

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1134-05

表面反射对菲涅耳透镜的影响

李红军 卢振武 廖江红 翁志成 郑宣明 赵晶丽

(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)

摘要: 使用薄膜沉积法制作 16 阶菲涅耳透镜,用它代替常规的光学透镜可实现系统的轻量化、小型化,并增加系统设计的自由度。在标量衍射理论的基础上,应用菲涅耳公式和傅里叶变换分析 SiO_2 薄膜和基底的表面反射对菲涅耳透镜 -1 级衍射效率的影响,结果表明表面反射对菲涅耳透镜的成像质量影响较大,可以通过蒸镀增透膜来减小这种影响。

关键词: 薄膜沉积;菲涅耳透镜;表面反射;衍射效率
中图分类号: TB851+.9 文献标识码: A

1 引 言

1988 年,Swanson 和 Veldkamp 等人^[1]在红外光学系统中应用衍射光学元件校正单透镜的轴上色差和球差。从此,越来越多的光学研究人员开始进行衍射透镜在光学成像领域的应用研究。衍射光学透镜的使用,不仅可以增加光学设计的自由度,而且能够突破传统光学系统的许多局限性。在改善系统像质、减小体积和降低成本等多方面都表现出传统光学系统无可比拟的优势。

衍射光学元件的制作技术主要包括激光束或电子束直写^[2]、反应离子束刻蚀^[3]及离子束铣、薄膜沉积^[4,5]。这些方法各有优缺点:激光直写或电子束直写可制作连续结构,但工艺过程比较复杂、制作成本较高。反应离子束刻蚀及离子束铣应用比较广泛,但它存在两个缺陷:一是对元件表面损伤较大;二是刻蚀深度很难控制。薄膜沉积法则克服了这两个缺点,可以精确控制台阶高度并得到比较光滑的表面。图 1 是薄膜沉积法制作菲涅耳透镜的示意图。我们使用薄膜沉积方法制作了 16 阶菲涅耳透镜。它已被用于我们自己设计制作的 CCD 折射衍射混和光学系统中。用它代替常规的光学透镜,不但可以更好地校正系统像差,还可实现系统的轻量化、小型化,增加系统设计的自由度。

菲涅耳透镜在制作过程中,主要存在对准误差、线宽误差及刻蚀深度误差。此外,光在菲涅耳透镜表面发生表面反射现象,引起光能的损失,降低衍射效率。一些文献在进行误差分析时^[4,5],主要考虑

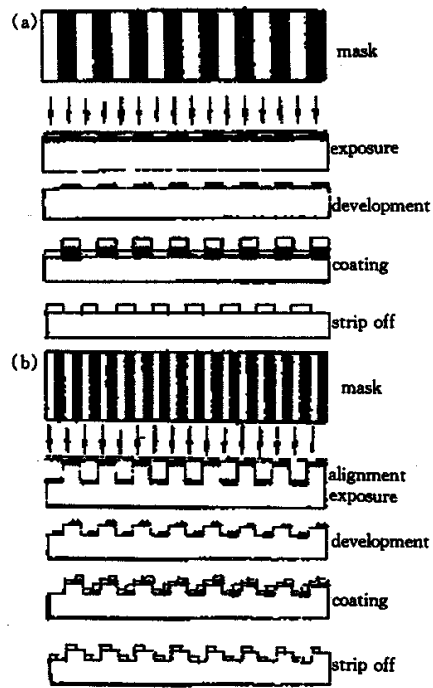


Fig.1 Diagram of Fresnel lens fabricated by thin film deposition

光刻过程中的对准误差及线宽误差对菲涅耳透镜衍射效率的影响,没有考虑表面反射对菲涅耳透镜衍射效率的影响。实际上,由于表面反射带来光能的损失以及产生杂散光,它对菲涅耳透镜的成像质量影响较大。使用离子束刻蚀法制作的菲涅耳透镜,在基底上下两个表面产生反射,不存在干涉现象。而使用薄膜沉积法制作的菲涅耳透镜,蒸镀材料与基底折射率不同,光在蒸镀材料表面及基底表面将产生反射。同时,由于蒸镀的 SiO_2 薄膜较薄,薄膜表面的反射光与基底上表面的反射光发生多光束干

涉现象,问题变得比较复杂。为了分析表面反射对菲涅耳透镜成像质量的影响,我们在标量衍射理论的基础上,应用菲涅耳定律以及傅里叶变换对菲涅耳透镜的-1级衍射效率进行计算机模拟计算,得到不同台阶数、不同制作方法的菲涅耳透镜的衍射效率。通过对比理想情况与考虑表面反射时-1级衍射效率的变化,讨论表面反射对菲涅耳透镜成像质量的影响。这一结果对菲涅耳透镜的制作和应用具有很大意义。

2 基本原理

菲涅耳透镜是基于菲涅耳波带片的近场衍射,将菲涅耳波带片的图形制成量化的闪耀相位结构,以获得较高的衍射效率。薄膜沉积法制作菲涅耳透镜是采用多个掩模、多次套刻的加工方法,在玻璃基底上蒸镀或溅射沉积不同厚度的薄膜。图2是N阶相位结构的示意图。

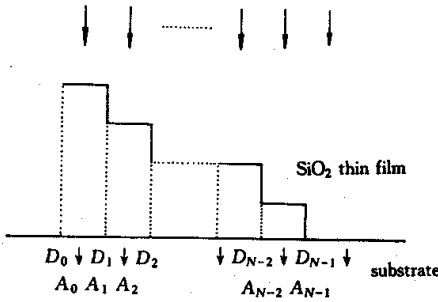


Fig. 2 N-step phase structure

当光束入射到薄膜上时,将在薄膜内产生多次反射,并且从薄膜的两表面有一系列互相平行的光束射出,如图3所示。

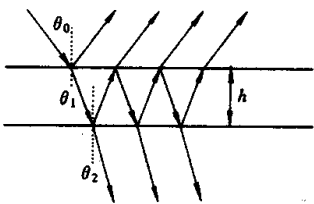


Fig. 3 The reflection and transmission of single film

设薄膜厚度为 h , 折射率为 n_1 , 薄膜两边的空气和基片的折射率分别为 n_0 和 n_2 , 并设光从空气进入薄膜时在界面上的反射系数和透射系数分别为 r_1 和 t_1 , 光从薄膜进入基片时在界面上的反射系数和透射系数分别为 r_2 和 t_2 , 考虑到多光束干涉, 薄膜的透射系数 t 、反射系数 r 分别为^[6]

$$t = \frac{t_1 t_2}{1 + r_1 r_2 \exp(i\delta)}, \quad (1)$$

$$r = \frac{r_1 + r_2 \exp(i\delta)}{1 + r_1 r_2 \exp(i\delta)}, \quad (2)$$

式中, 相继两束光的相位差 $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 h \cos\theta_1$, $n_1 h$ 是膜层的光学厚度, λ 是光波在真空中的波长。

当光束入射到基底下表面时, 基底的反射系数 r_3 及透射系数 t_3 为

$$r_3 = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (3)$$

$$t_3 = -\frac{2\sin\theta_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (4)$$

对于薄膜沉积法制作的菲涅耳透镜, 其相位台阶高度为波长量级, 存在多光束干涉现象。由于各台阶的高度不同, 其透射系数也不同。对于离子束刻蚀法制作的菲涅耳透镜, 由于基底较厚, 不存在多光束干涉现象, 其基底的透射系数由(4)式确定。我们设计制作的菲涅耳透镜, 其特征尺寸与工作波长相比较较大, 所以可以使用标量衍射理论和傍轴近似来进行分析。以菲涅耳透镜的一个周期为例, 当单位振幅平面波垂直入射时, 其透射函数为

$$f(x) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left[\frac{x - (T + 2nT)/2N}{T/N}\right] \exp(in\varphi), \quad (5)$$

式中, rect 为矩形函数, n 为台阶数, N 为量化的台阶总数, T 为菲涅耳透镜的周期大小, φ 为单个台阶引入的相位差。远场情况下, 菲涅耳透镜的 m 级衍射光波的复振幅分布为

$$C_m = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) \exp(-i2\pi mx/T) dx, \quad (6)$$

则菲涅耳透镜的-1级衍射效率为

$$\eta_{-1} = |C_{-1}|^2 = \frac{1}{T^2} \left| \int_0^T f(x) \exp(i2\pi x/T) dx \right|^2. \quad (7)$$

考虑 SiO_2 薄膜的多光束干涉与基底另一侧的表面反射, 菲涅耳透镜的-1级衍射效率为

$$\eta_{-1} = \frac{1}{T^2} \left| \int_0^T f_1(x) \exp(i2\pi x/T) dx \right|^2, \quad (8)$$

其中, $f_1(x)$ 为

$$f_1(x) = \sum_{n=0}^{N-1} t_1(x) t_2(x) \times \text{rect}\left[\frac{x - (T + 2nT)/2N}{T/N}\right] \exp(in\varphi) \quad (9)$$

$t_1(x)$ 、 $t_2(x)$ 分别为菲涅耳透镜上下表面不同位置的透射系数。对离子束刻蚀法制作的菲涅耳透镜,上下表面透射系数的绝对值相等,其值由(4)式确定。

3 计算机模拟计算结果

在正入射条件下,我们分别对 4 阶、8 阶、16 阶的菲涅耳透镜的 -1 级衍射效率进行了计算机模拟计算,在计算过程中,没有考虑制作误差和材料的吸收。不同的制作方法,不同台阶数的菲涅耳透镜的 -1 级衍射效率如表 1 所示。

从表 1 我们可以看出:在考虑表面反射之后,使用薄膜沉积和离子束刻蚀法制作的菲涅耳透镜的衍射效率均下降很大。对于薄膜沉积法制作的 4 阶、8

Table 1. The effects of surface reflection on different Fresnel lens

Step number	diffractive efficiency/% (by thin film deposition)	diffractive efficiency /% (by ion beam etching)	perfect case/% (without absorption and reflection)
four steps	74.9	74.4	81.1
eight steps	87.8	87.2	95.0
sixteen steps	91.3	90.6	98.7

4 16 阶菲涅耳透镜的制作和在 CCD 相机中的初步应用

为了实现系统的轻量化、小型化,增加系统设计自由度,并且更好地校正系统像差,我们在 CCD 相机的设计、制作过程中引入菲涅耳透镜。我们研制的轻型折射衍射混合 CCD 相机焦距为 320 mm,相对孔径为 1/5,工作波段为 $0.5 \mu\text{m} \sim 0.9 \mu\text{m}$ 。菲涅耳透镜的引入,使折射衍射混合 CCD 相机的重量和体积大大减小,与同类型传统 CCD 相机相比,其重量减轻约 40%,光学系统总长减短 14%,而成像质量好于传统的 CCD 相机^[7]。

在实际应用中,更注重菲涅耳透镜的衍射效率。我们设计的菲涅耳透镜将光能量主要集中在 -1 级。模拟计算过程中发现,量化台阶数目越多,-1 级衍射效率越大,其他衍射级能量分布越平均。因此,使用薄膜沉积法制作菲涅耳透镜时,我们选择 16 阶菲涅耳透镜,理想情况下,其衍射效率接近 99%,足以满足我们的要求。

如果进一步增加量化台阶的数目,衍射效率没有明显增加,且加工难度加大,没有实际意义。我们采用 4 个掩模、4 次套刻的方法在 K_9 玻璃基底上真空蒸镀 SiO_2 薄膜制作 16 阶菲涅耳透镜。其直径 φ 为 80 mm,最小特征宽度为 $23.24 \mu\text{m}$ 。设计波长

阶和 16 阶菲涅耳透镜,考虑 SiO_2 薄膜的多光束干涉现象和基底的表面反射后,菲涅耳透镜的 -1 级衍射效率分别下降 6.2%、7.2% 和 7.4%。

对于离子束刻蚀法制作的 4 阶、8 阶和 16 阶菲涅耳透镜,菲涅耳透镜的 -1 级衍射效率分别下降 6.7%、7.8% 和 8.1%。比较起来,使用薄膜沉积法制作的菲涅耳透镜,衍射效率下降得相对小些,这是由于 SiO_2 薄膜的折射率小于基底的折射率,具有一定的增透作用(SiO_2 薄膜和基底的折射率分别为 1.457 和 1.512)。对于我们使用薄膜沉积法制作的 16 阶菲涅耳透镜,由于表面反射的存在,-1 级衍射效率下降 7.4%,这对菲涅耳透镜的成像质量影响较大。

λ_0 为 $0.7 \mu\text{m}$,每次蒸镀的 SiO_2 薄膜高度分别为 95.73 nm、191.46 nm、382.92 nm 和 765.84 nm,总高度为 $1.436 \mu\text{m}$ (每次蒸镀的 SiO_2 薄膜高度 $d_i = \lambda_0/2^{4-i}(n'_1 - 1)$, i 为套刻次数, n'_1 为 SiO_2 的折射率)。

图 4 是使用 WYKO 轮廓仪测试的菲涅耳透镜二维浮雕结构图。

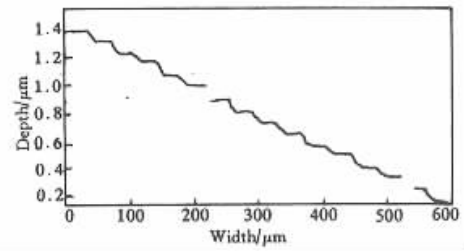


Fig. 4 Two dimensions figure of single period Fresnel lens

图 5 是菲涅耳透镜三维浮雕结构图。

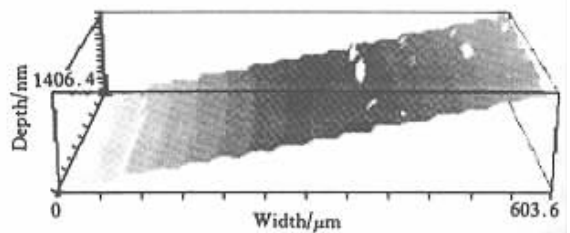


Fig. 5 Three dimensions figure of single period Fresnel lens

可以看出,使用薄膜沉积法制作的菲涅耳透镜各台阶的表面比较光滑且无明显的对准误差。实际测量得到的台阶总高度为 $1.392 \mu\text{m}$, 相对台阶高度误差为 3.1% , 在误差允许范围内,它对菲涅耳透镜的衍射效率影响较小。台阶的侧壁不是很陡,这种情况是由于掩模边缘的衍射、基底的反射引起的,它对菲涅耳透镜的成像质量影响较小^[8]。由计算机模拟计算可以看出:表面反射对菲涅耳透镜衍射效率的影响比较大。对于我们制作的菲涅耳透镜,衍射效率将下降 7.4% 。为此,我们在菲涅耳透镜的上下表面各蒸镀一层增透膜,尽量减小表面反射对菲涅耳透镜的影响,增加它的衍射效率。在菲涅耳透镜镀完增透膜之后,使用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光,测得其衍射效率接近 87% 。理想情况下,对于入射波长为 λ 的单色光波,菲涅耳透镜的 -1 级衍射效率为^[9]

$$\eta^{-1} = \text{sinc}^2(\lambda_0/\lambda - 1). \quad (10)$$

Table 2. Measured results of first zone width in Fresnel lens

design width/ μm	measured width/ μm	measured width/ μm	measured width/ μm	measured width/ μm
208.25	209.40	205.75	208.40	203.95

我们取 4 次测量结果的平均值作为实测宽度,则实测宽度为 $206.87 \mu\text{m}$ 。这样,第一次套刻的相对线宽误差为 0.7% 。由于以后套刻过程中将出现对准误差,无法直接测量线宽误差,而在相同的工艺条件下,各次套刻的相对线宽误差基本相等。所以,各次套刻相对线宽误差均取 0.7% 。

利用上述结果得出,在现有的工艺条件下,线宽误差带来的衍射效率损失为 2% ,这是可以接受的。对于台阶高度误差,假设台阶高度误差比较均匀(各次套刻时,相对台阶高度误差相等),测量得到相对台阶高度误差为 3.1% ,其使菲涅耳透镜衍射效率下降 0.4% ,这在允许误差范围之内。与理论值相比,衍射效率还有 7% 的损失,这主要由掩模对准误差引起。

结束语 使用薄膜沉积法制作 16 阶菲涅耳透镜,不但可以得到较光滑的表面,而且可以精确控制台阶高度。在标量衍射理论的基础上,使用菲涅耳公式及傅里叶变换,通过计算机模拟计算讨论 SiO_2 薄膜及基底的表面反射对菲涅耳透镜衍射效率的影响。计算结果表明,表面反射对菲涅耳透镜衍射效率的影响较大,尤其对于 16 阶菲涅耳透镜。为了减小

λ_0 为设计波长,等于 $0.7 \mu\text{m}$ 。所以,理想情况下,对于 He-Ne 激光,菲涅耳透镜的衍射效率为 96.4% 。测量值与理论值相差 9.4% ,其原因如下:

1) 掩模制作误差、对准误差及线宽误差将大大降低衍射效率。

2) 台阶高度误差将引起相位延迟误差,并改变光波的远场分布,这将导致衍射效率的下降。

3) 蒸镀材料的折射率不能完全满足要求,表面反射现象仍然存在。同时,台阶表面粗糙度引起入射光的散射,从而降低衍射效率。

上述误差中,对菲涅耳透镜衍射效率影响较大的有掩模对准误差、线宽误差和台阶高度误差。掩模对准误差由于不能精确测量,很难定量描述。而线宽误差和台阶高度误差可以通过精密的测量定量描述。我们使用 WYKO 表面轮廓仪测量了第一次套刻第一个环带的宽度,设计宽度与实测宽度如表 2 所示^[10]。

SiO_2 薄膜表面反射的影响,可以在菲涅耳透镜上表面蒸镀增透膜。而基底下表面反射的影响也可以通过蒸镀增透膜来减小。

参 考 文 献

- [1] Swanson G J, Veldkamp V B. Infrared application of diffractive optical elements. *Proc. SPIE*, 1988, **883**: 155 ~ 162
- [2] Harurna M, Takahashi M, Wakahayashi K *et al.*. Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34): 5120 ~ 5126
- [3] Guo Yongkang, Su Jingqin, Du Jinglei *et al.*. Binary optical element for dividing harmonic waves. *Proc. SPIE*, 1998, **3557**: 161 ~ 167
- [4] Motamedi M E, Tennant W E, Gluck N S *et al.*. FPAs and thin film binary optic microlens integration. *Proc. SPIE*, 1996, **2687**: 70 ~ 77
- [5] Motamedi M E, Southwell W H, Anderson R J *et al.*. High speed binary microlens in GaAs. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 33 ~ 44
- [6] 梁铨廷. 物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1987. 27 ~ 32, 134 ~ 137
- [7] Weng Zicheng, Lu Zhenwu, Zhang Xin. Lightweight, remote-sensing CCD camera with binary optical element. *Proc. SPIE*, 1998, **3482**: 616 ~ 626
- [8] 李红军, 卢振武, 廖江红等. 离子束刻蚀过程中台阶侧壁倾斜现象研究. 微细加工技术, 2000, (2): 28 ~ 33

[9] 曹颖晶. 衍射光学系统背景光引起传递函数下降补偿方法的研究. 长春光学精密机械与物理研究所硕士学位论文. 2000. 28 ~ 31

[10] 李红军, 卢振武, 廖江红 等. 线宽误差对菲涅耳透镜衍射效率的影响. 光子学报, 2000, 29(6) 559 ~ 563

Effect of Surface Reflection on Fresnel Lens

Li Hongjun Lu Zhenwu Liao Jianghong Weng Zhicheng Zheng Xuanming Zhao Jingli
(*The State Key Laboratory of Applied Optic, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

(Received 30 May 2000; revised 17 July 2000)

Abstract: The thin film deposition is used to make 16-step Fresnel lens. It can implement system's lightweight, miniaturization and increase free degree of the design. Based on the scalar theory the effect of surface reflection of the SiO_2 film and substrate on the diffractive efficiency is analyzed by using Fresnel formula and Fourier transform. It is pointed out that the surface reflection has great effect on imaging of Fresnel lens. The coating is used to decrease this effect.

Key words: thin film deposition; Fresnel lens; surface reflection; diffractive efficiency