

用于空间望远镜的大口径高衍射效率薄膜菲涅尔衍射元件

王若秋^{1,2}, 张志宇¹, 薛栋林¹, 张学军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足空间成像领域对大口径、轻量化、高衍射效率光学衍射元件的需求, 研究了薄膜衍射元件微结构设计及制作工艺。应用 Zemax 光学软件设计了 320 mm 口径, $F/\#100$ 的四台阶薄膜菲涅尔衍射元件, 并利用 Matlab 软件将连续位相结构转化为离散化台阶分布。研究了薄膜菲涅尔衍射元件的制作技术, 选用透明聚酰亚胺薄膜作为基底材料, 以石英玻璃作为复制模板, 通过多次旋涂的方式实现了厚度为 20 μm 的衍射薄膜制作。应用 Solidworks 软件设计并加工薄膜支撑装置。测量复制基板及薄膜对应区域的微结构, 实验结果表明条纹线宽转移偏差小于 1.3%, 台阶深度偏差小于 8.6%。搭建光路测试在波长 632.8 nm 处衍射效率平均值为 71.5%, 达到了理论值的 88%。实验结果表明, 制作的薄膜重量轻, 复制精度高, 并且具有高衍射效率, 满足空间望远镜的应用要求。

关键词: 大口径; 菲涅尔衍射元件; 聚合物薄膜; 聚酰亚胺; 衍射效率

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0920001

Large-diameter high-efficiency diffractive Fresnel membrane elements for space telescope

Wang Ruoqiu^{1,2}, Zhang Zhiyu¹, Xue Donglin¹, Zhang Xuejun¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advance Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the purpose of fabricating large aperture, light-weighted, and high efficiency diffractive elements, the design of microstructure and fabrication technology of diffractive Fresnel membrane elements were proposed. A 4-step diffractive membrane with 320 mm diameter and $F/\#100$ was designed by Zemax software. The continuous phase distribution was transformed into discrete steps by Matlab software. The fabrication processing chain of membrane diffractive element was studied. Using polyimide film as membrane material and fused silica as substrate, the PI membrane with thickness of 20 μm was fabricated through multi-times spin-coating. The mechanical structure of membrane fixture was designed by using Solidworks software. The measurement results of corresponding position of membrane and glass substrate show that line width errors is less than 1.3%, and the step depth errors

收稿日期: 2017-01-13; 修订日期: 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(51305422); 国家重点基础发展研究计划(2011CB013205)

作者简介: 王若秋(1990-), 女, 博士生, 主要从事衍射光学元件设计与加工方面的研究。Email: wruoq0725@foxmail.com

导师简介: 张学军(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。Email: zxj@ciomp.ac.cn

is less than 8.6%. The diffraction efficiency in wavelength of 632.8 nm is 71.5%, which is 88% of theoretical value. It can be concluded that the membrane has light weighted structure, high replicated accuracy, and high diffraction efficiency, which meets the requirement of space-based telescope.

Key words: large aperture; Fresnel diffractive element; polymer membrane; polyimide; diffraction efficiency

0 引言

在现代化战争中,作战空间随着科学技术和武器装备的发展逐渐呈现出日益拓展的趋向。信息化战争是社会经济形态发展的必然结果,高技术的发展是信息化战争产生的直接动因。天基作为一个重要的战场,覆盖范围广,传输速度快,不受国界疆域和地理条件等限制,并且可以实现定期或连续监视,有着其他方式无法比拟的巨大优势。地球同步轨道卫星因具备高时效性及持续探测能力等优势得到世界各国的重视^[1]。在地球同步轨道的高度获得米级的目标分辨率,光学系统的口径至少需要达到20 m上。然而,反射式光学系统依靠现有的加工手段很难实现超大口径镜面的制作,并且其体积与质量会受到火箭运载能力的限制。

以薄膜材料作为系统物镜的衍射成像系统具有轻量化,面形误差要求低,空间可展开等特点,为超大口径光学系统的发展提供了新思路。美国劳伦兹-利弗莫尔(LLNL)实验室于1998年提出了Eyeglass计划,采用衍射成像技术,由双星组网构成望远镜^[2]。2010年,在美国国防部先进研究项目局(DARPA)的极力推动下,开展了薄膜光学成像器实时应用计划(MOIRE),拟通过衍射成像的方式,实现静止轨道的高分辨率对地成像^[3-4]。美国空军学院(USAF)于2015年发射“猎鹰卫星-7”(FalconSat-7)微卫星,搭载一台口径0.2 m、焦距为0.4 m的“光子筛”衍射薄膜望远镜,主要用于观测太阳,在450 km高度具备对地表成像1.8 m的分辨率^[5-6]。

在国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学技术大学等多家单位针对衍射元件开展了多方面的工作。其中中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究了衍射式望远镜系统的设计方案^[7],振幅型光子筛衍射元件的制作工艺,并得到了

4.916%的衍射效率^[8];中国科学院西安光学精密机械研究所研究了基于空间薄膜的大口径衍射望远镜展开结构设计方案^[9];中国科学技术大学成功制作了大尺寸两台阶的菲涅尔波带片,并得到了33.14%的衍射效率^[10],北京空间机电研究所制作了100 mm口径的多台阶薄膜衍射元件,衍射效率52.51%^[11]。材料的透射率损失,制作过程中的位相失真,以及支撑装置都会影响薄膜衍射元件的衍射效率。为满足空间望远镜的应用,研究大口径高衍射效率薄膜衍射元件十分紧迫,文中从薄膜材料及光学设计入手,设计了口径320 mm, $F/\#100$ 的四台阶薄膜菲涅尔衍射元件。使用高透过率透明PI膜作为基底材料,详述薄膜加工过程及机械固定结构。对不同区域轮廓的测量结果显示,薄膜实现了基板结构的高精度复制,最后,测得薄膜衍射元件的衍射效率71.5%,达到理论值的88%。文中的研究成果,为未来发展超大口径空间衍射望远镜提供了理论基础与技术储备。

1 基本原理

衍射元件的位相分布可表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (A_1 r^2 + A_2 r^4 + \dots) \quad (1)$$

式中: A_1 、 A_2 为各位相系数; r 为衍射元件的径向坐标; λ_0 为设计波长。

连续浮雕结构理论上可以实现100%的衍射效率,但是依靠现有工艺制作难度大,因此在实际加工中,以多台阶结构近似^[12]。连续位相结构与离散近似面形结构如图1所示。台阶数目与理论衍射效率呈正比例关系,二台阶结构的衍射效率为40.5%,四台阶结构的衍射效率为81%,文中采用四台阶结构近似连续浮雕结构。

从聚光作用看,普通透镜是利用光线折射原理实现聚焦,从物点发出的各光线到像点的光程相等,

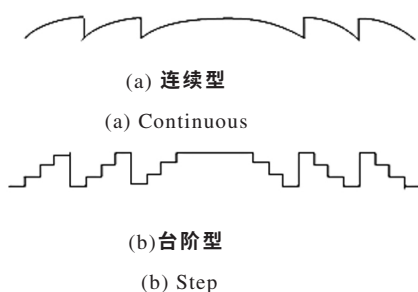


图 1 衍射元件位相分布

Fig.1 Phase distribution of diffractive elements

而衍射元件则是利用光的衍射原理实现光线汇聚,从物点发出的光波经过衍射元件的各环带发生衍射,相邻环带到达像点的相位差为 2π 的整数倍,产生相干叠加。两者之间有实质性差别,而这种差别表现在普通透镜只有一个焦距,而衍射元件的焦距与波长密切相关,其数值与波长成反比关系,其色散分布如图 2 所示^[13]。衍射元件的色差比普通透镜大很多,带宽窄是衍射元件的主要缺点。在波长为 λ 时衍射元件对应的焦距 f_m 可表示为:

$$f_m = \frac{\lambda_0 f_0}{m \lambda} \quad (2)$$

式中: m 为主衍射级次; f_0 为对应设计波长 λ_0 处的焦距值。

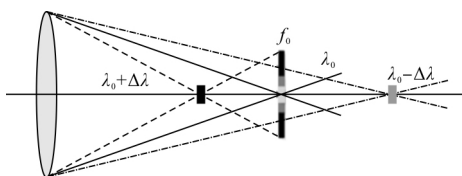


图 2 衍射元件色散示意图

Fig.2 Chromatic dispersion of diffractive elements

将大口径衍射元件用作望远系统主镜时,由于受到其自身色散缺陷限制,需要辅助后续校正光学系统对其进行色差校正,扩展工作谱段。系统设计思路如图 3 所示。利用 Schupman 消色差原理:多色光经过衍射主镜发生色散,利用一块理想的中继透镜将光线在空间上重新汇聚在一点上,目镜同样是一块刻蚀有微型环带结构的衍射透镜,与衍射主镜具有相同色散、相反光焦度。经过校正透镜后将光线在光谱上汇聚为一束多色光,实现色差校正,经过后续汇聚透镜成像在探测器上^[14]。

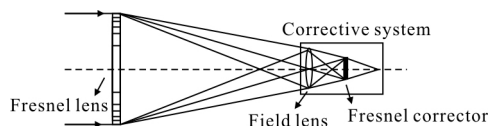


图 3 衍射望远镜系统成像示意图

Fig.3 Schematic diagram of diffractive telescopes imaging system

此外,入射光经过反射镜表面光程差的改变量是镜面面形误差的两倍,对于高分辨率的反射式望远镜而言,一般要求光程差要小于 $\lambda/10$,因此元件的面形精度要优于 $\lambda/20$,这在可见光波段是很难办到的。但衍射光学元件是透射型元件,入射光通过一个等厚的透射表面,在一个面上的路径延迟被另一个表面抵消,降低了对镜面面形精度的要求。但是在实际系统中,这种路径长度的抵消并不是完美的。如果光线弯曲角度为 θ ,则透镜较反射镜具有 $(1+\cos\theta)/(1-\cos\theta)$ 倍的公差优势。这个公差的增益近似地随着 $4/\theta^2 \approx 16(F/\#)^2$ 成比例变大。因此保证 θ 足够小,即 $F/\#$ 足够大,就可以在很大程度上放松衍射透镜的面形公差要求^[15]。

以 $F/\#100$, 设计波长 $\lambda=632.8$ nm, 基底材料折射率 $n=1.67$ 的薄膜菲涅尔衍射物镜为例,元件的基底变化可以认为是厚度变化为 Δt 的平行平板,经过平行平板后的光程差 Δl 可以表示为:

$$\Delta l = (n-1)\Delta t \quad (3)$$

则薄膜的厚度公差为:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{n-1}, \Delta l = \frac{\lambda}{10}, \Delta t = 0.094 \mu\text{m} \quad (4)$$

沿光轴方向的面型公差 Δz ,如图 4 所示,可由

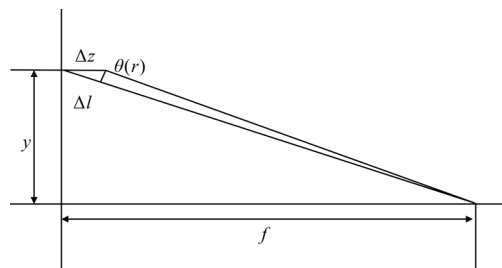


图 4 沿光轴方向的误差示意图

Fig.4 Schematic diagram of errors along optical axis

光程差 Δl 表示为:

$$\Delta l = \Delta z(1 - \cos\theta(r)) \quad (5)$$

由泰勒展开式得:

$$\Delta z \geq \frac{2f^2}{r_{\max}^2} \Delta l = 8(f/\#)^2 \Delta l, \Delta z = 5.06 \text{ mm} \quad (6)$$

当沿径向方向的面形公差为 Δy , 如图 5 所示, 光程差 Δl 可表示为:

$$\Delta l = \sqrt{(y + \Delta y)^2 + f^2} - \sqrt{y^2 + f^2} \approx \frac{y \Delta y}{f} \quad (7)$$

由泰勒展开推导得:

$$\Delta y \geq \frac{f}{r_{\max}} \Delta l = 2(f/\#) \Delta l, \Delta y = 12.65 \text{ mm} \quad (8)$$

从上述推导中可以得出结论, 衍射薄膜的厚度公差只与薄膜折射率 and 设计波长有关, 面形公差只与 $F/\#$ 有关。

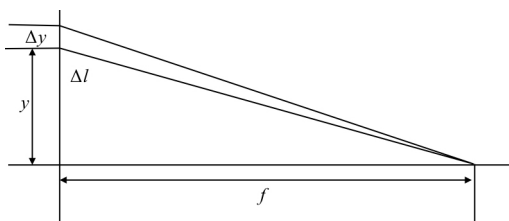


图 5 沿径向方向的误差示意图

Fig.5 Schematic diagram of errors along radial direction

2 薄膜菲涅尔衍射元件制作工艺

薄膜属于柔性材料, 并不适合直接刻蚀加工的方式。采用模板复制的方式, 首先将与设计结构相反的图样加工在玻璃基底材料表面, 之后转移复制得到带有微结构的薄膜衍射元件。

2.1 模板制作

模板的加工工艺流程如图 6 所示。加工主要包括涂胶、曝光、刻蚀、二次涂胶、曝光、刻蚀等工艺过程。具体包括: (1) 在石英基板的一个表面涂覆厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的光刻胶, 得到待加工元件; (2) 经激光直写曝光后, 显影、烘焙, 将图案加工在光刻胶上; (3) 保留基板上的光刻胶作为抗蚀剂, 对石英基板进行离子束刻蚀, 将图案转移到基板上。刻蚀至设计深度

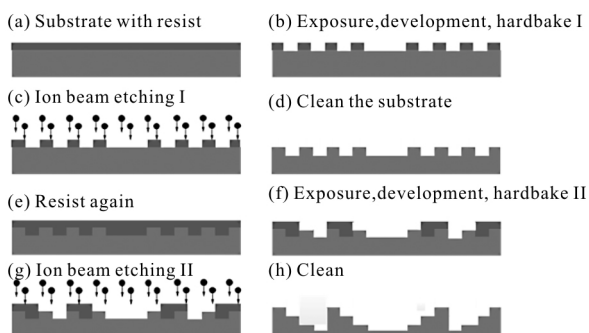


图 6 模板制作工艺流程

Fig.6 Process chain for fabricating master substracts

后, 清洗残余光刻胶; (4) 清洗基板、烘干, 准备进行二次加工; (5) 对基板进行第二次涂胶, 厚度为 $1 \mu\text{m}$; (6) 对基板进行二次曝光, 显影、烘焙; (7) 对二次曝光后的基板进行离子束刻蚀, 刻蚀深度为上次刻蚀深度的两倍; (8) 清洗基板, 得到四台阶位相型衍射物镜^[16-20]。

2.2 材料选择

聚酰亚胺(PI)是一种高分子有机材料, 具有良好的力学和热学性能。聚酰亚胺材料制作的薄膜, 是目前性能最好的有机薄膜之一。它耐高低温范围宽、强度大、成本低、易制作, 广泛应用于航空航天、微电子、原子能、电器绝缘、液晶显示等各个领域^[21-22]。聚酰亚胺材料性能优异, 适合作为薄膜衍射元件的基底材料。

将 4,4'-二氨基-2,2'-双三氟甲基联苯(TFDB)和 3,3',4,4'-联苯四甲酸二酐(BPDA)在 N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)溶液中进行缩聚反应, 配制得到固含量 20%, 粘度 2 700 cP(1 cP=1 mPa·s)的聚酰胺酸溶液。由于在联苯分子结构中引入三氟甲基破坏分子链间电子转移复合物形成, 因此能够获得浅色聚酰亚胺, 有利于应用在光学领域。材料性能参数由表 1 列出。

表 1 聚酰亚胺薄膜材料性质

Tab.1 Properties of polyimide membrane

Items	TOF/25 μm
Glass transition temperature(DMA)/ $^{\circ}\text{C}$	250-260
CTE (50-250 $^{\circ}\text{C}$)/ $\text{ppm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	24-28
Tensile strength/MPa	>140
Modulus/GPa	>2.8
Average transmittance(400-800 nm)	>88%
Transmittance(550 nm)	>90%
Breakdown voltage/ $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$	<1
Dielectric constant(1 kHz)	>180
Water absorption	<1%

2.3 薄膜制作

薄膜衍射元件加工的工艺流程如图 7 所示。薄膜的制作需要在超净间中进行, 隔绝灰尘与杂质影响。实验环境温度应控制在 22°C , 空气湿度小于 30% RH。将配制好的聚酰胺酸溶液均匀地涂覆在模板表面, 溶液与模板边缘不能留有空隙, 否则在成膜过程中薄膜会发生收缩。静置一段时间, 让溶液能够充分填充台阶结构。采用旋涂的方式匀胶, 匀胶参数

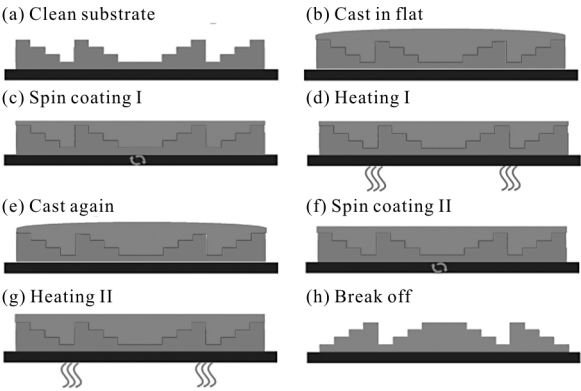


图 7 薄膜衍射元件制作工艺
Fig.7 Process chain for fabricating membrane diffractive elements

由表 2 给出。完成旋涂后,将带有胶液的模板放置在水平加热板上,通过梯度升温使胶液中 DMAc 溶剂挥发,之后将模板放置在烘箱中加热至聚酰亚胺的玻璃化温度,亚胺化成膜。加热过程的参数由表 3 给出。旋涂一次制得的薄膜厚约 7.5 μm ,薄膜厚度过薄时难以与模板分离,因此通过多次旋涂的方式增加厚度。厚度与旋涂次数并不呈线性关系,实验中通过三次旋涂实现厚度 20 μm 的薄膜加工。

表 2 旋涂参数

Tab.2 Parameters of spin-coating

No.	Rotating speed/rpm	t/s
1	200	10
2	900	110

表 3 加热参数

Tab.3 Parameters of heating process

No.	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	t/h
1	40	0.5
2	50	0.5
3	60	0.5
4	70	0.5
5	350	1

3 实验结果及分析讨论

3.1 结构设计

为验证上述工艺可行性,设计并制作一块口径

320 mm $F/\#100$ 的四台阶薄膜菲涅尔衍射元件。通过 Zemax 光学设计软件进行仿真分析,图 8 为衍射面的位相分布。表 4 为薄膜菲涅尔衍射元件的各项参数。根据设计参数,利用 Matlab 编程软件将连续位相结构转化为激光直写设备可识别的离散化台阶分布,图 9 为设计元件的中心区域示意图,其中不同灰度值代表不同刻蚀深度。

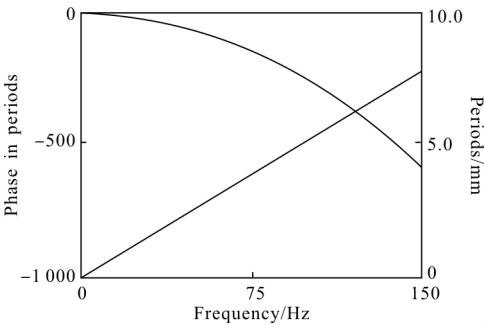


图 8 衍射面位相分布

Fig.8 Phase distribution of diffractive membrane

表 4 薄膜菲涅尔衍射元件参数列表

Tab.4 Parameters of diffractive Fresnel membrane elements

Items	Value
Designed wavelength/nm	632.8
Designed aperture/mm	320
Effective aperture/mm	300
F number	100
Number of bands	2 372
Number of steps	4
Largest linewidth/ μm	1 276.15
Smallest linewidth/ μm	31.75

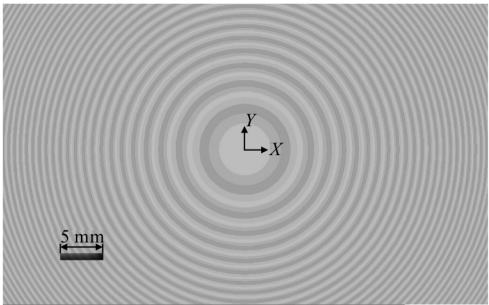


图 9 薄膜型菲涅尔衍射元件中心区域台阶分布图

Fig.9 Step distribution of diffractive Fresnel membrane elements (center part)

3.2 薄膜支撑装置

由于制得的薄膜非常薄,仅有几十个微米,需要支撑固定保证使用。采用 Solidworks 软件设计固定机械结构。薄膜首先采用黏胶方式固定在一个聚酰亚胺材质的环形固定框上,利用薄膜与石英基板热膨胀系数不同的特点,在热水中浸泡使薄膜与基板分离。分离后的薄膜由一个铝制钢圈与八个对称分布的固定块装卡固定。机械结构设计图如图 10 所示。为验证光机结构设计的合理性,对薄膜支撑装置进行了有限元分析。采用壳单元、体单元和杆单元分别对薄膜、固定装置和顶丝进行网格划分,其有限元模型如图 11 所示,在边界条件中设置每个顶丝的标准扭力为 $4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$,分析结果如图 12 所示。

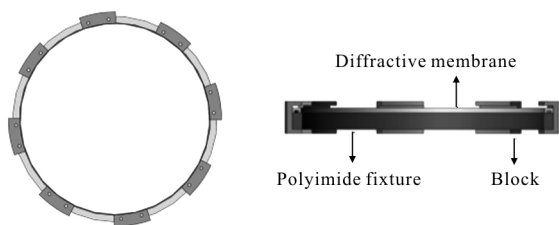


图 10 机械固定结构设计图

Fig.10 Design of mechanical fixture structure

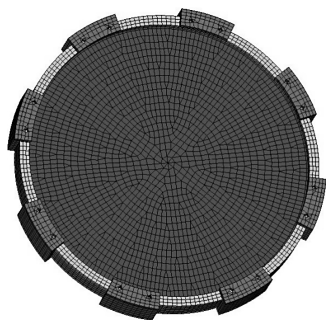
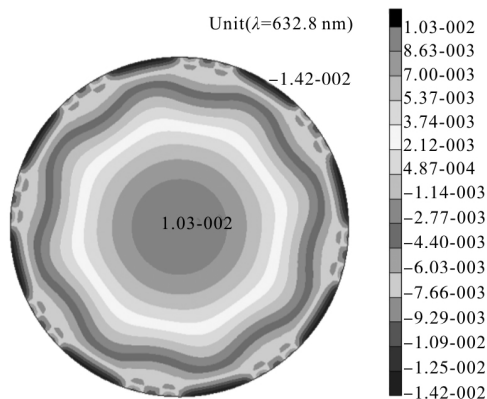


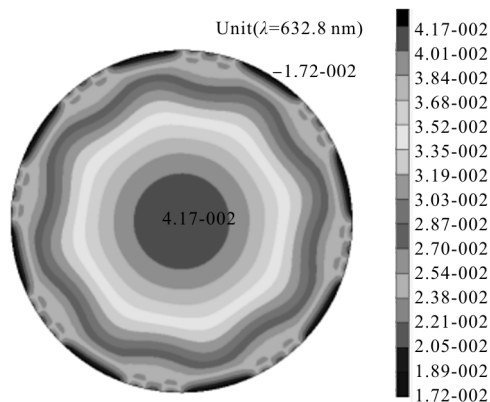
图 11 薄膜支撑装置有限元模型

Fig.11 Finite element model of membrane supporting device



(a) 沿光轴方向的变形云图

(a) Deformation nephogram along the optical axis



(b) 沿薄膜径向的变形云图

(b) Deformation nephogram along the radial direction of membrane

图 12 有限元分析结果

Fig.12 Analysis results of finite element

其中图 12(a)为沿光轴方向的受力变形云图,其 PV 值为 $2.45\text{e}-2 \lambda$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)。图 12(b)为沿薄膜径向的受力变形云图,其 PV 值为 $5.89\text{e}-2 \lambda$ 。分析结果显示由薄膜支撑装置产生的应力变形远小于环带加工尺寸,因此,该装置设计结构合理,满足使用要求。

3.3 线宽测试与分析

实际加工的四台阶薄膜菲涅尔衍射元件实物图如图 13 所示。采用日本奥林巴斯生产的 LEXT OLS 4100 激光共聚焦显微镜对薄膜菲涅尔衍射元件的微结构进行测试。该设备采用非接触式、无损、快速成像测量。光源采用波长 405 nm 的半导体激光,在 X,Y 方向上可实现 $0.12 \mu\text{m}$ 的平面分辨率。在 Z 方向上可实现 10 nm 的高度分辨率,显示分辨率



图 13 320 mm 口径菲涅尔薄膜实物图

Fig.13 Real figure of Fresnel membrane with diameter of 320 mm

1 nm。电动载物台尺寸 300 mm×300 mm。图 14 为不同线宽条纹区域的轮廓扫描结果。不同深度对应不同的台阶高度。可以看出,转移制得的薄膜条纹轮廓清晰,边缘锐利。

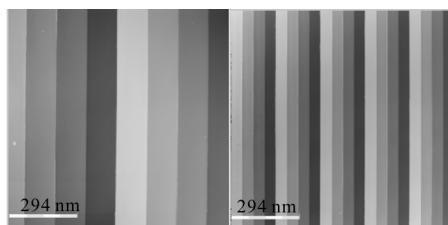


图 14 薄膜菲涅尔衍射元件轮廓测试图

Fig.14 Profile test results of membrane Fresnel diffractive elements

为了更准确地评估加工工艺的有效性,测量不同区域的薄膜表面与复制基板相应区域的条纹线宽与台阶深度。通过比较薄膜表面微结构测量值与基板的偏差,来反映薄膜的制作精度。取不同区域位置的线宽,多次测量取平均值,表 5 列出了检测结果。由检测结果可以看出,水平方向条纹线宽实现了高精度复制,转移误差小于 1%。深度方向存在较大失真,转移误差小于 8.6%。分析产生此现象的原因一方面是因为胶液的不完整填充;另一方面是由于薄膜在纵向上收缩导致的。在今后的制作过程中,可以通过增加基底刻蚀深度的方式弥补深度误差。

表 5 薄膜微结构测试结果

Tab.5 Measurement results of membrane microstructure

	Fused silicon substrate/ μm	Diffractive membrane/ μm	Transfer errors	
Line width	1	983.47	982.22	0.13%
	2	827.27	827.26	0.001%
	3	195.23	195.62	0.20%
	4	90.01	89.90	0.12%
	5	68.61	68.58	0.04%
	6	47.62	47.25	0.77%
Step depth	1	0.94	0.993	5.6%
	2	0.600	0.652	8.6%
	3	0.340	0.346	1.7%

3.4 衍射效率测试

衍射效率是表征衍射元件光学性能的重要指标,衍射效率 η 定义为主衍射级次能量 E_1 与入射光总能量 E_0 的比值,即:

$$\eta = \frac{E_1}{E_0} \quad (9)$$

图 15 为衍射效率测试原理图。激光束经过准直后入射在衍射元件表面,经过一个可变小孔滤除杂光及其他衍射级次。光强由光功率计测得^[23]。使用波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器及 Thorlabs PM201 光功率计,测量薄膜菲涅尔衍射元件的+1 级衍射效率。测得衍射效率的平均值为 71.5%。测量结果理想,衍射效率达到了理论值的 88%。衍射效率的损失主要来源于基板的制作误差与复制过程中台阶轮廓的失真。

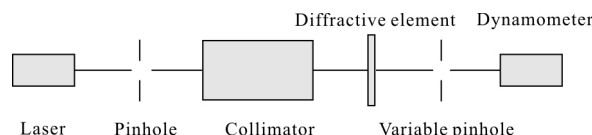


图 15 衍射效率测试原理图

Fig.15 Schematic diagram of diffractive efficiency test

4 结 论

文中针对应用于空间望远镜的大尺寸衍射元件的特点与要求,设计并制作 320 mm 口径, $F/\#100$ 的四台阶薄膜菲涅尔衍射元件。采用激光直写、离子束刻蚀工艺加工石英基底模板,之后通过多次旋涂,将设计结构转移至透明聚酰亚胺薄膜上。设计针对薄膜固定的机械结构,实现了基板结构向薄膜的高精度复制,测试结果表明,线宽转移偏差小于 1.3%,深度转移偏差小于 8.6%。最后测试了薄膜的衍射效率,实验结果表明:采用 He-Ne 激光器,测得薄膜菲涅尔波带片的衍射效率为 71.5%,达到理论值的 88%。文中的研究作为未来大口径薄膜衍射成像系统的研究提供了技术基础。

参考文献:

- [1] Guo Linghua. Preliminary research on development of foreign GEO remote sensing satellites [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(6): 23-30. (in Chinese)
郭玲华. 国外地球同步轨道遥感卫星发展初步研究 [J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(6): 23-30.

- [2] Roderick A, Hyde Eyeglass. Very large aperture diffractive telescopes [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [3] Jerald A Britten, Shamusundar N Dixit. Large-aperture fast multilevel Fresnel zone lenses in glass and ultrathin polymer films for visible and near-infrared imaging applications [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2313-2316.
- [4] Pual D Atcheson, Chris Stewart, Jeanette Domber, et al. MOIRE-initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes [C]// *Proceedings of SPIE*, 2012, 8442: 844221.
- [5] Andersen G. Large optical photon sieve [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 2976-2978.
- [6] Andersen G. Membrane photon sieve telescopes [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(33): 6391-6394.
- [7] Zheng Yaohui, Ruan Ping, Cao Shang. Deployable structure design and analysis for space membrane diffractive telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0118004. (in Chinese)
郑耀辉, 阮萍, 曹尚. 空间薄膜衍射望远镜展开结构设计与分析[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0118004.
- [8] Liu Minzhe, Liu Hua, Xu Wenbin, et al. Membrane photo sieve for space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2127-2134. (in Chinese)
刘民哲, 刘华, 许文斌, 等. 用于空间望远镜的膜光子筛[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2127-2134.
- [9] Zhang Nan, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Optical design of diffractive telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 106-108. (in Chinese)
张楠, 卢振武, 李凤有. 衍射望远镜光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 106-108.
- [10] Zhang Jian, Li Mengjuan, Yin Ganghua, et al. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1289-1296. (in Chinese)
张健, 栗孟娟, 阴刚华, 等. 用于太空望远镜的大口径薄膜菲涅尔衍射元件[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1289-1296.
- [11] Zhang Y, Wang B. Transmissive diffractive membrane optic for large aperture lightweight optical telescope [C]//*SPIE*, 2015, 9622: 96220G.
- [12] Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [13] Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008. (in Chinese)
- 石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [14] Hufnagel R E. Achromatic holographic optical system: US, US 4550973 A[P]. 1985-01-13.
- [15] Liu Hua, Lu Zhenwu, Yan Yong. Large aperture diffractive telescope tolerance analysis and measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(10): 1203-1207. (in Chinese)
刘华, 卢振武, 闫勇. 大口径衍射望远系统公差分析及测量[J]. *光子学报*, 2013, 42(10): 1203-1207.
- [16] Maik Rahlves, Maher Rezem. Flexible, fast, and low-cost production process for polymer based diffractive optics [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3614-3622.
- [17] Zhao Longbo, Zhang Zhiyu, Zhu Deyan, et al. Fabrication of high precision computer generated hologram for aspheric surface testing by laser-direct writing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 1-7. (in Chinese)
赵龙波, 张志宇, 朱德燕, 等. 用于非球面检验的激光直写高精度计算全息图制作研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 1-7.
- [18] Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun, et al. Photo lithographic fabrication techniques by using defocusing laser direct writing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(9): 850-854. (in Chinese)
李凤有, 卢振武, 谢永军, 等. 离焦激光直写光刻工艺研究 [J]. *中国激光*, 2002, 29(9): 850-854.
- [19] Kuttner P. Image quality of optical systems for truncated Gaussian laser beams [J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(1): 180-183.
- [20] Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun, et al. Photo lithographic fabrication of large curved hologram by laser writer[J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 1810.
- [21] Liao Bo, Zhang Bufeng, Wang Wenjing, et al. Research progress of functional polyimide film[J]. *Insulating Materials*, 2013, 46(5): 21-24. (in Chinese)
廖波, 张步峰, 王文进, 等. 功能型聚酰亚胺薄膜研究进展 [J]. *绝缘材料*, 2013, 46(5): 21-24.
- [22] Ren Xiaolong, Dong Zhanli, Zhang Junli, et al. Polyimide film product and its application development at abroad [J]. *Insulating Materials*, 2013, 46(3): 28-32. (in Chinese)
任小龙, 董占林, 张俊丽, 等. 国外聚酰亚胺薄膜产品及应用进展 [J]. *绝缘材料*, 2013, 46(3): 28-32.
- [23] Yang Liangliang, Cui Qingfeng, Liu Tao, et al. Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 151-156. (in Chinese)
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): 151-156.