

文章编号 : 0258-7025(2001)10-0909-04

# 入射光波波长对菲涅耳透镜 衍射效率的影响

李红军 李凤友 卢振武 廖江红 翁志成

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

**提要** 使用离子束刻蚀法成功制作高衍射效率 16 阶菲涅耳透镜。菲涅耳透镜的衍射效率是评价菲涅耳透镜质量的一个重要指标。对于宽带光学系统,除设计、制作误差外,入射光波波长对菲涅耳透镜的衍射效率也有影响。针对宽带折衍混合光学系统,分析不同入射光波波长对菲涅耳透镜衍射效率的影响。使用四种不同光源,对菲涅耳透镜的衍射效率进行测试。指出在短波方向,衍射效率下降较多;在长波方向,衍射效率下降较少。

**关键词** 宽带光学系统 菲涅耳透镜 衍射效率

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

## Effect of Incident Wavelength on Diffractive Efficiency of Fresnel Lens

LI Hong-jun LI Feng-you LU Zhen-wu LIAO Jiang-hong WENG Zhi-cheng

(The State Key Laboratory of Applied Optic, Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

**Abstract** 16-step Fresnel lens of high diffractive efficiency is fabricated by ion beam etching. Diffractive efficiency of Fresnel lens is important factor to evaluate the quality of Fresnel lens. The incident wavelength, except fabrication errors, has effect on diffractive efficiency of Fresnel lens for broadband diffractive-refractive hybrid optical system. The effects of incident wavelength on diffractive efficiency of Fresnel lens are analyzed. Four kinds of laser source are used to measure the diffractive efficiency of Fresnel lens. It is pointed that the diffractive efficiency decreases greatly in short wavelength, but one decreases smally in long-wavelength.

**Key words** broadband optical system, Fresnel lens, diffractive efficiency

## 1 引言

衍射光学元件可以任意改变入射光波的位相,实现许多折射光学元件不能实现的功能。同时,与折射光学元件相比,衍射光学元件还具有体积小、重量轻和可复制的优点。因此,在光互连<sup>[1,2]</sup>、光束整形、光通信和全息显示、光学扫描<sup>[3]</sup>等许多领域得到广泛的应用。

菲涅耳透镜及阵列是经常使用的衍射光学元件。与传统的折射光学元件相比,衍射光学元件由于多个衍射级的存在,产生多个像。主衍射级之外的其他像点,在像面上形成背景光,降低了像的对比度。因此,菲涅耳透镜的衍射效率对光学系统的成像质量影响较大,一些文献已经讨论了衍射效率对光学传递函数的影

响<sup>[4,5]</sup>。指出衍射效率的下降,造成光学传递函数下降,背景噪声增加。在实际应用中,要求菲涅耳透镜具有较高的衍射效率。但在制作过程中,不可避免地引入掩模对准误差、线宽误差和台阶高度误差,造成衍射效率的下降,许多人研究了制作误差对衍射效率的影响<sup>[6,7]</sup>。此外,衍射效率还是入射光波波长的函数,当入射光波长偏离设计波长时,衍射效率也会下降。文献<sup>[8]</sup>和<sup>[9]</sup>详细讨论了衍射效率随入射波长的变化。对于宽带光学系统,在评价系统的成像质量时,必须考虑入射光波波长与衍射效率的关系。在这篇文章中,针对具体的宽带折衍混合光学系统,讨论菲涅耳透镜不同级次的衍射效率随入射光波波长的变化,给出该系统的积分衍射效率理论值。同时,使用四种不同波长的光源进行菲涅耳透镜衍射效率的测试,指出在短波方向,衍射效率下降较多;在长波方向,衍射效率下降较少。这对于衍射

光学元件在光学系统中的实际应用具有重要意义。

## 2 菲涅耳透镜的衍射效率

在傍轴近似情况下,菲涅耳透镜的位相函数为<sup>[8,9]</sup>

$$\phi(r) = 2\pi\alpha \left( n - \frac{r^2}{2\lambda_0 f} \right), r_n \leq r \leq r_{n+1} \quad (1)$$

$$r_n^2 = 2\lambda_0 f n, n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

$r_n$  为每个环带的边界,  $\lambda_0$  为设计波长,  $f$  为焦距,  $N$  为环带总数, 参数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[ \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] \quad (3)$$

$n(\lambda)$  和  $n(\lambda_0)$  分别对应于入射光波波长为  $\lambda$  和  $\lambda_0$  时, 基底材料的折射率。一般情况下, 二者相差很小, 上式可写为

$$\alpha = \lambda_0 / \lambda \quad (4)$$

菲涅耳透镜的复振幅透过函数可表示为

$$t(r) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -i\pi \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - m \right) \right] \times \text{sinc} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - m \right) \exp \left( -\frac{i\pi m r^2}{\lambda_0 f} \right) \quad (5)$$

假设单位振幅平面波垂直入射, 则  $m$  级衍射光波的衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - m \right) \quad (6)$$

由上式可以看出, 对于不同的入射波长, 菲涅耳透镜的衍射效率不同。对于宽带折衍混合光学系统, 定义积分衍射效率作为评价系统成像质量的一个重要参数,  $m$  级衍射光波积分衍射效率  $\eta_{\text{mint}}$  为

$$\eta_{\text{mint}} = \frac{\int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \eta_m(\lambda) d\lambda}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}} \quad (7)$$

对于我们设计制作的折衍混合光学系统, 工作波带为  $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ , 设计波长为  $0.7 \mu\text{m}$ 。应用公式(6), 计算菲涅耳透镜 0 级、1 级、2 级和 3 级衍射效率随入射光波长的变化。计算结果如图 1 所示: 当入射光波长偏离设计波长时, 1 级衍射效率将下降。入射光波长偏离设计波长越多, 衍射效率下降得越多。相反, 其他级次的衍射效率则增加, 入射光波长偏离设计波长越多, 衍射效率增加越多。菲涅耳透镜的 1 级衍射效率在短波方向下降得很厉害, 波长为  $0.5 \mu\text{m}$  时, 衍射效率下降约 42%。2 级衍射效率在短波方向上升得很快, 波长为  $0.5 \mu\text{m}$  时, 衍射效率上升约 25%。而在长波方向, 1 级衍射效率下降得较少, 波长为  $0.9 \mu\text{m}$  时, 衍射效率下

降约 15%。0 级衍射效率在长波方向上升得较快, 波长为  $0.9 \mu\text{m}$  时, 衍射效率上升约 7%。所以在宽带光学系统中, 入射光波波长对菲涅耳透镜衍射效率的影响非常大, 尤其在短波方向。在实际应用中, 使用积分衍射效率评价入射光波波长对宽带光学系统成像质量的影响。对于上述光学系统, 在理想情况下, 其积分衍射效率为 90.5%, 满足实际应用的要求。

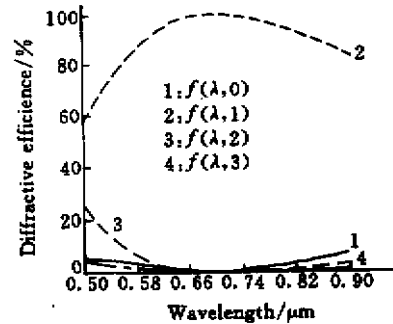


图 1 不同衍射级次衍射效率随入射光波波长的变化

Fig.1 Diffraction efficiency relates to incident wavelength in the various diffractive orders

## 3 菲涅耳透镜的制作

使用离子束刻蚀法制作有效直径  $\phi 80 \text{ mm}$  的 16 阶菲涅耳透镜, 最小特征宽度为  $23.24 \mu\text{m}$ , 设计波长  $\lambda_0$  为  $0.7 \mu\text{m}$ 。菲涅耳透镜总刻蚀深度为  $1281.75 \text{ nm}$ 。WYKO 表面轮廓仪用来分析元件的制作质量。图 2 为使用 WYKO 轮廓仪测试的菲涅耳透镜二维浮雕结构图, 图 3 为菲涅耳透镜三维浮雕结构图。

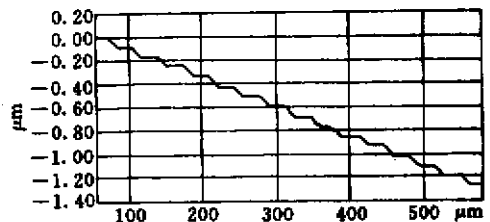


图 2 单个周期 16 阶菲涅耳透镜的二维图形

Fig.2 Two-dimension profile of Fresnel lens with 16-step in single period

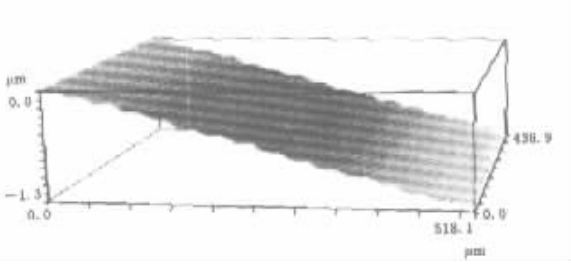


图 3 单个周期 16 阶菲涅耳透镜的三维图形

Fig.3 Three-dimension profile of Fresnel lens with 16-step in single period

## 4 菲涅耳透镜衍射效率的测试

第 2 节我们分析了入射光波波长偏离设计波长时菲涅耳透镜衍射效率的变化,那是在不考虑设计、制作误差的情况下得出的结果。设计误差是指使用量化的台阶结构近似代替连续轮廓引起的误差,对于特定的元件是个常数(对于设计波长 8 阶菲涅耳透镜设计误差是 5%,16 阶菲涅耳透镜设计误差是 1%)。制作误差指元件制作过程中引入的对准误差、线宽误差和刻蚀深度误差。由于制作误差的影响,衍射效率将发生变化。很多人研究单色光入射情况下制作误差对衍射效率的影响。对于宽带光学系统,衍射效率随入射波长的变化还仅局限在理论研究范围<sup>[10,11]</sup>。为了具体分析入射波长变化对菲涅耳透镜衍射效率的影响,我们使用四种光源进行菲涅耳透镜衍射效率的测试。四种光源的波长分别为 532 nm、632.8 nm、670 nm 和 808 nm。

衍射效率定义为主衍射级光强与入射光强之比,我们使用的主衍射级是 1 级衍射。在测量入射光强时,在原菲涅耳透镜的地方使用一块与菲涅耳透镜基底材料、厚度都相同的平板基底,用来补偿基底的吸收和反射。而主衍射级的光强直接测量得到。在测量过程中,外界的杂散光及激光光源的波动对衍射效率的测量有很大影响。为了消除光源波动的影响,将入射光分成两束,一束经针孔滤波,再准直后,得到均匀的平行光束,作为照明光源;另一束作为参考光用来确定激光光源的波动。杂散光的影响可以通过小孔遮拦来减小,实验装置如图 4 所示。测量时,首先测量出 1 级衍射光光强  $E_1$ ,同时测量出参考光束的光强  $E_1'$ 。然后,使用平板基底代替菲涅耳透镜,测量总的入射光强  $E_2$ ,同时测量出参考光束的光强  $E_2'$ 。则菲涅耳透镜的 1 级衍射效率为

$$\eta = \frac{E_1 E_2'}{E_2 E_1'} \quad (8)$$

在测试过程中,采用上述四种激光波长测得的菲涅耳透镜的衍射效率分别为 65.1%、91.1%、92.5% 和 88.1%。可以看出,在短波方向,衍射效率下降较多。而在长波方向,衍射效率下降相对较少。这与理论计算得到的结论一致。入射波长不同时,衍射效率的理论值(不考虑设计、制作误差)与测量值的比较见表 1。从表中可以看出,相对于理论值,衍射效率分别下降 6.1%、5.3%、6.9% 和 6.2%,平均下降约 6.1%。这部分衍射效率的损失主要由元件的制作误差引起。在这些制作误差中,对准误差及线宽误差对菲涅耳透镜衍射效率的影响较大,而台阶高度误差及其他误差影响较小。在实际制作过程中,应尽量控制对准误差和线宽误差,尽可能减小衍射效率的损失。

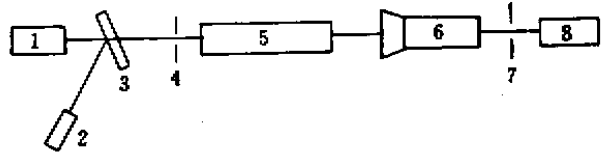


图 4 测试菲涅耳透镜衍射效率的实验装置图

1 光源 2 光电探测器 1 3 分束器 4 针孔;  
5 平行光管 6 CCD 相机 7 小孔 8 光电探测器 2

Fig.4 Measured setup of the diffractive efficiency of the Fresnel lens

1 : light source ; 2 : photodetector 1 ; 3 : splitter ; 4 : pinhole ;  
5 : collimator ; 6 : CCD camera ; 7 : aperture ; 8 : photodetector 2

表 1 不同入射波长时菲涅耳透镜衍射效率测量值与理论值的比较

Table 1 Comparison the measured data of diffractive efficiency with the theoretical one for different wavelength

$\lambda / \text{nm}$	532	632.8	670	808
$\eta_{\text{measured}} / \%$	65.1	91.1	92.5	88.1
$\eta_{\text{theoretical}} / \%$	71.2	96.4	99.4	94.3
Derivation / %	6.1	5.3	6.9	6.2

## 5 结束语

使用离子束刻蚀法作用于宽带折衍混合 CCD 相机光学系统的高衍射效率 16 阶菲涅耳透镜(光源波长为 670 nm 时,衍射效率为 92.5%)。对于宽带折衍混合光学系统,除设计、制作误差外,入射光波波长对菲涅耳透镜的衍射效率也有影响。为了具体讨论入射光波波

长变化对菲涅耳透镜衍射效率的影响,使用四种不同光源对菲涅耳透镜的衍射效率进行测试。发现入射光波偏向短波时,衍射效率下降得较多;入射光波偏向长波时,衍射效率相对下降较少。由于衍射效率对折衍混合光学系统的成像质量影响较大,必须严格控制制作误差,尤其是对准误差和线宽误差。

### 参 考 文 献

- 1 J. Turunen, J. Fagerholm, A. Vasara *et al.*. Detour-phase kinoform interconnects: The concept and fabrication considerations. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(7): 1202 ~ 1208
- 2 M. R. Feldman, C. C. Guest. Computer generated holographic optical elements for optical interconnection of very large scale integrated circuits. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20): 4377 ~ 4384
- 3 O. Bryngdahl, W. H. Lee. Laser beam scanning using computer generated holograms. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(1): 183 ~ 194
- 4 Dale A. Buralli, G. Michael Morris. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4389 ~ 4396
- 5 Dean Faklis, Michael J. Hoppe. Effects of diffraction efficiency on the performance of diffractive relay optics. *SPIE*, 1994, **2218**: 115 ~ 119
- 6 M. E. Motamedi, W. E. Tennant, R. Melendes *et al.*. FPAs and thin film binary optic microlens integration. *SPIE*, 1996, **2687**: 70 ~ 77
- 7 M. E. Motamedi, W. H. Southwell, R. J. Anderson *et al.*. High speed binary optic microlens array in GaAs. *SPIE*, 1991, **1544**: 33 ~ 44
- 8 Dale A. Buralli, G. Michael Morris, John R. Rogers. Optical performance of holographic kinoforms. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(5): 976 ~ 983
- 9 Dean Faklis, G. Michael Morris. Spectral properties of multiorder diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2462 ~ 2468
- 10 Dean Faklis, Michael J. Hoppe. Effects of diffraction efficiency on the performance of diffractive relay optics. *SPIE*, 1994, **2218**: 115 ~ 119
- 11 Carmina Londono, Peter P. Clark. The design of achromatized hybrid diffractive lens systems. *SPIE*, 1990, **1354**: 30 ~ 37