

文章编号 1004-924X(2014)08-2127-08

用于空间望远镜的膜光子筛

刘民哲^{1,2}, 刘 华¹, 许文斌¹, 王泰升¹, 卢振武¹, 鱼卫星^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对空间衍射成像系统对大口径、结构轻量化、空间可展开等特性的要求,设计并制作了用于空间望远镜的新型衍射元件——PI 薄膜光子筛。首先,分析了光子筛的设计理论;针对空间应用的特点和原则,采用振幅型光子筛的设计思路给出设计参数;用 UG 软件设计并加工制作了光子筛的机械固定结构。然后,通过镀膜、光刻、刻蚀等微细加工工艺制作了 PI 薄膜光子筛。最后,测试了光子筛的衍射效率及成像性能。实验结果表明:光子筛在波长 632.8 nm 处的实际衍射效率为 4.916%,是理论值的 73.9%。使用 He-Ne 激光器,选取 10 μm 的星点孔进行星点检测,得到了理想的艾里斑图像,其直径为 176.70 μm ,与理论极限值 169.84 μm 的误差仅为 4.04%。搭建了分辨率板成像实验,测得薄膜光子筛的实际最高分辨频率为 12.2 lp/mm,接近理论极限空间频率 14.4 lp/mm,表明实验结果与理论分析基本相符。与其它刚性材料基底制成的光子筛相比,采用 PI 薄膜制作的光子筛不仅重量轻,同时具有较好的成像性能,可以满足空间望远镜主镜的应用要求。

关 键 词:空间望远镜;衍射元件;PI 薄膜;光子筛;衍射效率;成像性能

中图分类号:O436.1;TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2127

Membrane photon sieve for space telescope

LIU Min-zhe^{1,2}, LIU Hua¹, XU Wen-bin¹, WANG Tai-sheng¹, LU Zhen-wu¹, YU Wei-xing^{1*}

(1. *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)*

** Corresponding author, E-mail: yuwx@ciomp.ac.cn*

Abstract: According to the requirements of a space diffraction imaging system for large-aperture, weight-lightening and space deployable, a new diffraction optical element, PI photon sieve, was designed and fabricated. Firstly, the design theory of PI photon sieve was analyzed and the design parameters for an amplitude photon sieve were given according to the characteristics and the principle of space applications. Then, the mechanical structure of the photon sieve was designed by using UG software and a PI membrane photon sieve was successfully manufactured by employing micro-fabrication methods including e-beam vacuum coating, photolithography and wet etching. Finally, the diffraction efficiency of the PI photon sieve was measured and the imaging performance was tested. The experimental results show that the diffraction efficiency of photon sieve is 4.916% at the wavelength

收稿日期:2013-10-11;修订日期:2013-12-05.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 61137001);国家自然科学基金面上资助项目(No. 90923036, No. 60977041);中国科学院“百人计划”资助项目。

of 632.8 nm, which is about 73.9% of the theoretical value. For the star testing, by choosing the star hole with a diameter of 10 μm and using a He-Ne laser for the light source, an ideal Airy disc with a diameter of 176.70 μm was obtained, which is very close to the theoretical value, and the error is only 4.04%. For the imaging experiments, the maximum resolution of the photon sieve is measured to be 12.2 lp/mm, which is close to the spatial frequency limit of 14.4 lp/mm. It is shown that the experimental results are generally in agreement with the theoretical results. Comparing with other diffractive elements, PI photon sieve satisfies the application requirement of the primary mirror used in a space telescope for its lighter weight and better imaging performance.

Key words: space telescope; diffractive optical element; PI film; photon sieve; diffraction efficiency; imaging performance

1 引言

随着高新武器装备的发展和信息化程度的提高,战争形态也随之发生了重大变化。天基作为一个重要的战场已成为未来高技术局部战争的发展趋势,其中包括天基视频监视系统,它可以向作战人员提供持续、实时、高清的战术视频。从目前的技术水平看,位于地球同步轨道的光学成像系统可以不受干扰获得该视频信息;然而,若在地球同步轨道的高度获得较高的地面目标分辨率,则需要研制大口径的空间光学系统。

衍射光学元件^[1-3]具有轻薄和公差宽松的特点,随着一些关键技术的突破,欧美等发达国家已经明确将衍射技术作为未来 10~20 年解决下一代超大口径天基空间望远镜轻量化、高分辨的主要途径。2001 年,德国科学家 Kipp 等^[4]在 Nature 中首次提出光子筛的概念,采用微纳透光小孔代替波带片中的透光环带。这种新型衍射元件不但具有传统衍射元件可以对极短波长成像的特性,而且能够有效地抑制旁瓣和高阶衍射,改善成像质量。由于光子筛的这些特点,人们对光子筛进行了一系列深入研究,并取得了相应的成果^[5-10]。

传统的光子筛采用玻璃基底或者金属薄片制作。胡百泉等^[11]用全息干板在像面记录,制成体全息光学器件;李亚文等^[12]在铬版上制备光子筛,研究其超分辨聚焦特性。为了使光子筛更加轻便,更好地适用于空间望远镜,Geoff Andersen 等尝试寻找新的基底材料,并对其在太空望远镜上的应用做了相关研究^[13,14]。本文设计了一种

适用于太空望远镜的薄膜光子筛,使用 PI 柔性材料作为基底。详述了机械固定与工艺加工的过程以及工艺的技术难点。最后测试了衍射效率和成像性能,并对实验结果进行了分析和讨论。目前国内还没有薄膜光子筛的相关报道,本文的研究成果,将为我国未来大口径空间望远系统的实现提供参考。

2 光子筛设计

光子筛的概念提出之后,德国 Hagen 大学的 Qing Cao 团队^[15]对光子筛远场成像理论进行了理论推导及分析,该分析立足于菲涅尔-基尔霍夫衍射积分公式:

$$(X, Y) = \frac{1}{\lambda q} \iint_{-\infty}^{\infty} V_n(x, y) \times \exp \left[jk \frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{2q} \right] dx dy, \quad (1)$$

其中: λ 为波长, j 为虚数单位, k 为波数, q 为 xy 平面与 XY 平面间距。

光场与筛孔的大小如下关系:

$$U_n(0, 0) \propto \frac{d}{\omega} J_1 \left(\frac{\pi d}{\omega} \right). \quad (2)$$

公式表明:筛孔孔径 d 与对应的波带片环带宽度 ω 的比值决定了像面光场的强弱,其振动趋势基于一阶贝塞尔函数。因此,经典的孔径尺寸选择条件为:

$$\frac{d}{\omega} = 1.53, 3.52, 5.51, \dots, \quad (3)$$

通常选为 1.53。

对于给定波长 λ , 焦距 f , 波带片的第 n 级透

光环带的位置 r_n 可表示为:

$$r_n^2=2nf\lambda+n^2\lambda^2,$$
 (4)

第 n 级透光环带的宽度 ω_n 为:

$$\omega_n=\frac{\lambda f}{2r_n}.$$
 (5)

根据振幅型光子筛设计理论及设计要求完成设计过程。图 1 为光子筛设计图样,由于筛孔数量较多,图中所示仅为中心的一部分。

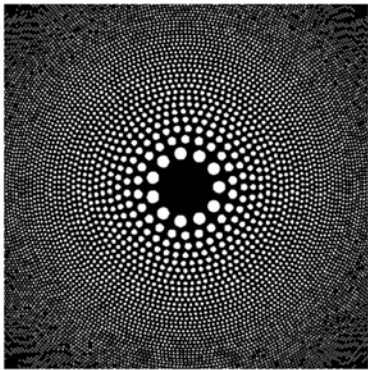


图 1 光子筛部分图样
Fig. 1 Part of photon sieve pattern

设计结果参数如表 1 所示。

表 1 光子筛设计参数

Fig. 1 Design parameters of photon sieve

项目	应用波段 /nm	设计波长 /nm	口径 /mm	焦距 /m
参数	450~900	700	100×100	14.14
项目	总环带数 /个	筛孔总数 /个	最内孔孔径 /μm	最外孔孔径 /μm
参数	178	266 839	1 403.10	104.90

3 薄膜光子筛的工艺实现

3.1 机械固定结构设计

由于 PI 薄膜非常薄,仅有 29 μm,为了保证制作的可行性,先将等厚薄膜镶嵌于金属框架内。采用 UG^[16] 软件设计固定机械结构,将薄膜采用黏胶方式预固定到圆形内框上,内框架放入外框后,利用顶丝将内框和外框压紧,夹住薄膜,将支撑架套入内框,最后用压圈对支撑架施加预紧力,撑起薄膜。结构与装配如图 2 所示,加工参数如表 2 所示。



(a)圆形机械结构设计图 (b)圆形机械结构实物图
(a)Design of circular (b)Real figure of circular-
mechanical structure mechanical structure



(c)圆形机械固定结构装配图
(c)Cross-section of circular mechanical fixed structure

图 2 机械设计与实物图

Fig. 2 Mechanical design and real figure

表 2 加工参数

Tab. 2 Machining parameters

主要机械参数		PI 薄膜参数	
内框有效孔径/mm	157.5+0.05	膜厚/μm	29
内框外径/mm	168±0.05	光学透过率 (400nm, %)	91
压圈紧固压力角/(°)	53	抗拉强度/MPa	178
支撑架内径/mm	152.5±0.05	断裂深长度/%	57
支撑架支平面度/mm	±0.002	热分解温度/℃	550
外框直径/mm	182.5±0.1	热膨胀系数/ (×10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)	21
外框厚度/mm	15±0.05	玻璃化转变温度/℃	290

最后加工出来的圆形光子筛实物如图 2(b) 所示,通过机械结构可以计算出光子筛的拉伸形变仅为 0.268 6%,薄膜表面平整度非常理想。光子筛复制完成后,在做好的固定圆框内放入方形边框,利用紫外固化胶将薄膜与边框表面黏合住,固化后,去除圆形固定边框,可得到方形固定框的薄膜光子筛。

3.2 加工制作

3.2.1 加工流程

PI 薄膜光子筛的加工工艺主要包括镀膜、光

刻、刻蚀 3 个步骤,图形复制工艺流程如图 3 所示。

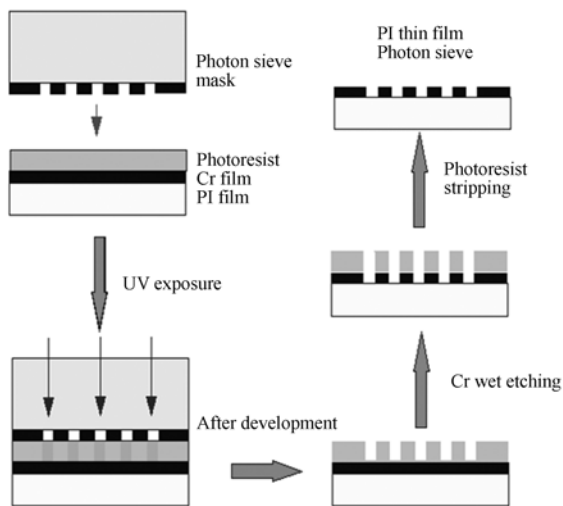


图 3 光子筛微细加工工艺流程

Fig. 3 Micro fabrication process for thin film photon sieve

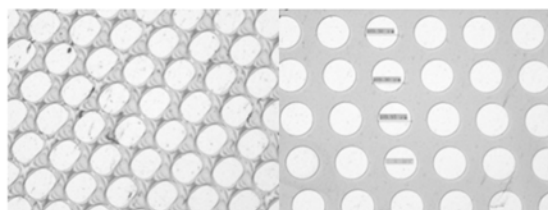
3.2.2 工艺难点

(1) 涂胶

对于玻璃基底或者金属薄片,由于表面比较光滑平整,涂胶完毕后不存在光刻胶流动的问题。PI 薄膜在匀胶完毕后,需要在空气中静置一段时间。

(2) 曝光

使用 UV 紫外接触式曝光机时,要保证基底与掩模板接触的均匀性。对于 PI 薄膜,通常在机械结构制作时,薄膜高于金属框架 5 mm 左右。图 4 给出了曝光时基底与掩模板均匀接触与非均匀接触对应的复制图形。



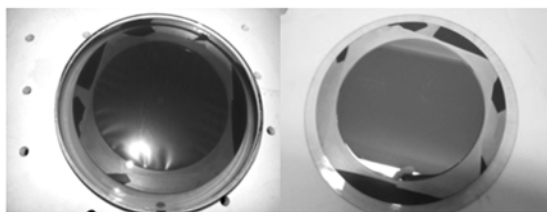
(a) 未均匀接触 (b) 均匀接触
(a) Contact unevenly (b) Contact evenly

图 4 显微测试图形

Fig. 4 Microscope test pattern

(3) 显影

对于刚性基底材料,经过显影液浸泡之后,不会出现吸水变形等问题,对于 PI 薄膜,显影之后,会出现一定的褶皱,如图 5(a) 所示,将薄膜置于烤箱中,用 65~90 °C 递增的温度来进行烘烤,使薄膜恢复到平整的状态,如图 5(b) 所示。



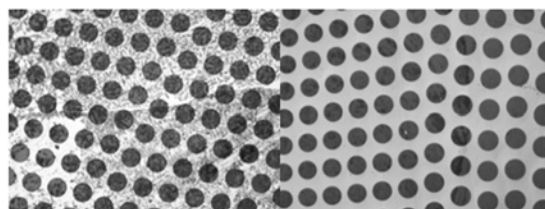
(a) 显影后 (b) 烘干处理后
(a) After development (b) After baking

图 5 光子筛实物图

Fig. 5 Physical figure of photon sieve

(4) 刻蚀

对于刚性基底,通常可以直接用清水冲洗,对于 PI 薄膜,需用清水浸泡。若浸泡不充分,会导致腐蚀液与丙酮发生反应,产生杂质污染图形,如图 6(a) 所示。充分浸泡后,可以得到干净的图形,如图 6(b) 所示。



(a) 浸泡不充分 (b) 充分浸泡
(a) Not fully immersed (b) Fully immersed

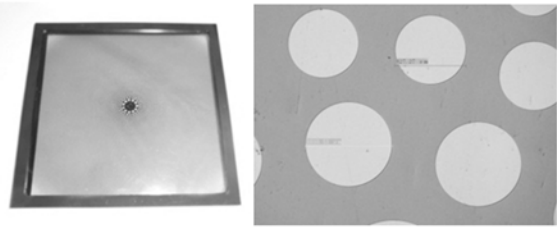
图 6 显微测试图形

Fig. 6 Micrographs of photon sieve

3.2.3 加工参数测试与分析

加工完成,得到方形光子筛,如图 7(a),通过高倍显微镜,观察到制作的光子筛小孔很圆,拼接精度高,小孔透彻干净,如图 7(b) 所示。

进一步测量光子筛环带上小孔的尺寸,表 3 仅列出不同区域部分环带光子筛的实测值、理论值以及对应掩模板的测量参数,并分别计算了实测值与理论值和掩模板的相对误差 η_1 、 η_2 。



(a)实物图 (b)中心环带显微测试图
(a)Physical figure (b)Microscopic test pattern of central zone

图 7 薄膜光子筛实物图与显微镜图

Fig. 7 Physical figure and micrographs of photon sieve

表 3 环带小孔直径

Tab. 3 Hole diameter of zone

环带 序数	设计理论 值/ μm	掩模板测 量值/ μm	光子筛实 测值/ μm	相对误 差 $\eta/\%$	相对误 差 $\eta_e/\%$
1	1 403.10	1 424.16	1 424.16	1.50	0
2	992.20	1 005.29	1 010.53	1.85	0.52
3	810.10	824.65	827.27	2.12	0.32
20	313.70	315.46	319.39	1.81	1.25
21	306.20	308.92	316.77	3.45	2.54
177	105.20	104.72	107.99	2.65	3.12
178	104.90	103.41	107.21	2.20	3.67

测量结果表明:实际制作的光子筛与理论设计的光子筛存在微小的误差,误差为 1.50%~3.51%。实际的小孔孔径普遍大于理论值,这可能是由柔性材料的特性以及机械固定结构决定的。掩模板的测量值与理论设计值也存在误差,为 0~3.72%,这一方面来源于掩模加工误差,另一方面可能是由读数误差造成的。通过比较实测值与掩模板的测量值可以发现,靠近中心区域部分,图形复制的非常理想,往外环延伸,图形复制效果略微降低,然而,由于最外环小孔孔径远小于中心孔径,因此在实际应用中几乎不会影响成像效果。综上,实验制作效果比较理想。

4 成像检测及结果

4.1 衍射效率

(1)测试原理及方法

衍射效率定义为主衍射级光强和入射光强之比,使用+1级衍射,测试实验原理如图 8 所示。先测得光子筛主衍射级能量 E_d ,之后移去光子

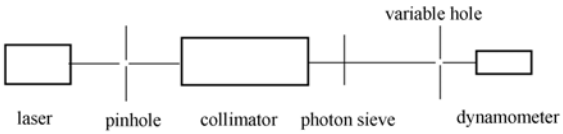


图 8 衍射效率测试实验原理图

Fig. 8 Schematic diagram for diffractive efficiency measurment of photon sieve

筛,直接测定入射光总能量 E_i ,得到光子筛衍射效率:

$$\eta = E_d / E_i. \quad (6)$$

对于非设计波长,光子筛的衍射效率计算公式^[17]:

$$\eta_m(\lambda) = \sin^2 \left[\left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda} \right) m \right] \eta_m(\lambda_0), \quad (7)$$

其中: m 为衍射级次, λ_0 为设计波长,设计波长对应衍射效率由光子筛设计参数决定,为定值 6.75%。由式(7)可以求得波长 632.8 nm 对应的衍射效率为 6.65%。

(2)测试数据

应用上述原理及实验装置进行光子筛透镜+1级衍射效率的测试,实验数据如表 4 所示。

表 4 衍射效率测试数据

Tab. 4 Test data of diffraction efficiency

次数	1	2	3	4	5
E_d/nW	31.01	31.41	31.37	30.04	31.43
E_i/nW	632.78	620.89	627.43	630.74	623.37
$(E_d/E_i)/\%$	4.90	5.06	5.00	4.76	5.04
次数	6	7	8	9	10
E_d/nW	30.03	31.42	30.47	31.14	30.04
E_i/nW	621.15	628.80	633.45	629.36	626.41
$(E_d/E_i)/\%$	4.84	5.00	4.81	4.95	4.80

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{n=1}^{10} \eta_n}{10} = 4.916\%.$$

(3)实验结果与分析

使用 632.8 nm 波长的 He-Ne 激光器进行光子筛衍射效率的测试,实验结果如表 5 所示。从实验结果发现,衍射效率的测量值相对于理论值有所下降,但仍然占到理论值的 73.9%。分析误差原因,主要包括:

(a)掩模制作误差、对准误差及线宽误差大大降低了衍射效率。

(b)刻蚀深度误差引起位相延迟误差,并改变了光波的远场分布,从而导致衍射效率的下降。

(c)平行光路系统调节引起的测量误差。

表 5 衍射效率测试值与理论值比较

Tab. 5 Comparison of testing and theoretical values of diffractive efficiency

衍射效率/(%)	
测量值	4.916
理论值	6.65

4.2 成像性能

4.2.1 星点检测

(1)检测原理及光路

星点检测的基本思想是通过考察光学系统对一个点物基元的成像质量来了解和评定光学系统对任意物分布的成像质量。星点检测原理如图 9 所示。

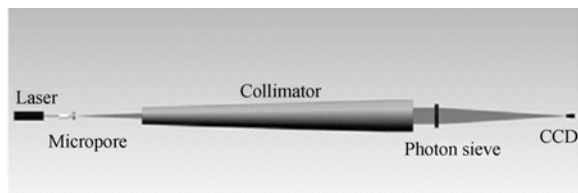


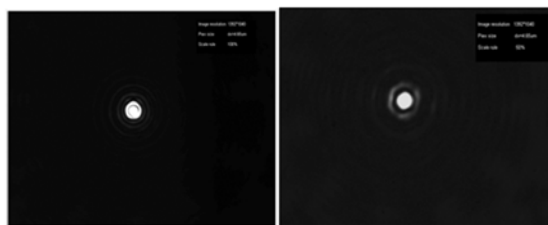
图 9 星点检测原理图

Fig. 9 Schematic diagram of star image test

照明光源选用 He-Ne 激光器,波长 $\lambda=632.8$ nm,实际焦距 $F=15.6$ m,该光子筛的 $F/\# = 110$,入瞳孔径 $D=50$ mm,所用平行光管的焦距 $F'_c=1\ 600$ mm。选用 $10\ \mu\text{m}$ 大小的针孔作为星点孔,爱里斑 D_i 的理论值为 $169.84\ \mu\text{m}$ 。

(2)检测结果与讨论

分别检测玻璃基底掩模板与光子筛对应的艾里斑图像,检测结果如图 10:



(a)掩模板 (b)光子筛
(a)Mask making (b)Photon sieve

图 10 艾里斑图像

Fig. 10 Airy pattern image

通过检测结果可以看到,掩模板所对应的艾里斑图像中心亮斑圆度好,成像完善,第一亮纹完整,但能量过高。光子筛的艾里斑图像非常理想,具有很好的圆对称性,中心亮斑清晰,能量分布与理论基本相符^[18]。对艾里斑进行了定标测量如图 10(b)所示,测量孔径为 $176.70\ \mu\text{m}$,这与理论的 $169.84\ \mu\text{m}$ 非常接近,误差仅为 4.04% 。综上所述,薄膜光子筛具有很好的聚焦性能。

4.2.2 分辨率板检测

(1)测试原理

为了进一步评价光子筛的成像性能,搭建分辨率板成像实验,以观测和分析光子筛对实际物体的成像效果。对系统分辨率的测量如图 11 所示,红光 LED 作为照明光源(波长为 $628, 630$ 和 $632\ \text{nm}$),在平行光管的后焦面上放置国产 5# 分辨率板,分辨率板上的线对通过平行光管和光子筛后成像在 CCD 上。

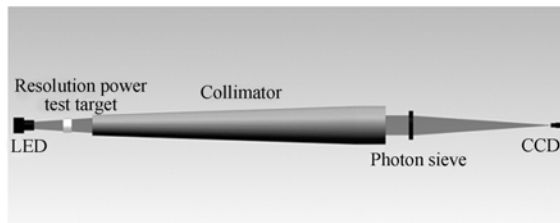


图 11 分辨率板检测原理图

Fig. 11 Schematic drawing of resolution test

(2)结果及讨论

图 12 给出了光子筛传递函数曲线(MTF)仿真曲线,参数 λ 分别为 $0.628, 0.630$ 和 $0.632\ \mu\text{m}$,焦距 F 分别为 $15.72, 15.67$ 和 $15.63\ \text{m}$,利用 MTF 可以求得系统的分辨率^[19],光子筛的理论分辨率为 $14.4\ \text{lp/mm}$ 。

对空间频率 $50\sim 200\ \text{lp/mm}$ 的分辨率板进行检测,抽样结果如图 13 所示,可以看出,13(a)(b)由于信号的空间频率较小,所采集图像在横向和纵向均很清晰。但当信号频率增大到 $120\ \text{lp/mm}$ 后,如图 13(c)所示,其图像在纵向依然很清晰,而在横向则因为存在像散不如纵向清晰。空间频率继续增大,线对将在 2 个方向均无法分辨,如图 13(d)。

实验中能够分辨到第 16 个单元,17~25 单元的条纹无法分辨,经过查表(FPG-9 平行光管使用说明书)可得第 16 单元对应的分辨率为 120

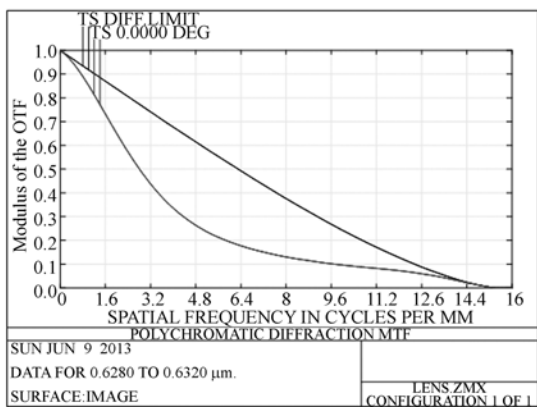
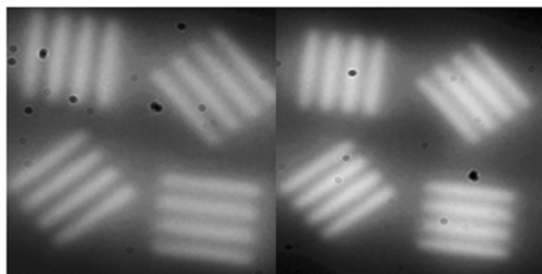


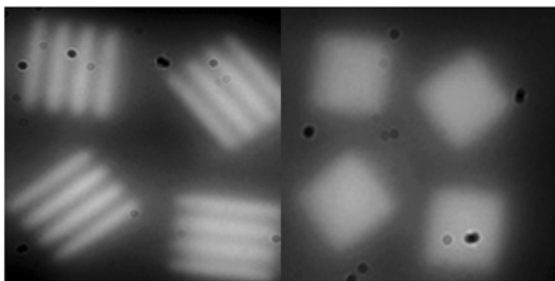
图12 光子筛 MTF 仿真曲线

Fig. 12 Simulated MTF curves of photon sieve



(a)70 lp/mm

(b)95 lp/mm



(c)120 lp/mm

(d)130 lp/mm

图13 不同分辨率图像

Fig. 13 Images of different resolutions

lp/mm, 这个线对数对应的线宽为 $4.20 \mu\text{m}$ 。考虑检测光路对图像的放大作用, 光子筛的实测空间频率应该是查表所得分辨率与系统放大倍率的比值, 根据望远系统的放大倍率计算理论^[19]:

$$\Gamma = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{D}{D'} \quad (8)$$

可知测量系统的放大倍率为 9.8 倍, 因此薄膜光子筛的实测最高分辨频率为 12.2 lp/mm。

结果表明: 薄膜光子筛的实测分辨空间频率为 12.2 lp/mm, 比理论极限值 14.4 lp/mm 略低, 这可能是由工艺加工误差, 光路误差等因素造成的。综上所述, 实验结果与理论结果基本相符, 实验所制作的光子筛成像性能比较理想。

5 结 论

本文首先针对光子筛在空间望远镜上应用的特点和原则, 采用振幅型光子筛的设计思路, 给出设计参数。然后设计并制作了光子筛的固定机械结构, 通过镀膜、光刻、刻蚀等微细加工工艺完成了光子筛的制作, 并详述了工艺加工的过程和技术难点。最后, 测试了光子筛的衍射效率, 同时检测了成像性能。实验结果表明: 采用 He-Ne 激光器, 测得光子筛衍射效率为 4.916%, 尽管与理论的 6.65% 相比有所下降, 但是在应用中仍然可以接受; 采用星点检测的方法, 得到了非常理想的艾里斑图像, 测量得到其直径为 $176.70 \mu\text{m}$, 非常接近理论极限的 $169.84 \mu\text{m}$, 误差仅为 4.04%, 说明光子筛具有良好的聚焦特性; 搭建分辨率板成像实验, 测得光子筛的实际最高分辨率为 12.2 lp/mm, 接近理论的分辨率 14.4 lp/mm, 实验结果与理论分析基本相符。综上, 实验制作的薄膜光子筛除了轻便, 还具有良好的成像性能, 可以满足空间望远镜主镜的应用要求。

参考文献:

- [1] ALEXEI ERKO, ALEXANDER F. 高分辨率 X 射线衍射光学元件[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(12): 1816-1822.
ALEXEI E, ALEXANDER F. High-resolution diffraction X-ray optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1816-1822. (in Chinese)
- [2] 陈继民, 何超, 周伟平, 等. 光纤激光诱导背面干法刻蚀制备二元衍射光学元件[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(1): 31-37.
CHEN J M, HE CH, ZHOU W P. Fabrication of binary diffractive optical element by fiber laser induced backside dry etching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 31-37. (in Chinese)
- [3] 邱克强, 周小为, 刘颖, 等. 大尺寸衍射光学元件的扫描离子束刻蚀[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1676-1683.

- QIU K Q, ZHOU X W, LIU Y, *et al.*. Ion beam etching of large aperture diffractive optical elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1676-1683. (in Chinese)
- [4] KIPP L, SKIBOWSKI M, JOHNSON R L, *et al.*. Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves [J]. *Nature*, 2001, 414(6860): 184-188.
- [5] XIE CH Q, ZHU X L, LI H L, *et al.*. Feasibility study of hard-X-Ray nanofocusing above 20 keV using compound photon sieves [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(23): 4048-4050.
- [6] MATTHIAS K, JENS B, HARM S, *et al.*. Focusing light with a reflection photon sieve [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(13): 2405-2407.
- [7] CHENG M S, ZHOU CH G. Optimizing photon sieves to approach Fresnel diffraction limit via pixel-based inverse lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, 29(4): 041002-1-7.
- [8] KATHY K. Photon sieves enhance weapons vision [J]. *Laser Focus World*, 2004, 40(2): 34-37.
- [9] DAVILA J M. High-resolution solar imaging with a photon sieve [J]. *SPIE*, 2011, 8148: 81480O.
- [10] RAJESH M, DARIO G. Photon-sieve lithography [J]. *J. Opt. Am. A*, 2005, 22(2): 312-345.
- [11] 胡百泉, 苏永道, 贾大功. 光子筛及其优化设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(1): 012302.
- HU B Q, SU Y D, JIA D G. The photon sieve and its optimal design [J]. *Laser and optoelectronics Progress*, 2010, 47(1): 012302. (in Chinese)
- [12] 李亚文, 陈军宁, 贾佳, 等. 光子筛的超分辨聚焦特性研究 [J]. *光电工程*, 2009, 36(3): 130-134.
- LI Y W, CHEN J N, JIA J, *et al.*. Super-resolution focus property of photon sieves [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(3): 130-134. (in Chinese)
- [13] GEOFF A, OIHA A, MICHAEL E. Dearborn, *et al.*. FalconSAT-7: A Membrane Photon Sieve CubeSat Solar Telescope [J]. *SPIE*, 2012, 8442: 84421C.
- [14] GEOFF A, MICHAEL E D, MATTHEW G M, *et al.*. Membrane photon sieve telescope [J]. *SPIE*, 2010, 8167: 816714.
- [15] CAO Q, JAHNS J. Focusing analysis of the pin-hole photon sieve: individual far-field model [J]. *J. Opt. Am. A*, 2002, 19: 2387-2393.
- [16] 丁源, 李秀峰. UG NX 8.0 中文版从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- DING Y, LI X F. UG NX 8.0 Chinese Version From Entry to the Master [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2013. (in Chinese)
- [17] JOSEPH W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. The United States of America: Roberts & Company Publishers, 2005.
- [18] 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.
- SHI SH X, WANG X E, LIU J S. *Physical Optics and Applied Optics* [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [19] 张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Beijing Industry Press, 2010. (in Chinese)

作者简介:



刘民哲(1988—),男,山东莱芜人,博士研究生,2011年于内蒙古大学获得学士学位,主要从事衍射光学和微纳光学方面的研究。E-mail: liuminzhe_ciomp@126.com

导师简介:



鱼卫星(1975—),男,陕西临潼人,博士后,研究员,博士生导师,1998年于西北工业大学获学士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获理学硕士学位,2004年于新加坡南洋理工大学获博士学位,主要研究领域包括亚波长光学、微纳光学、表面等离子体光学、微细加工技术、三维微纳加工技术等。E-mail: yuwx@ciomp.ac.cn