

文章编号 1004-924X(2016)06-1289-08

用于太空望远镜的大口径薄膜菲涅尔衍射元件

张 健¹, 栗孟娟², 阴刚华², 焦建超², 刘正坤^{1*}, 徐向东¹, 付绍军¹

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029; 2. 北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘要: 为了满足空间衍射成像系统对大口径、轻量化衍射元件的需求, 设计制作了直径为 400 mm 的聚酰亚胺 (PI) 薄膜菲涅尔衍射元件。通过紫外光刻、离子束刻蚀等微细加工方法在石英基底上制作衍射图形, 然后将衍射图形复制到 PI 薄膜上得到菲涅尔衍射型薄膜元件。结合有限元法探究了薄膜复制过程中热应力的变化规律及降低热应力的方法, 分析了影响薄膜衍射效率的因素及薄膜制作误差、温度变化对薄膜成像的影响, 最终实现了大面积薄膜与基底的分离, 并通过局部氧气等离子体轰击提高了薄膜衍射效率的均匀性。经测试, 薄膜菲涅尔衍射元件的厚度约为 20 μm , 在波长 633 nm 处的实际衍射效率平均值为 33.14%, 达到了理论效率的 81.83%, 衍射效率的均方根值 $\text{RMS}=0.01$ 。实验结果表明, 通过紫外光刻、离子束刻蚀和薄膜复制的方法可以得到大口径、高衍射效率的薄膜菲涅尔衍射元件。

关键词: 衍射光学; 大口径衍射元件; PI 薄膜; 衍射效率; 空间望远镜

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1289

Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope

ZHANG Jian¹, LI Meng-juan², YIN Gang-hua², JIAO Jian-chao²,
LIU Zheng-kun^{1*}, XU Xiang-dong¹, FU Shao-jun¹

(1. *National Synchrotron Radiation Lab, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;*

2. *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn*

Abstract: In order to meet requirements of large diameter and light-weighting diffraction elements for space diffraction imaging system, the polyimide (PI) membrane Fresnel diffraction elements with the diameter of 400 mm were designed and manufactured. With ultraviolet lithography, ion beam etching and other microfabrication methods, diffraction patterns on quartz substrate were made and then reproduced onto PI membrane, thereby obtaining the Fresnel diffraction type membrane elements. The change rule of thermal stress during the membrane reproduction process and the methods for reducing thermal stress were researched by Finite Element Method (FEM). The influence factors of the membrane diffraction efficiency, and impact of membrane production error and temperature change on membrane imaging were analysed. Finally, the separation of large-diameter membrane and substrate

收稿日期: 2016-03-01; 修订日期: 2016-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11375175)

was realized, and the uniformity of membrane diffraction efficiency was improved by local oxygen plasma bombardment. By testing, the thickness of membrane Fresnel diffraction element is $20\ \mu\text{m}$, and the average value of actual diffraction efficiency is 33.14% when wavelength is 633 nm, reaching 81.83% of the theoretical efficiency, and Root Mean Square (RMS) of diffraction efficiency is 0.01. The experimental results show that large diameter and high diffraction efficiency membrane Fresnel diffraction elements can be manufactured by ultraviolet lithography, ion beam etching and membrane reproduction.

Key words: diffraction optics; large diameter diffraction elements; pI membrane; diffraction efficiency; space telescope

1 引言

随着现代化战争形式的发展,空间遥感系统的要求越来越高。地球同步轨道卫星具有高时效性、持续探测等能力,适合未来军事发展的需求。为了提高地球同步轨道卫星对地分辨率,需要研制大口径空间望远镜系统。传统的反射镜成像系统制作周期长、研制成本高、体积重量大,对火箭的运载能力是很大的挑战。薄膜反射镜的使用虽然可以使望远镜系统物镜变得很轻薄,但是需要高精度的表面型控制系统,这增加了成像系统的复杂性和质量。衍射薄膜成像系统具有大口径、轻量化、面型公差大、空间可展开、易复制等特点,能极大地降低制造成本和发射成本。1998年,美国劳伦斯-里弗莫尔(LLNL)国家实验室提出空间衍射望远镜计划—Eyeglass,旨在利用菲涅尔衍射成像技术制造轻质量、超大口径的望远镜^[1-2]。Ian M. Barton 和 Aden Baker Meinel 等对大口径轻量化衍射元件的制作和成像性质进行了研究^[3-4]。2010年,美国国防高级研究计划局提出“MOIRE”项目,开展了大口径薄膜衍射光学成像技术的研究^[5-8],并开发了衍射薄膜、大型可展开支撑结构、星上处理和压缩等关键技术。2011年,劳伦斯-里弗莫尔国家实验室研制了口径为 0.8 m,厚度为 $18\ \mu\text{m}$ 的 2 台阶菲涅尔衍射成像薄膜设备,衍射效率为 30%。2013年,该研究小组利用 4 台阶结构将薄膜衍射效率进一步提高到 55%^[9]。2014年,美国鲍尔航空航天技术公司完成了 5 m 口径衍射薄膜子镜及支撑、展开连接结构的地面测试工作^[10]。但这些文献均很少提及具体的工艺流程,可参考性不高。

在国内,刘民哲等在薄膜光子筛制作方面进行了探究^[11],刘华开展了衍射元件对高斯光束整形方面的工作^[12],北京空间机电研究所在衍射成像系统方面开展了诸多工作^[13]。而在大口径衍射薄膜工作方面还未有公开报道,因此开展大口径薄膜衍射成像领域的研究对我国国防、航空航天事业意义深远。

本文开展了大口径薄膜元件的制作工艺探究。考虑到太空环境对薄膜提出的耐热、高强度等要求,选择高热稳定性、耐低温、高机械性能及结构容易设计合成的聚酰亚胺(PI)作为薄膜材料,成功设计制造了使用波段为 633 nm,直径为 400 mm,厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 的位相型 PI 薄膜波带片元件,其+1级衍射效率为 33%,并结合有限元法详细地分析了制作难点。本文的研究成果为我国大口径空间遥感系统的研制提供了参考。

2 菲涅尔衍射光学系统

菲涅尔透镜是刻蚀有两个或者多个台阶深度的浮雕结构的位相型衍射元件,可以加工得十分轻薄,具有衍射效率高、面型精度要求低等特点。连续浮雕结构理论上能实现 100%的衍射效率,但加工难度很高,本文采用多台阶结构逼近连续浮雕结构。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%,如图 1 所示。

如图 2 所示,入射光经反射镜表面的光程差改变是反射镜面误差的 2 倍,所以要求反射镜的面型误差小于 $\lambda/20$,这在可见光波段很难实现。而对衍射元件而言,入射光通过等厚的透射面,因面型误差造成的光程差几乎互相抵消,故对面型精度的要求十分宽松。

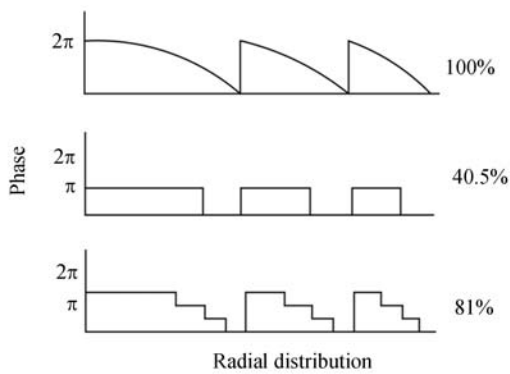


图 1 多台阶位相结构的衍射效率

Fig. 1 Diffraction efficiencies of multi-level structures

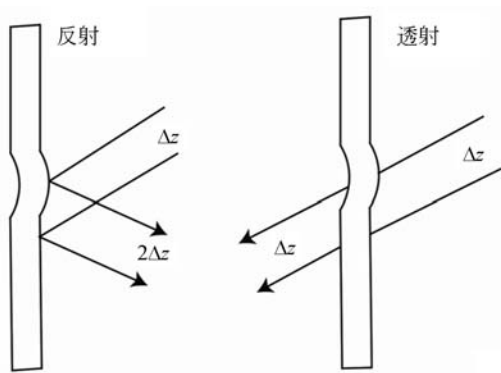


图 2 面型误差对反射和透射衍射元件的影响

Fig. 2 Impact of surface ripple on reflective and transmissive diffractive optics

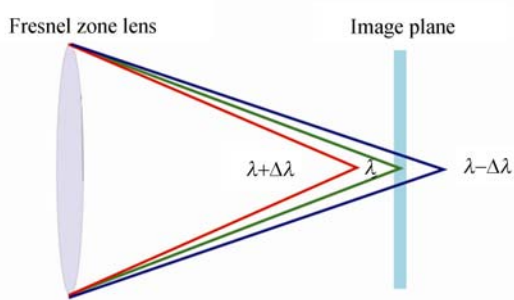


图 3 菲涅尔衍射元件的色散

Fig. 3 Chromatic dispersion of Fresnel zone lens

如图 3 所示,菲涅尔衍射元件的焦距与入射波长呈反比,色散严重,满足如下关系:

$$f_m = \frac{\lambda_0 f_0}{m\lambda}, \quad (1)$$

其中: λ_0 为设计波长, f_0 为在设计波长 λ_0 下的主焦距, m 为衍射级次, λ 为实际入射波长, f_m 为在实际入射波长 λ 下的 m 级焦距。

根据 Schupmann 理论^[1],可通过一对相同色散,相反光焦度的衍射元件实现消色差。衍射光学系统如图 4 所示。

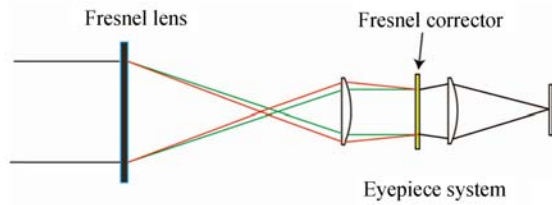


图 4 Schupmann 理论光学系统示意图

Fig. 4 Optical system model of Schupmann theory

3 薄膜菲涅尔衍射元件的制作

3.1 石英基底菲涅尔透镜模板制作

通过光刻、离子束刻蚀工艺完成菲涅尔石英基底菲涅尔透镜模板的制作。

3.2 聚酰胺酸溶液制备

将均苯四甲酸二酐(PMDA)和二苯醚二胺(ODA)在 N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)溶剂中混合,得到 20% 固含量的聚酰胺酸溶液。

3.3 薄膜菲涅尔衍射元件复制

如图 5 所示,将石英菲涅尔透镜模板经过浓硫酸、双氧水混合溶液高温浸泡、去离子水清洗并烘干后,冷却至室温。将配制好的聚酰胺酸溶液均匀涂覆在石英模板上,静置片刻,在适当的转速下旋涂合适的时间。放入烘箱中,在梯度升温下固化成膜,自然冷却。最后将薄膜从石英模板上剥离,得到薄膜菲涅尔衍射元件。

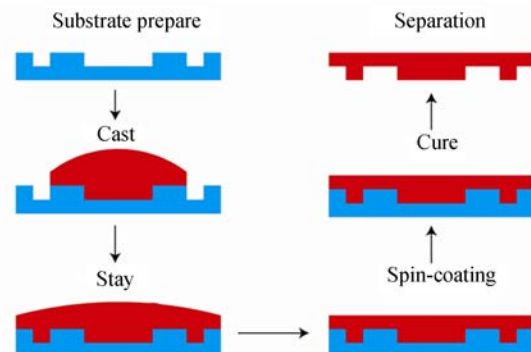


图 5 薄膜元件制作流程

Fig. 5 Fabrication processes of membrane optics

4 实验结果及讨论

本文制备的 400 mm 口径的 PI 薄膜如图 6 所示。使用波长为 633 nm 的 He-Ne 激光器进行效率测试, +1 级衍射效率的平均值为 33.14%, RMS 值为 0.01, 如图 7 所示。



图 6 口径为 400 mm 的薄膜衍射元件

Fig. 6 Membrane optic with 400 mm diameter

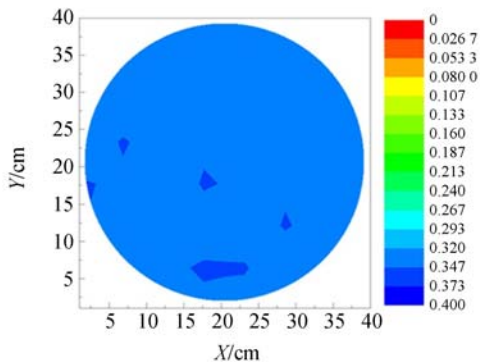


图 7 +1 级衍射效率分布

Fig. 7 Diffractive efficiency distribution of +1 order

薄膜质量受聚酰胺酸溶液的性质、旋涂速度及时间、固化温度及时间、升温速率等因素的影响。在固化过程中, 薄膜与基底的热膨胀系数失配使薄膜产生残余应力。过大的残余应力会导致薄膜翘曲甚至开裂, 使得薄膜复制图形失真。因此降低薄膜残余应力是亟待解决的难题。薄膜与基底存在黏结作用, 大面积的薄膜分离困难, 不损伤基底的薄膜无损分离是关键。而薄膜面积大, 衍射效率均匀性的提高则又是一个挑战。

4.1 工艺难点

4.1.1 薄膜复制过程中热应力分析

在高温固化过程中, 溶剂的挥发及酰亚胺化

对薄膜及基底界面残余应力有很大的影响。溶剂的挥发会增大残余应力, 而亚胺化程度的增加则会降低残余应力。石英与薄膜的特性如表 1 所示。

薄膜固化过程中的残余应力可以通过薄膜张力分析仪测定石英基底上的薄膜弯曲度来确定^[14], 即有:

$$\sigma = \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{t_f} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (2)$$

式中: 下标 f, s 表示 PI 薄膜和基底, E, ν 和 t 分别表示杨氏模量、泊松比和厚度, R_1, R_2 分别为薄膜涂覆前后基片的弯曲度。实验中, 在预烘后残余应力达到最大值, 此后随着温度升高残余应力降低, 在 200 °C 左右有一激增, 然后继续降低, 在 350 °C 降低到几乎为 0。

薄膜槽深约为膜厚的 1/50, 冷却过程中可近似看作等厚均匀薄膜处理。在任意两个温度下, 由薄膜与基底的热膨胀系数差别引起的薄膜应力不同, 即有:

$$\Delta\sigma = \frac{E_f}{1-\nu_f} (\alpha_f - \alpha_s) (T_f - T_0), \quad (3)$$

式中: α_f 和 α_s 分别表示薄膜和基底的热膨胀系数, T_f 和 T_0 分别表示薄膜最终亚胺化的温度和室温。本文中 $T_f = 350$ °C, $T_0 = 20$ °C, 理论估算冷却至室温后薄膜的残余应力约为 35.6 MPa。

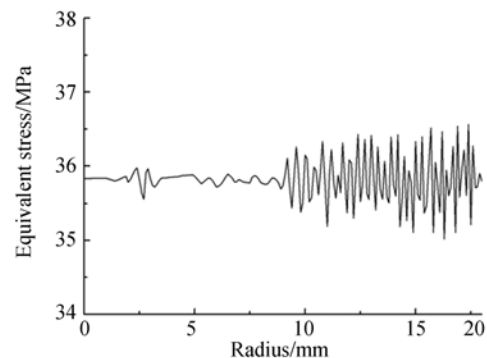


图 8 冷却过程中薄膜的表面应力

Fig. 8 Membrane stress during cooling process

图 8 为 Ansys 软件模拟薄膜与基底界面等效应力随半径的变化。薄膜厚度为 20 μm , 槽型深度为 450 nm。由图可见, 在薄膜中心区域应力值与理论计算值接近, 但薄膜表面周期性的槽型使得应力在一个范围波动变化, 并且槽型周期越小, 薄膜表面应力变化越剧烈。

表 1 石英与薄膜的特性

Tab. 1 Properties of fused silica and membrane

材料	E/GPa	ν	$\alpha/(10^{-6})$
SiO ₂	80	0.17	0.55
PI	3	0.34	24.3

4.1.2 薄膜残余应力的降低

当成膜质量较差,薄膜与基底热膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansion,CTE)差别过大导致薄膜应力过大时,容易出现薄膜脆裂,如图 9 所示。影响薄膜 CTE 的因素有化学结构和聚集态两方面。研究表明,具有刚性棒状结构的芳香族 PI,分子链较平直,分子间的堆砌较紧密,有利于降低聚合物的自由体积,减小热膨胀系数。Numata 等采用均苯四甲酸二酐(PMDA)、联苯四甲酸二酐(BPDA)与芳香族二胺合成具有较低热膨胀系数的 PI^[15]。当二胺为单个芳环、二个氨基互相对位时可以得到低 CTE 的 PI。



图 9 薄膜脆裂

Fig. 9 Photo of membrane crack

化学结构固定后,材料聚集态由所用溶剂、固化条件、涂膜方式等因素决定。在固化过程中,使用低沸点的溶剂能够降低分子链的活动性。大分子在面内的取向度较高,聚合物薄膜的残余应力较低,CTE 较低。

固化过程包括预烘和酰亚胺化两步。为了得到低的残余应力,预烘温度应低于开始发生酰亚胺化的温度。预烘时间越长,得到的 PI 薄膜中残余应力越小。预烘完成后,以一定的升温速率进行酰亚胺化,由于残留溶剂的挥发和酰亚胺化时水分的逸出,薄膜在厚度方向收缩,导致分子链在面内取向。升温速率越低,一定温度范围内最终酰亚胺化薄膜越厚,薄膜面内取向越大,引起的残

余应力越低。

表 2 列出了实验中使用的固化条件:聚酰胺酸溶液先经过低温预烘,去除溶剂,再升温酰亚胺化。加热速率、固化时间和固化温度对薄膜的残余应力都有影响。

表 2 固化条件

Tab. 2 Curing conditions

步骤	升温速率/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h
1	2	室温-80	—
2	0	80	1
3	2	80~160	—
4	0	160	0.5
5	2	160~250	—
6	0	250	0.5
7	2	250~300	—
8	0	300	0.5
9	2	300~350	—
10	0	350	1
11	自然冷却	350~室温	—

4.1.3 薄膜与基底的黏结

PI 结构中带有多个羰基,具有强的传荷作用。涂覆于石英刻蚀图形表面的聚酰胺酸溶液经过亚胺化后,形成的 PI 薄膜通过一些化学键合、表面湿润及吸附等作用,与基底产生了黏结。如图 10 所示,当薄膜面积较大时,黏结给薄膜的分离带来了困难,剥离强度太大容易造成薄膜破裂或者褶皱。因此在薄膜涂覆前,对石英基底进行表面预处理。将基底至于 120 $^{\circ}\text{C}$ 水蒸气中预处理 48 h,再进行后续工艺,有助于减少薄膜与基底的黏结。



图 10 薄膜褶皱

Fig. 10 Photo of membrane wrinkle

此外,PI 的化学结构和性质对它与基底的黏结有很大的影响。

4.1.4 衍射效率均匀性优化

衍射效率定义为+1 级衍射光能量 E_{+1} 与入射光总能量 E_i 的比值,入射波长为 633 nm,即有:

$$\eta = E_{+1}/E_i. \quad (4)$$

如图 11 所示,对局部低效率薄膜区域所对应的石英基底区域进行原子力显微镜扫描分析,发现占空比接近 0.6,这说明对应区域内石英基底的线宽过大。

在第一步石英基底制作过程中,光刻工艺完成后,采用局部氧气等离子体轰击法来减小该区域光刻胶掩膜的占空比,最终经过刻蚀转移和薄膜复制来改善薄膜占空比的均匀性,进而改善薄膜衍射效率的均匀性。

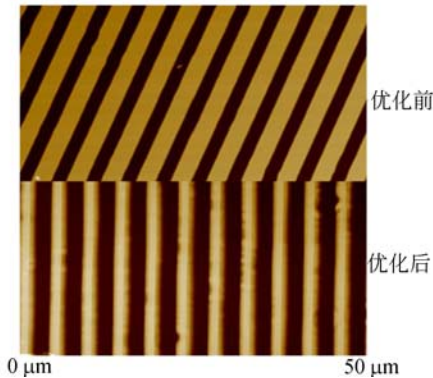


图 11 占空比优化结果图

Fig. 11 AFM of duty cycle before and after optimization

4.2 薄膜衍射效率的影响因素

+1 级衍射效率达到理论效率的 81.83%,经分析影响效率的因素主要有薄膜对光能的吸收和反射、槽深误差以及线宽误差。

4.2.1 薄膜对光能的吸收和反射

本文所制作的薄膜呈淡黄色,在使用波段的光能透过率为 88%。透明 PI 薄膜能有效提高光能利用率。通过引入含氟基团,脂环结构单元等方法能有效增加 PI 的透明性。研制透明、与基底可分离的薄膜是下一步工作的重点。

4.2.2 薄膜槽深误差

平行光垂直入射菲涅尔波带片,2 台阶模型中,相邻波带光程差应为 $\lambda/2$,故台阶深度为:

$$d = \frac{\lambda}{2(n-1)}, \quad (5)$$

其中: n 为材料的折射率, λ 为设计波长。这里

$n=1.72$, $\lambda=633$ nm,故 $d=440$ nm。经过台阶仪测试,薄膜的实际槽深为 420 nm。由 GSlover 软件模拟可知,20 nm 的槽深误差使得+1 级衍射效率降低约 1%。

薄膜的槽深误差来源主要有两个方面:(1) 基底的槽深误差。(2) 薄膜复制过程中的失真。基底槽深的测量值为 430 nm,由此可知薄膜的复制过程槽深减小 10 nm,约占 2.3%。适当增加基底的刻蚀深度可以抵消薄膜复制中槽深失真造成的影响。

4.2.3 薄膜线宽误差

薄膜复制图形线宽的占空比在 0.45~0.55。由 GSlover 软件模拟可知,该线宽误差使+1 级衍射效率降低约 1%。线宽误差来源于基底,因此需改善基底的线宽误差。

4.3 薄膜的使用

4.3.1 制作误差的影响

4.3.1.1 薄膜分离造成的局部变形

酰亚胺化后薄膜与基底存在一定黏结性,给薄膜的剥离带来了困难。剥离过程对薄膜造成的任何损伤都是不可逆的。如图 12 所示,设某剥离强度下,入射高度 r 处的薄膜形变量为 Δr ,则光程差为 Δl 。由泰勒展开:

$$\Delta l = \Delta r \sin \theta \approx \frac{r}{f} \Delta r, 0 \leq r \leq D/2,$$

$$\Delta r = 2 \frac{f}{D} \Delta l, \Delta l \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (6)$$

本文中 $D=400$ mm, $f=6$ m, $\Delta r=4.7$ μ m。可见剥离造成的薄膜形变必须控制在很小的范围内,对加工工艺提出了非常高的要求。

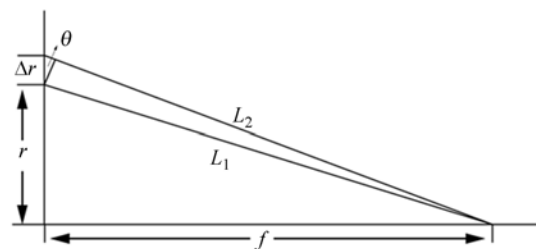


图 12 薄膜局部变形的影响

Fig. 12 Impact of membrane partial elongation

图 13 为优质薄膜和剥离过程中存在局部变形的薄膜成像对比图。可见,优质薄膜±1 级成像清晰,而薄膜局部形变会造成波前误差,使得成像质量大幅下降。

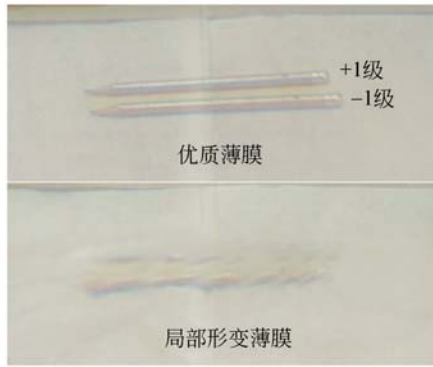


图 13 优质薄膜和局部形变薄膜的成像图

Fig. 13 Image quality of membrane without and with partial elongation

4.3.1.2 薄膜厚度公差

$$\Delta d = \frac{\Delta l}{n-1}, \Delta l = \frac{\lambda}{4}, \Delta d = 0.22 \mu\text{m}, \quad (7)$$

可见薄膜的厚度误差须在 220 nm 以内。

4.3.1.3 基底的面型误差^[16]

$$\Delta Y = \frac{2f^2}{r_{\text{max}}^2} \Delta l, \Delta l = \frac{\lambda}{4}, \Delta Y = 284.8 \mu\text{m}, \quad (8)$$

可见衍射元件的面型误差较为宽松。

4.3.2 温度变化的影响

薄膜刻蚀深度约为薄膜总厚度的 1/50, 在一定的温度变化范围内, 可近似认为薄膜均匀变形, 如图 14 所示。

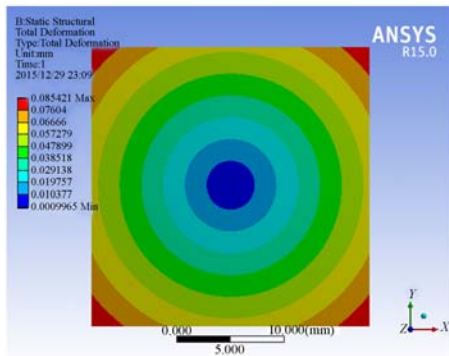


图 14 薄膜热变形图

Fig. 14 Thermal deformation of membrane

薄膜热膨胀系数为 α , 温度变化为 Δt , 第 n 个环带处的半径变化为 $\Delta r_n = r_n \alpha \Delta t$ 。设温度变化前后的焦距分别为 $f, f_{\Delta t}$, 则有:

$$(r_n + \Delta r_n)^2 + f_{\Delta t}^2 = (f_{\Delta t} + n\lambda)^2. \quad (9)$$

略去二阶小量, 可得:

$$f_{\Delta t} = f + \frac{\alpha \Delta t}{n\lambda} r_n^2,$$

$$\Delta f = \frac{\alpha \Delta t}{\lambda} r_1^2 \left(1 + \frac{n\lambda}{4f}\right). \quad (10)$$

由此可见, 不同环带数 n 对应的焦距变化有微小差别。在地球同步轨道使用中温度为 $\Delta t \leq 200 \text{ K}$, 在 400 mm 口径内 $n < 5268$ 。

最里环和最外环的焦距差别为:

$$(n-1) \frac{\alpha \Delta t}{4f} r_1^2 = 13.3 \mu\text{m}. \quad (11)$$

波带片的焦深为^[17]:

$$\Delta Z = \pm 2 \frac{\Delta f^2}{\lambda} = \pm 285 \mu\text{m}. \quad (12)$$

可见温度变化造成的焦距变化可视为常数。在使用过程中, 根据温度变化实时调整目镜光学成像系统与薄膜物镜的距离, 可以消除温度带来的影响。

5 结 论

本文针对空间衍射成像系统的大口径、结构轻量化要求, 设计制造了口径为 400 mm 的衍射薄膜波带片。采用光刻、刻蚀工艺加工石英基底, 再将图形转移至 PI 薄膜, 分析了制作过程中薄膜的热应力分布, 以及薄膜的制作误差对衍射效率和成像的影响。通过局部氧气等离子体轰击法改善了薄膜的衍射效率均匀性。最终得到了衍射效率平均值为 33.14%, RMS=0.01 的大口径衍射薄膜波带片, 达到理论效率的 81.83%。本文工作为国内大口径衍射薄膜元件的研究提供了有益的参考。

参考文献:

[1] HYDE R A. Eyeglass. 1. very large aperture diffractive telescopes [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38

(19): 4198-4212.

[2] HYDE R A, DIXIT S, WEISBERG A, et al.. Eyelass: A very large aperture diffractive telescopes [J]. *SPIE*, 2002, 4894: 28-39.

- [3] BARTON I M, BRITTEN J A, DIXIT S N, *et al.*. Fabrication of large-aperture lightweight diffractive lenses for use in space [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(4): 447-451.
- [4] MEINELI A, MEINEL M. Large membrane space optics: imagery and aberrations of diffractive order and holographic achromatized optical elements of high diffraction order [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(8):1995-2007.
- [5] ATCHESON P, STEWART C, DOMBER J, *et al.*. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes [J]. *SPIE*, 2012, 8442:844221.
- [6] EARLY J, HYDE R, BARON R. Twenty meter space telescopes based on diffractive Fresnel lens [J]. *SPIE*, 2004, 5166: 148-156.
- [7] DOMBER J L, ATCHESON P, KOMMERS J. MOIRE: ground test bed results for a large membrane telescope[C]. *AIAA*, 2014, 1510:1-17.
- [8] PAUL A, JEANETTE D, KEVIN W. MOIRE-ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope [J]. *SPIE*, 2014, 9143: 91431w.
- [9] BRITTEN J, DIXIT S, DEBRUYCKERE M, *et al.*. Large-aperture fast multilevel Fresnel zone lenses in glass and ultrathin polymer films for visible and near-infrared imaging applications [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(11):2312-2316.
- [10] 刘韬. 天基衍射成像系统及相关技术发展研究[J]. *国际太空*, 2014(8):46-52.
- LIU T. Research of space-based diffraction imaging system and related technology [J]. *Space International*, 2014(8):46-52.
- [11] 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.
- LIU M ZH, LIU H, XU W B, *et al.*. Membrane photo sieve for space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2127-2134. (in Chinese)
- [12] 刘华. 利用汉克尔变换设计高斯光束整形衍射元件的应用研究[J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 277-283.
- LIU H. Gaussian beam shaping diffractive optical element designed by Hankel transformation [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 277-283. (in Chinese)
- [13] CHEN X L, SU Y, JIAO J C. Technologies of diffractive imaging system for high-resolution earth observation from geostationary orbit [J]. *SPIE*, 2013, 8908: 890823.
- [14] CHUNG H, JOY Y, HAN H. Effect of poly(amic diethyl ester) precursor on residual stress behavior of aromatic polyimides [J]. *Polymer Journal*, 1999, 31(9):700-706.
- [15] NUMATA S, FUJISAKI K, KINJO N. Re-examination of the relationship between packing coefficient and thermal expansion coefficient for aromatic polyimides [J]. *Polymer*, 1987, 28: 2282-2288.
- [16] 刘华, 卢振武, 阎勇. 大口径衍射望远镜系统公差分析及测量[J]. *光子学报*, 2013, 42(10):1023-1027.
- LIU H, LU ZH W, YAN Y. Large aperture diffractive telescope tolerance analysis and measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(10): 1023-1027. (in Chinese)
- [17] 张智斌. 波带片的设计及其衍射特性研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
- ZHANG ZH B. *Design of Zone Plates and Their Diffraction Characteristics* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)

作者简介:



张 健(1991—),男,福建龙岩人,博士研究生,2013年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事衍射光学和微细加工方面的研究。E-mail: zjian@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



刘正坤(1981—),男,河南信阳人,副研究员,2009年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事衍射光学元件设计及制作的研究。E-mail: zhkliu@mail.ustc.edu.cn