被探测器接收到。如果焦面上光能分布是标准的艾里斑分布,那么通过小孔光阑尺寸可以计算得到通过小孔光阑的能量所占到 1 级衍射能量的比例大小以及通过小孔光阑所占的次级衍射能量的比例大小,进而可以更准确地计算出衍射效率。

实际测量衍射光学元件的衍射效率时,采用双光路的方法。原因是在前后两次光强测量之间有一定的时间间隔,激光器的功率波动性不可忽略,所以,采用双光路测量可以补偿激光器波动性对测量精度的影响。

4 衍射光学元件衍射效率的测量装置

4.1 衍射效率测量装置

衍射光学元件衍射效率的测量装置框图如图 1 所示,主要由光源(激光器)、分光镜、显微物镜、空间滤波器(针孔光阑)、平行光管和光电探测器等组成。平行光管使用实验室现有的焦距为 2000 mm 的长焦距平行光管,它与显微物镜、空间滤波器共同实现对激光器出射光束的扩束与准直。光电探测器选用双通道光功率计,光功率计可以把入射光强信号转换为电信号,双通道探测可以补偿激光器的波动性对测量结果的影响,提高测量结果的准确性。

具体实验装置如图 2 所示,从左到右沿光轴依次放置激光器、分光镜、显微物镜、空间滤波器、平行光管、挡板、被测的光学系统和探测器(光功率计的一个探头);分光镜的另一侧接光功率计的另一个探头。

测量时,首先测量出一级衍射光能量 E_1 ,同时记录参考光能量 E'_1 ;然后,取下光电探测器前方的小孔光阑,保持光探头位置不变,测得此时被测的光学系统后焦面上的总能量 E_0 和参考光能量 E'_0 。保持光探头位置不动是为了尽可能使用探测器光敏面上相同的位置来测量光强,以减少探测器表面响应灵敏度效应对测量结果准确性的影响。所以,衍射效率可以表示为

$$\eta = \frac{E_1 E'_0}{E'_1 E_0}. \quad (3)$$

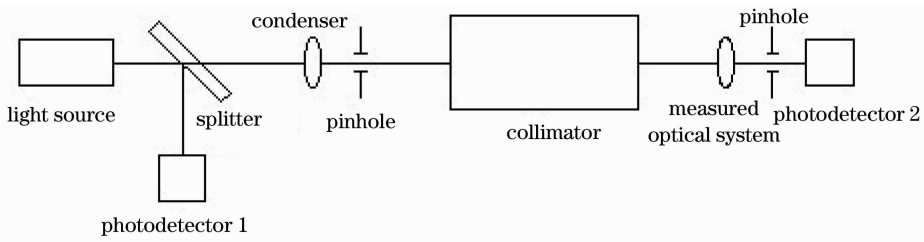


图 1 衍射效率测量实验装置框图

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

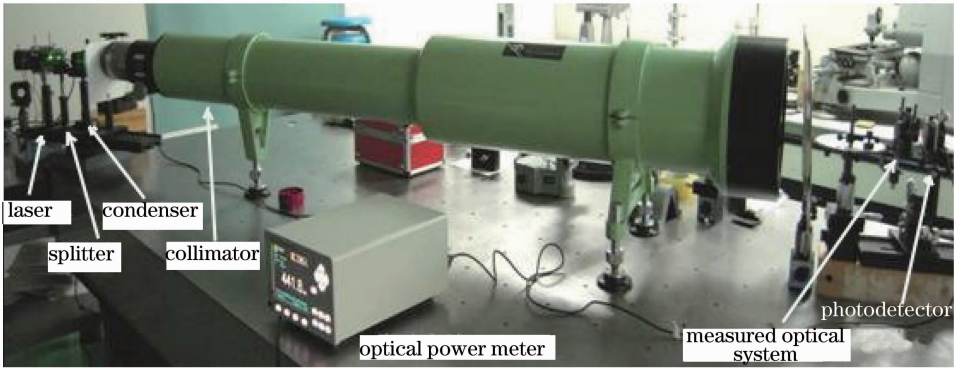


图 2 衍射光学元件衍射效率的测量装置

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

4.2 测量装置中针孔光阑的选择

光功率计探头前针孔光阑直径的选择,将直接影响衍射效率的测量精度。单层衍射光学元件的光焦度公式为

$$K_D = -2A_1 m \lambda, \quad (4)$$

式中 A_1 为衍射光学元件的二次位相系数。对于同一波长的光束通过衍射光学元件后会形成许多衍射级次,不同的衍射级次沿轴向展开,在同一焦面上对应有不同的成像高度。

根据衍射光学元件的光焦度计算公式,可以得到不同衍射级次与光轴的焦点位置。1级衍射与邻近的2,0级衍射级次的轴向距离分别为 d_2 和 d_0 ,2级和0级衍射在1级衍射像面上的高度分别为 h_2 和 h_0 ,如图3所示。当探测器前面的针孔光阑直径大小

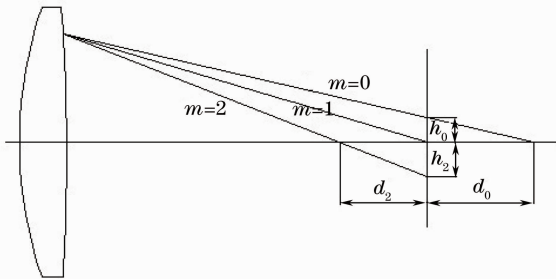


图 3 经过衍射光学元件后各衍射级次的分布图

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

选为 d 时,而,那么通过针孔光阑透过的2级和0级衍射光所占的比例分别为 $\frac{\pi(d/2)^2}{\pi h_2^2}$ 和 $\frac{\pi(d/2)^2}{\pi h_0^2}$ 。由此可以得到通过针孔光阑的次级衍射光所占的比例大小,进而准确计算衍射效率。对于以其他衍射级次为主衍射级次的情况,取主衍射级次邻近的2个衍射级次来分析即可。

5 被测的光学系统

含有单层衍射光学元件的折衍射混合光学系统如图4所示,系统的焦距为26.4 mm,设计波段范围为486.1~656.3 nm,中心波长为546.1 nm。衍射光学元件的设计中心波长与整个光学系统的中心波长相同。衍射光学元件位于透镜的后表面上。

对于待测的折衍射混合光学系统,在中心波长546.1 nm处,1级衍射与邻近的2,0级衍射的轴向距离分别为 $d_2 = 1.5045$ mm, $d_0 = 1.6980$ mm。在1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。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99.9999%,所以可以认为1级衍射光全部通过针孔光阑。若针孔光阑选择的较小,1级衍射光不能全部通过,那么探测器接

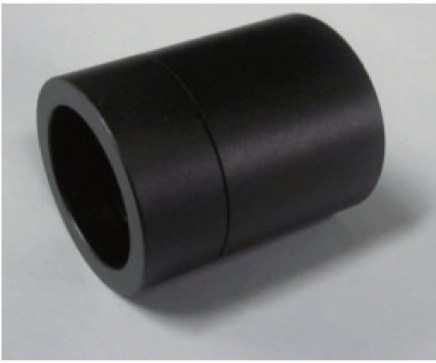


图 4 光学系统实物图

Fig. 4 Prototype of the optical system

收到的 1 级衍射光能量与孔径光阑范围内所包含的能量的比值即为实际的 1 级衍射光能量。通过针孔光阑透过的 2 级和 0 级衍射光所占的比例均为 $\frac{\pi(0.05)^2}{\pi(0.8158)^2} = 0.3756\%$ ，通过针孔光阑的次级衍射光所占的比例很小。由于在 1 级衍射光的最佳像面处次级衍射光所占的能量很小，所以，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。

6 衍射效率测量结果与分析

为了更准确的评价衍射光学元件的加工质量，分别选择 3 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 3 次实验的测量结果。

6.1 532 nm 波长处衍射效率的测量结果

光学系统的设计波长为 546.1 nm，在设计波长处的衍射效率可以达到 100%。由于没有找到波长为 546.1 nm 的激光器，而采用普通光源加滤光片会有一定的波带宽度，影响测量结果的准确性。所以，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，利用(1)式计算得到衍射光学元件衍射效率的理论值为 99.74%。

采用双光路的衍射效率测试方法，记录混合透镜 1 级衍射光的能量 E_1 与参考光路的能量 E'_1 ；混合透镜后焦面的总能量 E_0 和参考光路的能量 E'_0 。将数据代入(3)式计算得到衍射效率值如表 1 所示，则衍射光学元件在 532 nm 波长处衍射效率的平均值为 $\bar{\eta} = 95.02\%$ ，同理论值 99.74% 相比，测试结果有 4.72% 的偏差。

6.2 632.8 nm 波长处衍射效率的测量结果

对于波长为 632.8nm 的氦氖激光器，衍射光学

元件衍射效率的测量结果如表 2 所示。衍射效率的平均值为 $\bar{\eta} = 89.69\%$ ；而衍射光学元件在 632.8 nm 波长处的衍射效率理论值为 93.38%，测量结果偏差为 3.69%。

表 1 532 nm 波长处衍射效率的测量结果

Table 1 Measurement results of the diffraction efficiency at 532 nm

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	2.739	6.045	2.896	6.072	95.00
2	2.736	6.124	2.881	6.135	95.14
3	2.747	6.207	2.893	6.205	94.93

表 2 632.8 nm 波长处衍射效率的测量结果

Table 2 Measurement results of the diffraction efficiency at 632.8 nm

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	0.4153	1.502	0.4660	1.504	89.24
2	0.4285	1.513	0.4739	1.511	90.34
3	0.4193	1.521	0.4691	1.523	89.50

6.3 473 nm 波长处衍射效率的测量结果

对于波长 473 nm 的半导体激光器，衍射光学元件衍射效率的测量结果如表 3 所示，衍射光学元件的衍射效率平均值为 $\bar{\eta} = 88.98\%$ ；与理论值 91.18% 相比较，测量结果有 2.20% 的偏差。

表 3 473 nm 波长处衍射效率的测量结果

Table 3 Measurement results of the diffraction efficiency at 473 nm

No.	$E_1/\mu\text{W}$	$E'_1/\mu\text{W}$	$E_0/\mu\text{W}$	$E'_0/\mu\text{W}$	$\eta/\%$
1	3.070	10.35	3.452	10.32	88.68
2	3.066	10.36	3.443	10.37	89.13
3	3.059	10.41	3.442	10.44	89.12

6.4 衍射效率测量结果拟合曲线与理论曲线的对比

通过测量得到衍射光学元件的衍射效率在 473, 532, 632.8 nm 这 3 个波长处的衍射效率值。利用插值算法，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的 3 个波长的衍射效率值。从该图可以得到在 473~632.8 nm 波段范围内任意一个波长处对应的衍射效率测量值。通过将衍射效率测量结果的拟合曲线与理论曲线的对比可知，在任意波长处，衍射效率测量结果的偏差均小于 5.0%。

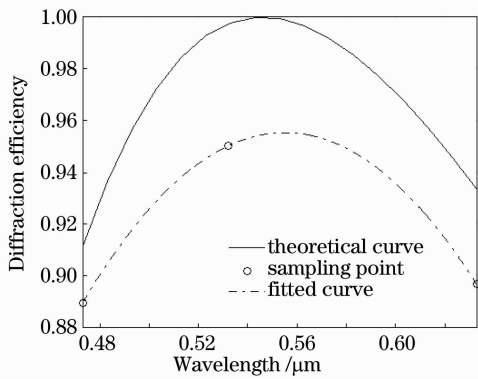


图5 衍射光学元件衍射效率的理论曲线和测量结果拟合曲线的对比

Fig. 5 Comparison of theoretical curve and the simulated curve of measurement results of the diffraction efficiency for diffractive optical elements

6.5 衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率

衍射光学元件的第 m 衍射级次的带宽积分平均衍射效率^[17]为

$$\bar{\eta}_m = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda, \quad (5)$$

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。

根据衍射光学元件衍射效率测量结果的拟合曲线,利用(5)式即可算出衍射光学元件在 473 ~ 632.8 nm 波段范围内的带宽积分平均衍射效率为 93.47%。按照理论计算的带宽积分平均衍射效率为 97.43%,偏差为 3.96%,该值反映了衍射光学元件的加工误差,同时,也说明了采用双光路测量装置对于测量衍射光学元件的衍射效率有重要的应用价值。

7 结 论

基于衍射光学元件衍射效率的定义,给出了衍射效率的测量原理,进一步阐明了测量衍射效率的双光路测量装置及其优点。讨论了测量装置中探测器前的针孔光阑大小的选择对测量结果准确性的影响。根据衍射光学元件的光焦度公式,可以得到次级衍射光在主衍射级像面上的成像范围,进而计算出通过针孔光阑的次级衍射光所占的比例。针对一个已经研制成功的折衍射混合成像光学系统,分别选择 3 个激光波长,采用双光路测量方法在不同时间对被测系统多次进行衍射效率的测量。通过将衍射效率测量结果的拟合曲线与理论曲线进行对比可以看出,在任意波长处,衍射效率测量结果的偏差均

小于 5.0%。双光路测量装置可以用于测量衍射光学元件的衍射效率。

参 考 文 献

- Andrew P. Wood, Philip J. Rogers. Diffractive optics in modern optical engineering [C]. *SPIE*, 2005, **5865**: 83~97
- Michael D. Missig, G. Michael Morris. Diffractive optics applied to eyepiece design [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2452~2461
- Cui Qingfeng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 12~16
崔庆丰. 折衍混合成像光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(1): 12~16
- J. Allen Cox. Application of diffractive optics to infrared imagers [C]. *SPIE*, 1995, **2552**: 304~312
- Lü Yinhuan, Zhang Tao, Tong Guanghui *et al.*. Design of optical system based on diffraction optics for infrared weak target detection [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(6): 543~549
吕银环, 张涛, 童广辉等. 基于衍射光学元件的红外弱目标探测系统设计 [J]. 中国光学, 2009, **2**(6): 543~549
- C. Gary Blough, M. Rossi, Stephen K. Mack *et al.*. Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements [J]. *App. Opt.*, 1997, **36**(20): 4648~4654
- Zou Kai, Deng Xiaopeng, Li Shen. Efficiency study for diffractive optical element [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(4): 46~49
邹凯, 邓晓鹏, 李慎. 衍射光学元件的效率研究 [J]. 光学与光电技术, 2005, **3**(4): 46~49
- Chen Dewei, Li Yongping. Limitation of scalar method to the analysis and design of diffractive optics elements [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6): 9~13
陈德伟, 李永平. 衍射光学元件分析和设计中标量理论的局限性 [J]. 光电工程, 2004, **31**(6): 9~13
- Zhang Wei, Gong Yan. Vector analysis of diffractive optical elements for off-axis illumination of projection lithographic system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1005002
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件的矢量分析 [J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1005002
- Thomas Hessler, Markus Rossi, Rino E. Kunz *et al.*. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19): 4069~4079
- 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, 林婉媚等. 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
- 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
- Cui Qingfeng. Studies of Hybrid Diffractive-Refractive Optical Systems [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 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
- Wang Zhiheng, Chen Ying, Du Chunlei. Measurement and analysis of diffraction efficiency of Fresnel microlens arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 41~48
王植恒, 陈英, 杜春雷. 菲涅耳微透镜阵列衍射效率的测试与分析 [J]. 光学学报, 1998, **18**(1): 41~48

- 15 Mi Fengwen, Yang Guoguang, Sheng Yibing. Measurement of diffraction efficiency of infrared hybrid optical system and its realization[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(3): 353~360
米凤文, 杨国光, 沈亦兵. 红外混合光学系统衍射效率的测量方法及其实现[J]. *光学技术*, 2006, **32**(3): 353~360
- 16 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
- 17 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

栏目编辑: 何卓铭