doi:10.3788/gzxb20174603.0322001

高衍射效率衍射望远镜系统的设计/加工及成像性能测试

王若秋[1,3],张志宇[1],国成立[1,3],薛栋林[1],张学军[1],刘华[2]

(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,长春 130033)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心,长春 130033)

(3 中国科学院大学,北京 100049)

摘　要:为提高衍射效率,设计并制作了口径为 300 mm 的衍射成像系统. 该系统的物镜是由一块四台阶位相型菲涅尔波带片通过激光直写套刻和 Ar 离子束物理刻蚀技术在石英玻璃基板上加工而成. 测试了衍射物镜的衍射效率,实验结果表明:衍射物镜在波长 632.8 nm 处的衍射效率为 66.4%,达到理论值的 82%. 搭建了衍射成像系统光路,分别采用 10 μm 星点孔与分辨率板,测试了系统的成像性能. 实验测得星点像直径为 44 μm,分辨率板的极限分辨率达到 84 lp/mm,接近该系统的理论计算值,表明该衍射成像系统具有较好的成像性能.

关键词:光学设计;空间望远镜;衍射元件;衍射效率;成像性能

中图分类号:O439　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1004-4213(2017)03-0322001-9

Design/fabrication and Performance Test of a Diffractive Telescope System with High Diffraction Efficiency

WANG Ruo-qiu[1,3], ZHANG Zhi-yu[1], GUO Cheng-li[1,3], XUE Dong-lin[1], ZHANG Xue-jun[1], LIU Hua[2]

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

(2 *Opto-electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In order to improve the diffraction efficiency, a diffractive telescope system with 300 mm aperture was designed and fabricated. The primary lens of the proposed system is made form a four-step phase Fresnel zone plate which is fabricated on fused silica substrate by laser direct writing and Ar ion beam etching. The diffraction efficiency of primary lens of the diffractive system was tested. The tested results show that the diffraction efficiency of the diffractive lens at wavelength 632.8 nm is 66.3%, about 82% of the theoretical value. The light path of diffraction imaging system was built, and the imaging performance was tested by both the star image test and the resolution test. The diameter of the star image is 44 μm and the limit resolution is 84 lp/mm, which are very close to the theoretical values, showing the diffractive system has a good imaging performance.

Key words: Optical design; Space-based telescope; Diffractive element; Diffraction efficiency; Imaging performance

OCIS Codes: 220.4830; 220.4830; 050.1940; 090.1970; 080.3620; 120.4610; 110.3000

基金项目:国家自然科学基金(No. 51305422)和国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB013205)资助

第一作者:王若秋(1990-),女,博士研究生,主要研究方向为衍射光学元件的设计与加工. Email:wruoq0725@foxmail.com

导　　师:张学军(1980-),男,研究员,博士,主要研究方向为先进光学制造和空间光学系统等. Email:zxj@ciomp.ac.cn

通讯作者:张志宇(1980-),男,副研究员,博士,主要研究方向为衍射元件加工. Email:zhangzhiyu@ciomp.ac.cn

收稿日期:2016-09-27;**录用日期**:2016-11-22

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0 引言

高分辨率空间对地光学遥感技术是目前世界上空间光学的热点研究领域. 近年来随着对分辨率、灵敏度观测要求的提高,空间光学系统的口径在不断增大. 现有的大口径空间望远镜大多采用反射式光学系统,与透镜相比,镜面面形误差会在光程中被放大两倍,因此对镜面面形准确度的要求非常高[1-2]. 随着口径的增大,研制难度与发射成本呈指数增长. 而超大口径高准确度反射镜的加工需要难以想象的资源消耗与时间成本. 例如,耗资 88 亿美元的詹姆斯韦伯空间望远镜[3],主镜等效尺寸 6.5 m,通过 18 块直径为 1.3 m 的反射镜拼接而成,重 6.2t. 因制造与资金问题,数次遭遇延期,目前推迟至 2018 年发射.

衍射成像技术为大口径空间光学成像系统提供了新思路[4-5]. 与反射式光学系统相比,衍射成像技术具有面形误差要求低、体积小、质量轻、空间可展开、易复制等特点[6]. 衍射成像光学系统一般由物镜和目镜系统组成. 物镜为衍射透镜,主要是通过菲涅尔波带片成像原理汇聚光线. 目镜系统主要包括色差校正和聚焦系统[7-8].

美国在 1998 年提出 Eyeglass 计划,采用衍射成像技术,由两个卫星组网构成望远镜[9-10]. 2010 年,美国在国防高级研究计划局极力推动下,开展了薄膜光学成像器实时应用计划(MOIRE 计划),拟通过衍射成像方式,实现静止轨道的高分辨率对地成像,主镜尺寸约 20m,折叠发射,入轨展开[11]. 法国图卢兹天文台的科学家也提出了基于衍射原理的菲涅尔成像仪. 英国天文技术中心皇家天文台在美国劳伦斯—利弗莫尔国家实验室的工作基础上提出了应用于远红外及亚毫米波段(20～700 μm)的衍射空间望远镜方案[12]. 国内长春光机所、长春理工大学等单位开展了衍射成像系统相关方向的研究,在理论分析及系统设计方面取得了进展[13-14],然而,有关衍射式望远镜系统的性能验证工作鲜有报道.

为验证衍射望远镜系统成像性能,本文设计了口径为 300 mm、焦距为 2 m 的衍射式望远镜系统. 为提高衍射效率,以石英玻璃为基底材料,制作了四台阶菲涅尔波带片衍射物镜,通过搭建系统光路,测试了衍射物镜的衍射效率和该衍射望远系统的成像性能.

1 衍射成像基本原理

位相型衍射元件,如菲涅尔波带片,是透射式元件,入射光通过一个等厚的透射表面,在一个面上的路径延迟会被另一个表面抵消,表面的面形误差对出射光程影响很小,因而降低了对镜面面形准确度的要求. 同时,衍射元件利用厚度为波长量级的表面浮雕结构对光波进行调制,可以做得轻、薄,满足大口径空间望远镜对系统轻量化的需求. 衍射镜片属于透射式元件,具有比反射式元件更宽松的公差,光线入射光学元件,如果光线弯曲角度为 θ,则在反射镜表面的路径长度误差相对于镜面面形误差的放大率因子为 $(1+\cos\theta)$. 相反,对于透射式元件其减少一个因子 $(1-\cos\theta)$,则透射式元件较反射镜具有 $(1+\cos\theta)/(1-\cos\theta)$ 倍的公差优势. 这个公差的增益近似地随着 $4/\theta^2\approx16(F/\#)^2$ 成比例变大. 因此,通过减弱物镜衍射镜片的折光能力,即保证 θ 很小,就可以在很大程度上放松衍射镜片的面形公差要求. 例如,选取衍射镜片 $F/\#=100$,衍射镜片比反射镜具有 1.6×10^5 倍的面形公差增益,从而放松表面面形公差到毫米量级. 但是,衍射元件具有色散大的缺陷,只能在很窄的波段内实现光束聚焦. 衍射元件的焦距与波长成反比例关系,可表示为[4]

$$f_m=\frac{\lambda_0 f_0}{m\lambda} \tag{1}$$

式中,m 是主衍射级次,λ_0 是设计波长,f_0 是设计波长处对应的焦距值.

衍射元件的位相分布可表示为

$$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda_0}(A_1r^2+A_2r^4+\cdots) \tag{2}$$

式中,r 为衍射元件的径向坐标,A_1、A_2 为位相系数,A_1 为光焦度项,其光焦度 $\varphi=-2mA_1\lambda_0$. 根据设计过程确定的各项系数,可以得到透镜二元面各环带半径值.

为实现宽波段应用,需要在衍射物镜后增加校正系统来平衡物镜产生的色差,扩展系统使用波段. 基于 Schupmann 消色差原理,即任何一个有色差的光学元件,其色差的校正都可以通过在其共轭像位置放置一个具有相同色散、相反光焦度的元件来实现[15-16],系统设计原理如图 1. 衍射望远系统由衍射物镜与校正系

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

统组成. 校正系统包括一片场镜和刻蚀有衍射结构的目镜组. 复色光经过衍射物镜发生色散，到达校正系统前在空间与光谱上均产生分离. 光束入射校正系统，首先经过场镜在空间上重新会聚为一点，而后通过目镜组的衍射面在光谱上会聚为一束多色光，成像在 CCD 上，实现色差校正.

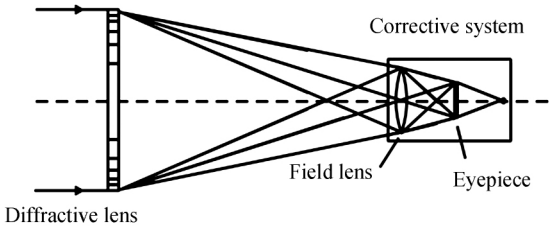


图 1　衍射望远镜系统原理图

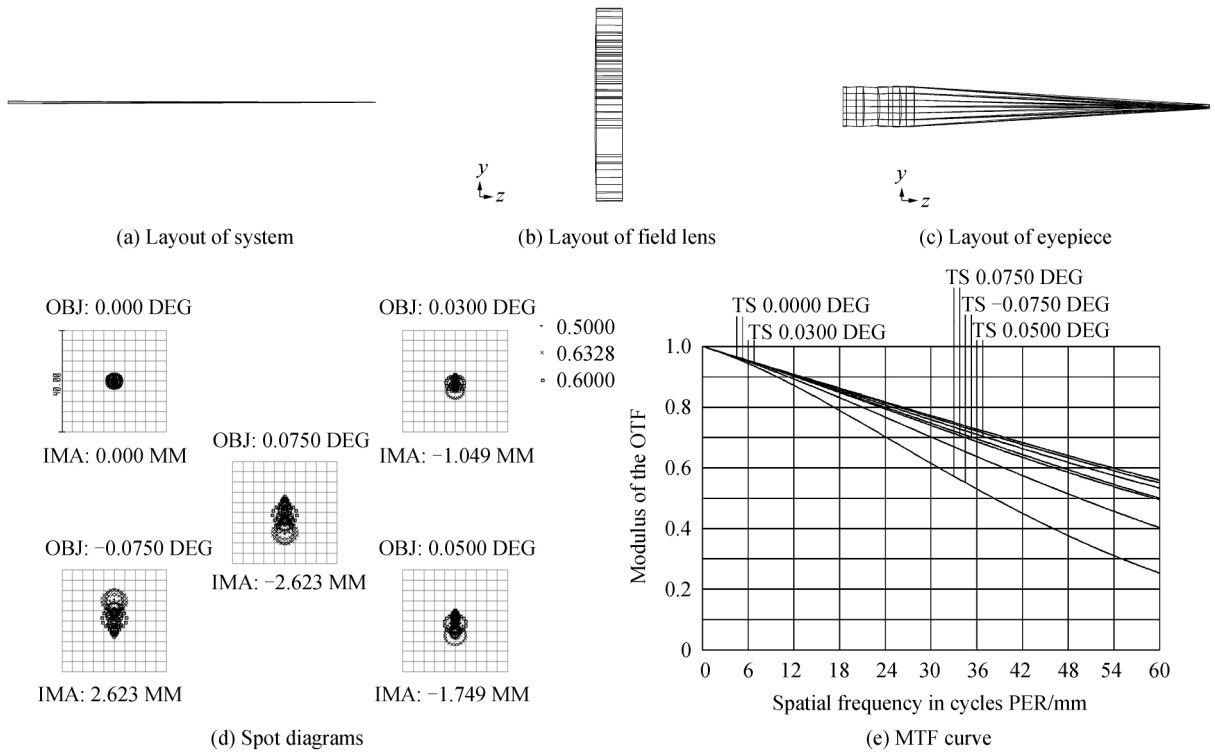
Fig. 1　Schematic diagram of the diffractive telescope system

2　衍射望远镜成像系统设计

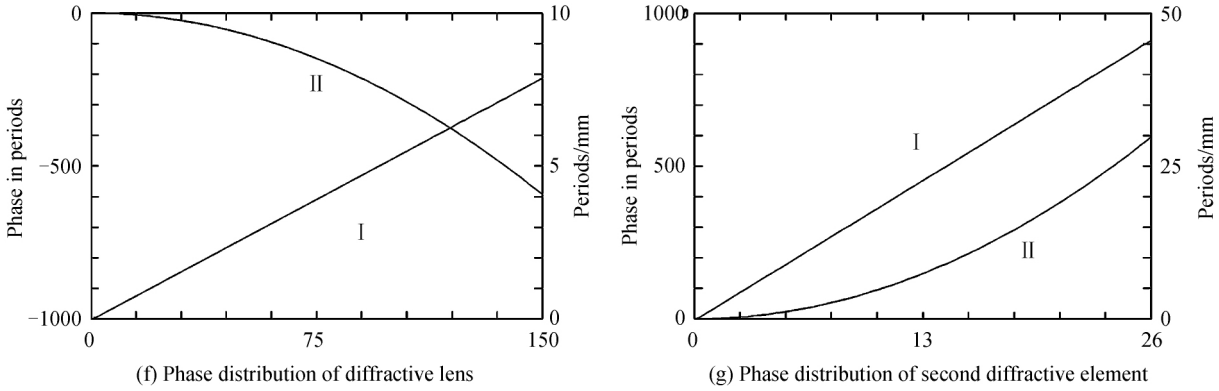
根据衍射成像原理，设计并制作了一个衍射望远镜系统，系统口径为 300 mm，焦距为 2 m，工作波段为 582.8～682.8 nm，视场为 0.15°. 系统中包含两片衍射元件，分别刻蚀于系统物镜与目镜组的第一个光学表面. 校正系统的尺寸决定了使用波段的范围，为使校正系统口径最小，将场镜放置在中心波长所对应的衍射物镜焦点位置，而第二片衍射元件即目镜组口径的大小则由边缘波长在目镜组上的投影口径决定. 衍射镜片的最外环带宽度 d_s 与其 $F\#$ 的关系为

$$d_s=(2\lambda F\#)/N \tag{3}$$

式中，N 为规划台阶数目，考虑到加工尺寸的限制，及尽可能地放松公差，设置衍射物镜口径为 300 mm，F 数为 100，距离场镜为 30 m，目镜组口径为 52 mm，与场镜距离为 5.048 m. 图 2(a)为系统结构图，系统总长度为 36 m；图 2(b)、(c)分别给出了场镜与目镜组的结构示意图；图 2(d)为衍射望远镜系统点列图；整个望远系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function，MTF)曲线如图 2(e). 由设计参量可以看出，色差校正良好，系统在 60 对线时各视场对比度均大于 0.2，中心视场接近衍射极限. 图 2(f)和(g)分别为衍射物镜与目镜组的衍射面的位相分布，图中曲线Ⅰ表示沿坐标径向变化每毫米的周期个数，曲线Ⅱ表示二元面上的



?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(f) Phase distribution of diffractive lens (g) Phase distribution of second diffractive element

图 2 衍射望远镜系统仿真结果

Fig. 2 The simulation results of diffractive telescope system

相位随径向坐标 r 的变化，以周期数表示. 可计算出在两片衍射元件边缘处，线频率的最大值分别为 7.86 period/mm和 45.55 period/mm，对应最小周期线宽分别为 0.127 mm 和 0.022 mm. 每周期刻蚀四级台阶，则最小线宽加工尺寸分别为 31.75 μm 和 5.5 μm.

衍射物镜二元面参量 $A_1=-0.165\ 486$，$A_2=0$. 该衍射物镜为刻蚀在平板玻璃上的四台阶位相型菲涅尔波带片. 菲涅尔波带片环带总数为 2 372 个，其中最外环带宽 31.75 μm. 表 1 为衍射物镜的设计参量. 石英玻璃基板厚度均匀性优于 $\lambda/20$ RMS($\lambda=632.8$ nm).

表 1 衍射物镜的设计参量

Table 1 Parameters of the diffractive lens

Items	Main wavelength/nm	Effective aperture/mm	Focal length/m	Band number	Step number	Largest ring width/μm	Smallest ring width/μm
Value	632.8	300	30	2 372	4	1 276.15	31.75

菲涅尔波带片相邻周期的位相差为 2π，多台阶菲涅尔波带片的台阶刻蚀深度 d 可以表示为

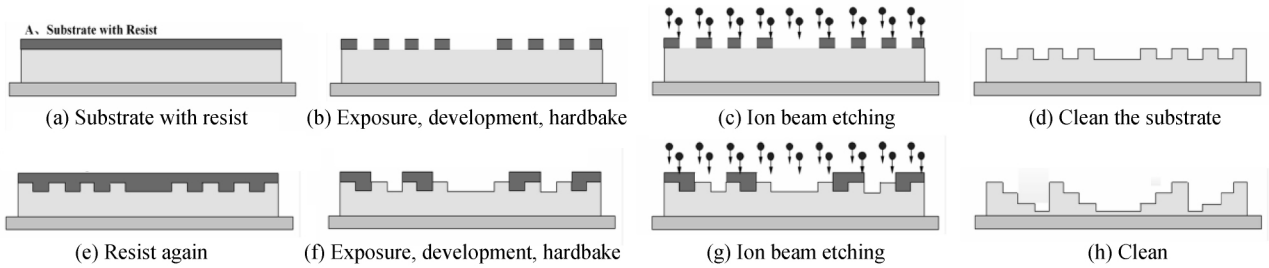
$$d=\frac{\lambda_0}{n(\lambda_0)-1} \tag{4}$$

式中，$n(\lambda_0)$为基底材料在设计波长处的折射率. 对于 N 阶菲涅尔波带片，每级台阶深度 d_0 可表示为

$$d_0=\frac{\lambda_0}{N[n(\lambda_0)-1]} \tag{5}$$

3 多台阶衍射物镜的加工

衍射物镜的加工主要包括涂胶、曝光、刻蚀、二次涂胶、曝光、刻蚀等工艺过程[17-22]. 其制作流程如图 3，具体包括：(a)在石英基板表面涂覆厚度为 1 μm 的光刻胶，得到待加工元件；(b)经激光直写曝光后，显影、烘焙，将图案加工在光刻胶上；(c)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，刻蚀至设计深度后，清洗残余光刻胶；(d)清洗基板、烘干，准备进行二次加工；(e)对基板进行第二次涂胶，厚度为 1 μm；(f)对基板进行激光直写套刻曝光、显影、烘焙；(g)对套刻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；(h)清洗基板，得到四台阶位相型衍射物镜.



(a) Substrate with resist (b) Exposure, development, hardbake (c) Ion beam etching (d) Clean the substrate

(e) Resist again (f) Exposure, development, hardbake (g) Ion beam etching (h) Clean

图 3 衍射物镜加工工艺流程

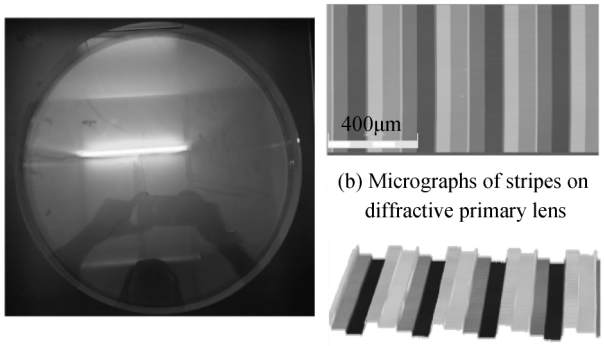
Fig. 3 Process flow of diffractive lens

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为实现高效率、高准确度图案加工，采用德国 Heidelberg 公司生产的 DWL4000 激光直写系统. 该系统利用 405 nm 半导体激光器，直接在光刻胶上进行精确曝光，以直角坐标扫描方式，可实现最大幅面达 400 mm×400 mm的无掩模曝光和套刻加工. 石英玻璃基板的刻蚀加工采用了德国 NTG 公司生产的 IBF1500 离子束加工设备，该设备利用高斯型 Ar 离子源同时轰击光刻胶和石英玻璃基底，通过产生的物理溅射效应，将光刻胶上的台阶结构转移到基底上. 该设备采取光栅轨迹扫描方法，最大可实现1 500 mm×1 500 mm范围内干法刻蚀加工. 而传统的 RIE 与 ICP 刻蚀设备由于不具备扫描刻蚀功能，仅可实现口径为 200 mm 以内的刻蚀加工.

实际加工后的衍射物镜实物如图 4(a)，采用日本奥林巴斯生产的 LEXT OLS 4100 激光共聚焦显微镜对衍射物镜进行轮廓测试. 图 4(b)为激光共聚焦显微镜下观察的衍射物镜部分区域的条纹分布，图 4(c)为对应区域的三维形貌. 从图中可以看出，通过图 3 所示工艺流程加工的衍射物镜，条纹边缘锐利，台阶表面平整.

图 5 为边缘区域一个周期内的条纹轮廓测试数据. 该周期设计条纹宽度为 48.82 μm，实测条纹宽度分别为 48.67 μm、47.544 μm、46.412 μm 和 48.52 μm，与设计值最大偏差小于 5%. 单级台阶设计深度 343 nm，实测两次刻蚀深度分别为 317 nm 和 582 nm，刻蚀深度误差分别为 7.58%和 15.16%. 图中所示的尖角部分是由于套刻偏差引起，实测套刻偏差小于 3 μm. 另外，实测台阶侧壁角大于 70°. 结果表明，条纹宽度偏差、套刻偏差和侧壁角误差均在允许范围之内，但刻蚀深度存在较大误差，这主要是由于离子束刻蚀过程中刻蚀产物堆积在槽底，刻蚀速率发生非线性变化而引起的. 该现象可通过增加进气装置，实时去除刻蚀产物，减小刻蚀深度误差，来获得较为理想的刻蚀深度.



(a)The diffractive primary lens

(b) Micrographs of stripes on diffractive primary lens

(c) 3D scanning result

图 4　四台阶衍射物镜实物

Fig. 4　Four－step diffractive primary lens

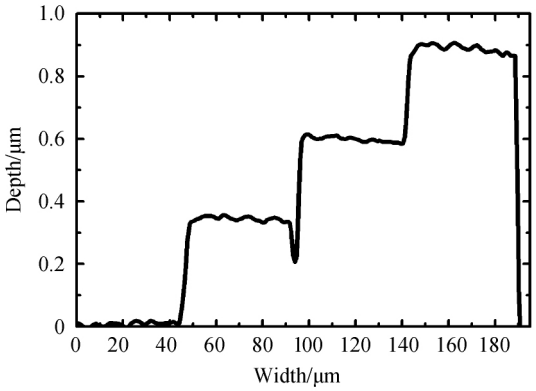


图 5　边缘区域一个周期内台阶轮廓结构测试结果

Fig. 5　The cycle scanning result at the edge of diffractive membrane

4　系统性能测试与分析

4.1　衍射效率测试

衍射效率的定义是主衍射级次能量与总入射光总能量的比值，是衡量衍射元件性能的重要指标. 衍射元件的衍射效率与台阶数目存在特定关系，当使用＋1 级衍射级次，衍射效率与台阶数的关系可表示为[6]

$$\eta=\sin c^2\left(\frac{\pi}{L}\right) \tag{6}$$

式中，L 为台阶数，$\sin c(x)=\frac{\sin(x)}{x}$.

衍射效率的测量原理如图 6，激光束通过小孔与自准直仪入射在衍射物镜上，通过一个可变小孔滤除其他衍射级次的能量与杂散光，首先测量主衍射级次能量 E_1；然后移去衍射物镜，放置一块与衍射物镜同等厚度与材质的平板玻璃，测量入射光强总能量 E_0，则衍射物镜的衍射效率可表示为

$$\eta=E_1/E_0 \tag{7}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

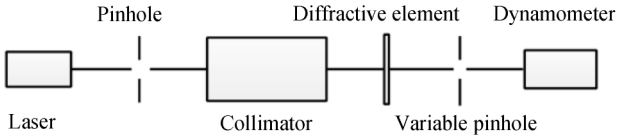


图 6　衍射效率测量原理

Fig. 6　Schematic diagram of the measurement of diffractive efficiency

经计算可知，四台阶衍射物镜的衍射效率理论值为 81.0%. 使用波长为 632.8 nm 的 He－Ne 激光器及 Thorlabs PM201 光功率计，测定衍射物镜＋1 级的衍射效率. 为保证测量结果的准确性，在不同时间对衍射物镜不同区域进行多次测量，测量结果的数据见表 2. 对多次测量结果取平均值可得衍射物镜的衍射效率为

表 2　衍射物镜的衍射效率测试数据(λ＝632.8 nm)

Table 2　The tested diffractive efficiency of the diffractive lens(λ＝632.8 nm)

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_1/μW	1.425	1.419	1.422	1.430	1.432	1.414	1.426	1.428	1.425	1.421
E_0/μW	2.146	2.150	2.139	2.142	2.140	2.142	2.143	2.138	2.145	2.143
η/%	66.4	66.0	66.4	66.7	66.9	66.0	66.5	66.7	66.4	66.3

$$\bar{\eta}=\frac{\sum_{n=1}^{10}\eta_n}{10}=66.43\% \tag{8}$$

达到衍射效率理论值的 82%.

使用波长为 655 nm 的激光器，测量衍射物镜的＋1 级衍射效率. 对于非设计波长处衍射物镜的衍射效率，计算公式为

$$\eta_{+1}(\lambda)=\sin c^2\left(1-\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)\eta_{+1}(\lambda_0) \tag{9}$$

设计波长处四台阶衍射物镜理论衍射效率为 $\eta_{+1}(\lambda_0)=81\%$，系统设计波段范围内的衍射效率与波长的关系可由图 7 表示，经计算可得在波长 655 nm 处衍射效率为 80.7%.

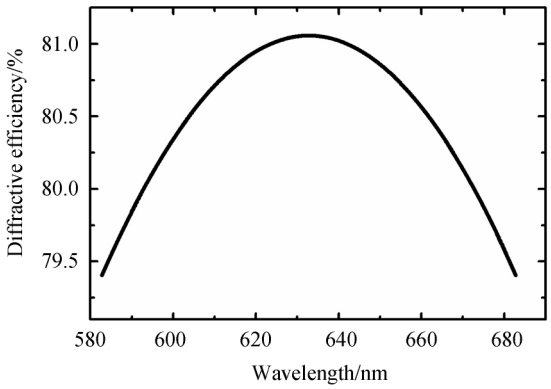


图 7　衍射效率与波长的关系

Fig. 7　The relationship between wavelength and diffractive efficiency

测试数据见表 3，测得衍射效率平均值为

$$\bar{\eta}=\frac{\sum_{n=1}^{10}\eta_n}{10}=65.3\% \tag{10}$$

表 3　衍射物镜衍射效率测试数据(λ＝655 nm)

Table 3　The tested diffractive efficiency of the diffractive lens(λ＝655 nm)

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_1/μW	1.684	1.73	1.716	1.780	1.593	1.674	1.729	1.615	1.774	1.726
E_0/μW	2.59	2.64	2.628	2.705	2.432	2.564	2.652	2.489	2.713	2.651
η/%	65.0	65.5	65.3	65.8	65.5	65.3	65.2	64.9	65.4	65.1

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

衍射效率与理论值之间存在偏差，主要原因是衍射物镜加工过程中存在制作误差：曝光过程中引入的线宽误差及二次加工过程的对准误差都会影响衍射效率，而 Ar 离子束刻蚀过程中引入的刻蚀深度偏差会引起相位延迟，并改变光波远场分布，进而导致衍射效率下降.

4.2 成像性能测试

使用星点检验法和分辨率板法评价衍射望远镜系统的成像性能. 测试光路如图 8. 由于系统光路较长，需要注意出射平行光的平行度与整个光路上各元件的共心调节. 将激光器放置在平行光管焦面位置，通过调节激光器与平行光管的俯仰量，保证出射光束在整个光路中保持相同的相对高度. 各元件之间的相对距离由激光测距仪测定. 在确定各元件的空间位置后，通过调节各组件的俯仰和扭摆实现系统中各成像元件的共心共路，保证平行光管出射的平行光正入射到每一个元件.

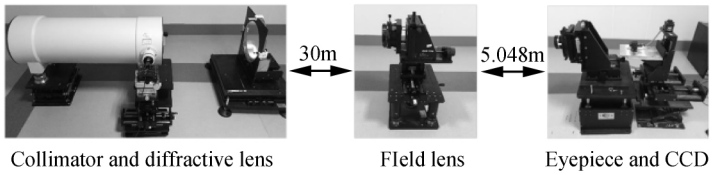


图 8 衍射望远镜成像系统成像质量测试光路

Fig. 8 Light path of diffractive telescope system for imaging test

4.2.1 星点检测

星点检测法是通过考察光学系统对一个点物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[23]. 照明光源选用 He－Ne 激光器，波长 $\lambda=640$ nm. 所用平行光管口径 $D=150$ mm，焦距 $F_c=1\ 000$ mm. 选用直径为 10 μm 的针孔作为星点检测所用的微孔. CCD 像元尺寸为 4.4 μm. 经计算可知艾里斑直径理论值为 47.431 2 μm.

图 9 为衍射望远系统对 10 μm 星点孔所成的艾里斑图像. 通过检测结果可以看出，衍射成像系统艾里斑图像圆度好，中央亮斑清晰，第一亮环完整. 对艾里斑直径进行定标测量，测量值为 44 μm，与理论值 47.431 2 μm 接近，误差仅为 7.23%. 测量结果与理论值存在偏差，主要是由于星点孔的装调误差，平行光管自身像差，衍射望远镜系统的装调误差，以及测试过程中的气流、振动影响像面上的艾里斑像分布. 综上可知，该系统具有很好的聚焦性能.

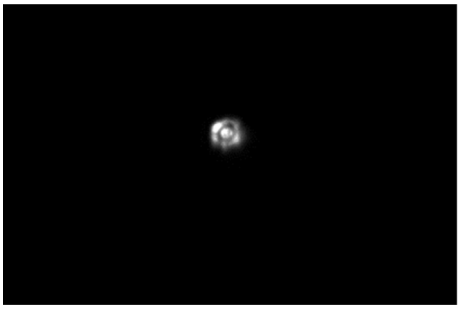


图 9 衍射望远镜系统对 10 μm 星点孔所成的艾里斑图像

Fig. 9 Airy pattern image of star hole in diameter of 10 μm by diffractive telescope system

4.2.2 分辨率板检测

进一步测试衍射望远镜系统的成像性能，搭建分辨率板检测实验，以白光光源通过窄带滤光片作为照明光源，将国产 5# 分辨率板放置在平行光管后焦面上，分辨率板上的图样通过平行光管与衍射望远镜后成像在 CCD 上.

测试衍射望远镜系统对不同空间频率分辨率图样的成像能力，抽样结果如图 10. 可以看出在 100 lp/mm（图 10(a)）处采集的图像在横向与纵向上均能清晰成像；当信号频率增加至 170 lp/mm（图 10(c)）时，横向图像出现模糊，纵向图像成像依旧清晰，其原因是由于衍射物镜加工误差以及系统装调引入的慧差导致的；在 180 lp/mm（图 10(d)）处横向条纹已难以分辨.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

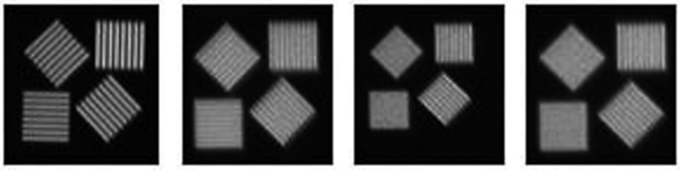


图 10 分辨率板测量结果

Fig. 10 Testing results of the resolution board

测量结果显示衍射望远镜系统能够分辨到国产 5#分辨率板的第 22 单元，第 23～25 单元横向条纹无法分辨. 查表可知第 22 单元对应的线宽为 2.97 μm，相应的空间频率为 168 lp/mm. 该检测光路对图像具有放大作用，光学系统的实测分辨率应是查表所得分辨率与系统放大倍率的比值. 根据望远镜系统放大倍率的计算理论

$$\Gamma = -f_1'/f_2' = -2/1 \tag{11}$$

可以计算得到测量系统放大倍率为 2 倍，因此系统实测最高分辨率应为 84 lp/mm，由图 11 可知，略低于设计理论值 118 lp/mm. 这主要是由于加工误差、光路调整误差、气流振动干扰等因素造成的. 实验结果与理论值基本相符，设计和制作的衍射望远系统具有较为理想的成像性能.

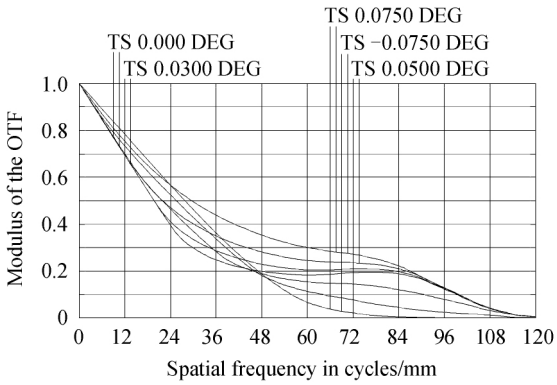


图 11 系统 MTF(截止频率 118 lp/mm)

Fig. 11 The MTF of testing diffractive telescope(cut－off frequency is 118 lp/mm)

5 结论

本文设计并制作了高衍射效率衍射望远镜系统，与反射式望远镜系统相比，衍射式望远镜系统具有衍射物镜体积小、质量轻，系统公差宽松的特点. 通过激光直写套刻与 Ar 离子束物理刻蚀技术，制作了 300 mm 口径的四台阶衍射系统物镜. 测试其衍射效率为 66.4%，达到理论值的 82%. 星点检测结果表明，艾里斑的直径为 44 μm，接近理论值 47.4312 μm，误差仅为 7.23 %. 分辨率板实验表明，衍射望远镜系统的极限分辨率为 84 lp/mm，接近理论分辨率 118 lp/mm. 该衍射望远镜具有良好的成像性能，可为未来发展大口径衍射望远系统提供原理验证和技术储备.

参考文献

[1] 石顺祥，王学恩，刘劲松. 物理光学与应用光[M]. 西安：西安电子科学技术大学出版社，2008.

[2] YAHG Shuai, SHA Wei, CHEN Chang－zheng, *et al*. Detection support structure of large－aperture off－axis rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(10): 2835－2842.
杨帅，沙巍，陈长征，等. 大口径离轴长条形反射镜的检测支撑机构[J]. 光学精密工程，2015，**23**(10)：2835－2842.

[3] GARDNER J P, MATHER J C, CLAMPIN M, *et al*. The james webb space telescope [J]. *Space Science Reviews*, 2009, **123**(4): 485－606.

[4] LIU Yu－feng, LI Lin. Application of binary optical lens in resource satellite[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5): 590－593.
刘玉凤，李林. 二元光学透镜在资源卫星中的应用[J]. 光学技术，2004，**30**(5)：590－593.

[5] ZHANG Jian, LI Meng－juan, YIN Gang－hua, *et al*. Large－diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(6): 1289－1296.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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.

[6] 金国藩，严瑛白，邬敏贤. 二元光学[M]. 北京：国防工业出版社，1998.

[7] LIU Min－zhe，LIU Hua，XU Wen－bin，*et al*. Membrane photo sieve for space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*，2014，**22**(8)：2127－2134.

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.

[8] LIU Hua，LU Zhen－wu，YAN Yong. Large aperture diffractive telescope tolerance analysis and measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*，2013，**42**(10)：1203－1207.

刘华，卢振武，闫勇. 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)：1203－1207.

[9] RODERICK A H. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*，1999，**38**(19)：4198－4212.

[10] HYDE R A，DIXIT S N，WEISBERG A H，*et al*. Eyeglass：a very large aperture diffractive space telescope[C]. Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics，2002：28－39.

[11] JERAD A B，SHAMUSUNDAR N D，MICHAEL D，*et al*. 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)：2312－2316.

[12] HAWARDEN T G，JOHNSTONE C，JOHNSTONE G. GISMO，an ELT in space：a giant (30－m) far－infrared and sub－millimetre space observatory[C]. SPIE，2003，**5382**：95－104.

[13] ZHANG Nan，LU Zhen－wu，LI Feng－you. Optical design of diffractive telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2007，**36**(1)：106－108.

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.

[14] CUI Qing－feng. Design of hybrid diffractive－refractive imaging optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2006，**35**(1)：12－15.

崔庆丰. 折衍射混合成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程，2006，**35**(1)：12－15.

[15] HUFNAGEL R E. Achromatic holographic optical system：US，US 4550973 A[P]. 1985.

[16] FAKLIS D，MORRIS G M. Broadband imaging with holographic lenses[J]. *Optical Engineering*，1989，**28**(6)：592－598.

[17] LI Feng－you，LU Zhen－wu，XIE Yong－jun，*et al*. Photolithographic fabrication techniques by using defocusing laser direct writing[J]. *Chinese Journal of Lasers*，2002，**29**(9)：850－854.

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.

[18] LI Feng－you，XIE Yong－jun，SUN Qiang，*et al*. Analyzing of line profile for laser direct writing lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*，2004，**33**(12)：136－139.

李凤有，谢永军，孙强，等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析[J]. 光子学报，2004，**33**(12)：136－139.

[19] KUTTNER P. Image quality of optical systems for truncated Gaussian laser beams [J]. *Optical Engineering*，1986，**25**(1)：180－183.

[20] LI Feng－you，LU Zhen－wu，XIE Yong－jun，*et al*. Photolithographic fabrication techniques by using defocusing laser direct writing[J]. *Chinese Journal of Lasers*，2002，**29**(9)：850－854.

[21] NAKAHARA S. Fabrication of the multi－level phase type hologram for display using the laser direct write lithography system[C]. SPIE，2012，**8281**(8)：828116.

[22] ZHAO Long－bo，ZHANG Zhi－yu，ZHU De－yan，*et al*. Fabrication of high precision computer generated hologram for aspheric surface testing by laser－direct writing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*，2014，**51**(11)：110902.

赵龙波，张志宇，朱德燕，等. 用于非球面检验的激光直写高准确度计算全息图制作研究[J]. 激光与光电子学进展，2014，**51**(11)：110902.

[23] 张以谟. 应用光学[M]. 北京：电子工业出版社，2010.

Foundation item：The National Natural Science Foundation of China (No. 51305422)，and the National Basic Research Program of China (No. 2011CB013205)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net