



微结构薄膜望远镜研究进展分析

杨 伟*, 吴时彬, 汪利华, 范 斌, 罗先刚, 杨 虎

中国科学院光电技术研究所, 成都 610209

摘要: 微结构薄膜望远镜通过表面微纳结构调制光波相位和传播方向, 具有轻量化、公差容限大、易于折叠展开的特点, 因此成为大口径轻量化空间光学成像技术中的颠覆性技术。本文通过对国内外微纳薄膜望远镜研究进展的调研和分析, 概括了薄膜望远镜研制的关键技术和主要技术途径, 重点分析了薄膜材料制备、微结构类型研究、系统光学设计理论等内容。微纳薄膜望远镜研制涉及材料、空间环境工程、微纳加工工艺、精密机械和二元光学等众多交叉学科, 随着工程化程度要求的提高, 会出现新的技术问题, 而随着问题的解决很可能获得具有影响力的科技成果。

关键词: 微结构; 光学薄膜材料; 高分辨成像; 薄膜望远镜

中图分类号: TH743

文献标志码: A

Research advances and key technologies of macrostructure membrane telescope

Wei Yang*, Shibin Wu, Lihua Wang, Bin Fan, Xiangang Luo and Hu Yang

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

Abstract: Microstructure membrane optics using surface microstructure on flat thin film to modulate wave can break through these limitations and become an advanced space optical imaging technology. Through the research and analysis of related technologies at home and abroad, this paper reviewed the advances of the membrane telescopes and focused on membrane material, microstructure type and optical system design. The implementation of membrane telescopes involves many interdisciplinary disciplines such as materials, space environment engineering, nanofabrication technology, precision machinery binary optics and so on.

Keywords: microstructure; polyimide film material; high resolution imaging; membrane telescope

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.001

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(5): 475–482

1 引 言

从各国部署光学遥感卫星的思路来看, 高轨道(地球同步轨道)设备主要形成对热点区域的普查, 低轨道设备进行局部详查。由于低轨道设备的运行周期短, 因此单次过境信息获取量小且再次重访间隔时间长。在这种发展趋势下, 利用高轨道(地球同步轨道)设备完成对地高分辨力观测, 可不受过境时间、重访间隔

等因素的影响。目前将实现高轨道对地高分辨力观测体系, 其困难主要集中在超大口径空间望远镜上。

传统的反射式光学系统随着口径增大, 加工难度急剧增加, 加工周期长; 反射主镜质量随口径平方线性增加, 导致系统体型庞大、笨重。Hubble 太空望远镜首次采用了蜂窝轻量化技术^[1], 其主镜面密度下降到约 240 kg/m²; 目前世界上最大的空间望远镜——詹姆斯·韦伯望远镜^[2], 系统主镜口径 6.5 m, 虽然采用了轻量化的金属铍作为主镜的镜坯材料, 面密度低于 30 kg/m², 但重量仍有 6.2×10³ kg, 按比例计算, 口径 10 m 的光学系统质量将超过 15×10³ kg, 大大超出现有

收稿日期: 2017-02-04; 收到修改稿日期: 2017-04-24

*E-mail: ywei@ioe.ac.cn

运载发射能力。

在轨自组装技术是解决大口径反射式望远镜的重量、尺寸与运载设备包络限制之间矛盾的一种有效途径。与折叠发射、在轨展开方案不同, 该技术将望远镜系统分割成多个独立单元进行装载发射, 甚至可以将同一望远镜分成多次发射入轨, 利用交会对接、拼接精确对准、镜面共相校正和面形能动校正等技术实现大口径望远镜的在轨组装。虽然能使空间望远镜的口径与规模摆脱运载设备包络的限制, 但并没有从根本上解决传统反射式望远镜的重量问题, 而且分批发射成本昂贵, 在轨自组装复杂程度高, 可控性较低。

微结构薄膜光学成像技术, 是通过现代微纳加工技术, 在薄膜基底材料上制作特定的微细图形对光波进行调制, 如图 1 所示^[3]。可以实现相同 F 数时达到与传统光学系统分辨率相当的光学高分辨成像。由于主镜可采用微米级薄膜材料作为基底, 重量极轻(面密度小于 1 kg/m^2), 从而易于折叠; 另外采用现代微细加工技术, 具有易于复制、周期短、成本低的优点, 能够突破传统光学系统存在的技术瓶颈:

- 1) 薄膜光学系统重量轻, 仅是反射式系统的 $1/6 \sim 1/50$ 。
- 2) 薄膜光学系统发射时折叠、入轨后展开的工作模式, 可减小对运载器的容积要求。
- 3) 薄膜透镜的面型公差与传统反射镜相比, 相对较低。

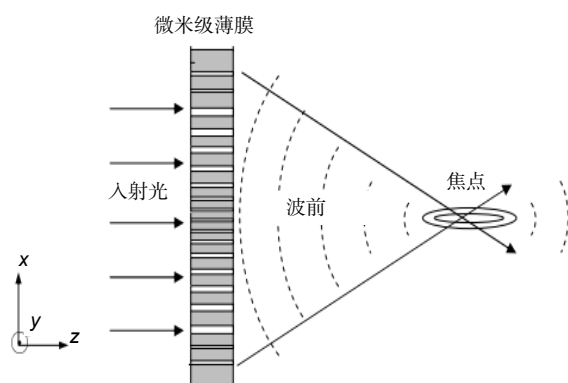


图 1 微结构薄膜透镜对光波进行调制示意图^[3]。

Fig. 1 Modulation of light wave by the microstructure on thin film^[3]。

美国国防部先进研究项目局(DARPA)为了解决静止轨道光学侦察卫星的技术难题(体积小、重量轻、宽覆盖、高分辨率), 支持了衍射光学实时成像仪(MOIRE)项目。该项目利用可折叠伸展的光学薄膜技术, 在轨道上展开作为卫星光学系统的物镜, 以满足静止轨道

高分辨率成像苛刻要求。卫星轨道高度 36000 km , 光学口径约 20 m , 分辨率约 2.5 m , 图像更新率 1 Hz , 对移动目标的瞄准探测能力要达到 0.1 Hz , 视场为 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$, 对弹道导弹(“飞毛腿”)的发射实现 99% 的探测概率, 同时虚警的概率要小于每月一次, 可对其它侦察方式无法提供情报的地区提供 7×24 小时的可见光探测图像。一次可覆盖 40% 的地表区域, 能够在任何时间传输世界上任何地点的实时高清影像。

2 国内外研究现状

2.1 国外研究计划及进展

第一阶段: 概念提出和验证阶段。

1997 年, Chensnokov 和 Vasileisky 在法国图卢兹国际空间光学会议上提出了采用菲涅尔波带片作为轻量化高分辨率空间望远镜的思路^[4]。1998 年, 在美国国防高级研究计划局项目的支持下, 劳伦斯-利弗莫尔国家实验室开展了 Eyeglass “眼镜” 项目的研究, 并提出了双星成像方案。该方案由物镜卫星和目镜卫星两颗卫星一起构成一个合作的望远镜。物镜卫星计划由一个口径 20 m 的微结构光学元件构成, 负责聚集光线并将其聚焦于与其相距 1 km 远的目镜卫星所在位置。1999 年, 美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室的 Hyde 等人提出了衍射光学元件用于超大型($25 \text{ m} \sim 100 \text{ m}$)望远镜的方案, 研究了衍射望远镜消色差模型(Schupmann 消色差模型)和宽波段成像方案^[4]。随后在 2003 年, 劳伦斯-利弗莫尔实验室研制了 5 m 拼接型薄膜衍射主镜, 该主镜采用康宁公司 1737 型玻璃薄板, 厚度为 $700 \mu\text{m}$, 主镜焦距为 250 m , 相对孔径为 $f/50$, 由 72 块子镜通过可折叠金属框和透镜板粘合拼接而成, 如图 2 所示^[5]。

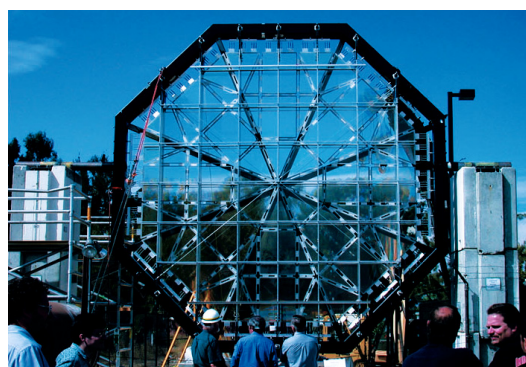
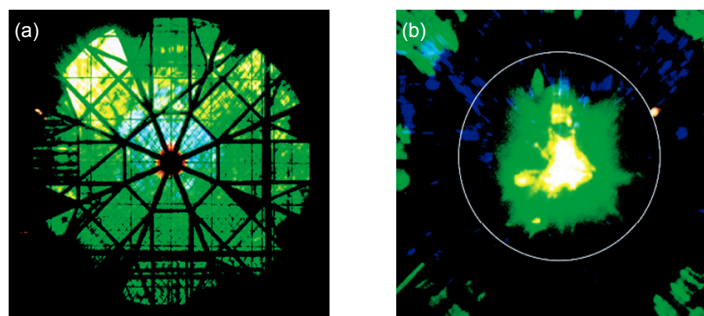


图 2 5 m 拼接衍射主镜^[5]。

Fig. 2 5 m foldable Fresnel diffractive lens^[5]。

图3 采用 532 nm 激光光源检测 5 m 衍射主镜像质^[5].Fig. 3 Test of signal point with 532 nm laser source^[5].

5 m 主镜研制完成后,采用 532 nm 激光作为光源对其进行了检测,如图 3 所示。从衍射主镜星点像看,5 m 衍射主镜像质并未达到理论效果,但作为第一代拼接衍射薄膜主镜已是巨大进步^[6]。由于主镜结构采用菲涅尔波带片,衍射效率低;从成像质量看,众多薄膜子镜拼接成像技术还存在较大误差,导致主镜像质未达到理论效果;另外,主镜采用超薄石英材料,易碎,并不能应用到实际空间。

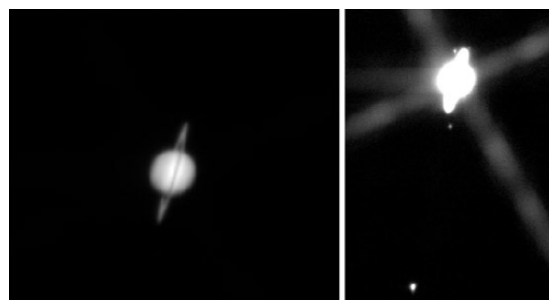
第二阶段:工程化水平不断提高,关键技术问题逐步清晰。

2010 年,美国鲍尔宇航公司、劳伦斯-利弗莫尔国家实验室和 Nexolve 材料公司在美国 DARPA 的支持下联合开展了“莫尔纹”衍射薄膜成像项目。“莫尔纹”项目放弃了双星方案,转而采用将整个光学系统放置在一个卫星上的技术路线,极大地降低了工程研制的技术难度。在该项目中,鲍尔宇航公司负责光学系统设计、地面原理样机的研制与测试;劳伦斯-利弗莫尔国家实验室负责衍射镜的研制;Nexolve 材料公司负责薄膜材料的研制。该项目旨在突破衍射薄膜、大型可展开支撑结构、星上处理和压缩等关键技术,为未来开发静止轨道高分辨率衍射成像卫星提供技术准备。

2012 年,鲍尔航空公司的 Atcheson 等人^[7]就项目第一阶段中的薄膜衍射透镜做了相关测试。使用透射波前评估薄膜材料的厚度均匀性,选择透射波前较好的薄膜进行微结构刻蚀。通过局部区域采样测量薄膜透镜不同区域的衍射效率,测试结果均超过了 30%(衍射效率的理论上限约为 38%)。使用干涉测量方法实现了对薄膜透镜的波前测量,波前 RMS 为 279 nm,而使用玻璃基底时的波前 RMS 是 34 nm,说明薄膜作为衍射透镜基底还有许多问题需要解决。2014 年,MOIRE 的地面演示实验顺利进行^[8-10],由于不能使所有独立的主镜单元处于共相位置,演示样机的主镜仅

仅是 5 m 主镜的一片子孔径单元。演示实验中使用美国国家图像解释度等级(NIIRS)和光学系统传递函数(MTF)来评价样机系统的成像性能。根据得到的分辨率靶图像计算得到的 MTF 与理想值相比,在子午和弧矢方向均有下降。对复杂场景所成图像分析得到的 NIIRS 只有 2.3,而理论值计算值为 2.8。虽然在评价参数上不能完全达到理论极限,但是演示样机成功验证了 5 m 口径衍射望远镜在(650±20) nm 波段对复杂场景高分辨成像的能力。

法国图卢兹大学科林小组也对菲涅尔透镜成像光学系统进行了研究,2010 年研制了口径 200 mm×200 mm 的菲涅尔成像透镜。该系统带宽为 650 nm ~ 663 nm,如图 4、图 5 所示,验证了菲涅尔透镜成像光学

图4 200 mm 菲涅尔成像系统^[11].Fig. 4 Fresnel imager with 200 mm aperture^[11].图5 科林小组观测到的土星环^[11].Fig. 5 Image of the Saturn's ring with the Fresnel imager^[11].

系统高分辨成像能力^[11]。科林小组计划在 2025 年左右在 ESA 任务中发射 4 m 菲涅尔成像系统到太空。

MOIRE 研究计划进展表明:通过增加位相型菲涅耳透镜台阶数,在提高衍射效率方面具有较大潜力;演示样机成功验证了衍射望远镜在宽波段和复杂场景下的高分辨成像能力。MOIRE 研究计划进展揭示的问题有:薄膜材料作为主镜基底,厚度均匀化和微结构图形高精度加工等方面难度大,目前还难以达到理想的工艺水平;薄膜主镜拼接共相还没有建立高精度检测和多自由度高精度装调方法。

衍射主镜结构另一种研究热点是光子筛^[12,13],它是近 10 年发展起来的新型衍射光学成像器件,首先由德国 Kiel 大学为提高软 X 射线的聚焦能力而提出。光子筛的基本原理基于菲涅尔波带片,由充满微小孔的环带组成,每一个微孔的衍射光在光子筛后的相应位置同相相加,就像许多同相的小口径阵列。用微孔环带阵列替代菲涅尔波带片中的透明环带,提高了光子筛聚焦光束的尖锐性,使得光学成像质量得到提高。光子筛可以在菲涅尔波带片的基础上进一步提高分辨率,但衍射效率远低于菲涅尔波带片,因此要牺牲一定的光通量,所以光子筛适用于对光通量要求不高的太阳或月亮等亮目标的探测。

美国航空航天局与美国空军学院合作,对光子筛进行了成像验证。2011 年 8 月,美国航空航天局报道了首次用光子筛对太阳进行成像,并获得了理想的结果。该光子筛口径为 200 mm,制作在镀铬玻璃基板上,焦距为 400 mm,工作波长为 656.3 nm。美国航空航天局称“这次试验对以甚高分辨率(0.01")成像为目标的衍射光学来说是十分重要的一步。”

美国空军学院 2015 年研制的猎鹰卫星-7 (FalconSat-7)^[14],实际上是一颗 3U 立方体卫星 (CubeSat),其尺寸约为 30 cm×10 cm×10 cm,质量不超过 4 kg。该星搭载口径 0.2 m、焦距 0.4 m 的光子筛望远镜,工作波长为 656.28 nm,孔尺寸为 2 μm~277 μm,光子筛薄膜为 CP1,厚度 25 μm。该卫星计划发射到 450 km 的低地球轨道,对地观测分辨率为 1.8 m。

第三阶段:空间验证样机研制的同时,为进一步提升衍射效率、系统带宽开展的微结构薄膜望远镜优化设计。

2011 年,哈佛大学 Capasso 团队利用 V 形天线结构构建了一种新型的超构表面,超构表面在保留了传统超构材料独特电磁特性的基础上,兼具厚度薄、易

加工等优势,在轻量化平面成像、电磁吸收和虚拟赋形、大视场全息等诸多领域具有广泛的应用潜力,被认为是继第一代折反射光学元件和第二代衍射元件之后的第三代新型光学器件^[15-17]。

2016 年,《Science》将纳米阵列超级镜头作为封面。作为一种亚波长衍射透镜,其微结构尺寸比传统衍射透镜微结构尺寸小。通过不同自由度设计亚波长微结构尺寸可以获得传统衍射透镜不能实现的功能,如增大视场、消色差和其余像差。图 6 为哈佛大学采用不同组合的纳米天线阵列实现消球差、彗差和像散的亚波长微结构衍射透镜^[18]。亚波长微结构透镜虽然微纳结构尺寸小难以加工,但由于具有消色差和其余像差功能,很大程度上降低系统复杂性。随着加工工艺的进步,它将是未来薄膜主镜结构研究的热点和发展方向。

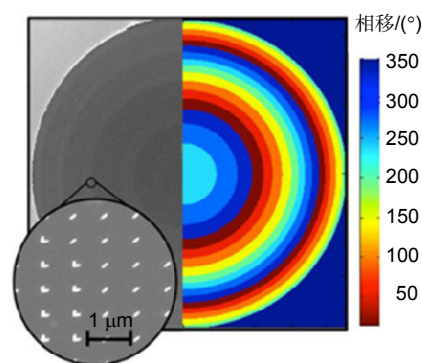


图 6 哈佛大学消色差纳米天线透镜^[18]。

Fig. 6 Aberration-free flat lenses comprised of ultrathin subwavelength-spaced optical antennas^[18].

2.2 国内研究现状

中国科学院光电技术研究所是我国最先开始研究微纳结构薄膜光学成像技术的研究机构,在薄膜成像理论模型^[19,20]、微结构薄膜镜加工工艺、空间薄膜材料研究与制备和系统样机研制等方面系统开展了单元技术和原理实验研究,取得了突破性研究进展和重要研究成果。

1) 2008 年完成了 Φ80 mm 微结构硅基红外成像实验,其结果接近理论衍射极限分辨,如图 7。

2) 在国家 863-809 专题支持下,2011 年研制了 Φ150 mm 石英基底薄膜主镜和聚酰亚胺薄膜薄膜主镜(如图 8)组成的宽波段(0.45 μm~0.65 μm)成像系统,利用鉴别率法进行像质检测,石英基底薄膜系统成像角分辨力为 1.16",聚酰亚胺薄膜系统成像分辨力为 1.20",均接近理论设计分辨力 1.09"。而且,两个系统

成像无明显色差。图 9 为 $\Phi 150$ mm 薄膜系统成像星点图和鉴别率图。

2012 年光电所研制的 $\Phi 80$ mm 薄膜样机($0.48 \mu\text{m} \sim 0.65 \mu\text{m}$)对外场验证了复杂场景观测成像, 如图 10 所示。

同年, 在进行薄膜拼接成像特性分析^[21]的同时, 研制的 $\Phi 200$ mm 薄膜拼接系统成像实验研究如图 11, 获得了多子镜衍射加强高分辨成像效果, 如图 12。由于多自由度拼接精度未达到理想值, 系统成像效果还未达到理想共相拼接的成像效果。



图 7 (a) 微结构薄膜主镜. (b) 原理样机. (c) 近衍射极限成像.

Fig. 7 (a) Microstructure lens. (b) Prototype. (c) Image performance near diffraction limits.

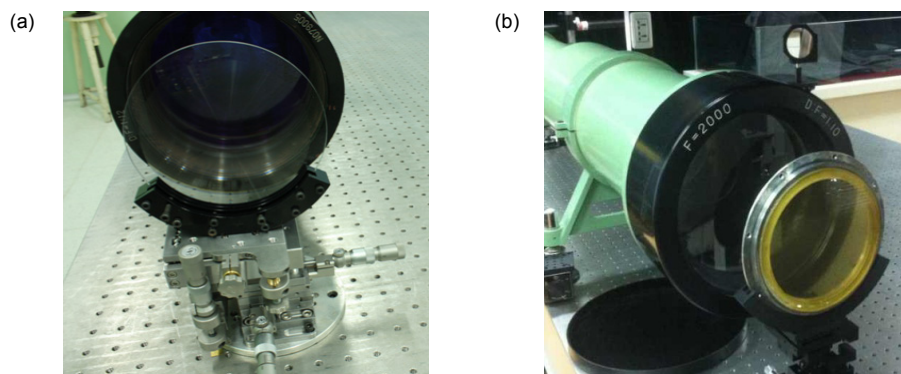


图 8 石英基底薄膜主镜(a)和聚酰亚胺薄膜主镜(b).

Fig. 8 Diffractive lens with silica substrate (a) and with membrane substrate (b).

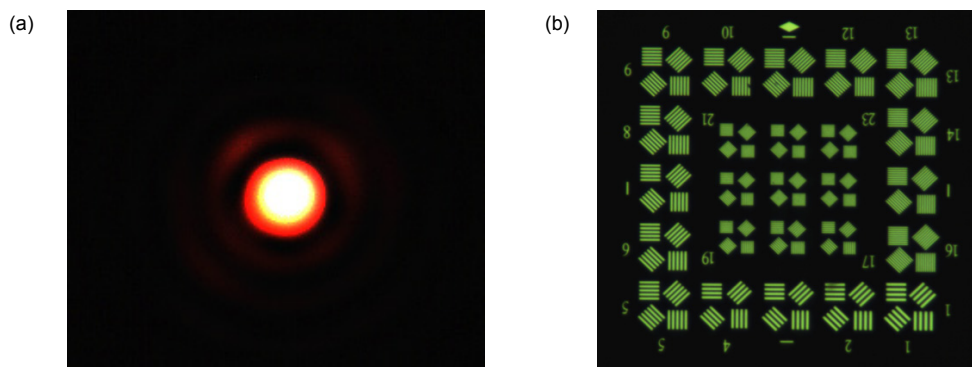


图 9 $\Phi 150$ mm 薄膜系统成像星点图(a)和鉴别率图(b).

Fig. 9 $\Phi 150$ mm membrane system single point imaging performance (a) and discrimination chart (b).



图 10 Φ80 mm 薄膜相机外场复杂场景观测成像。

Fig. 10 Φ80 mm membrane telescope external scene images.

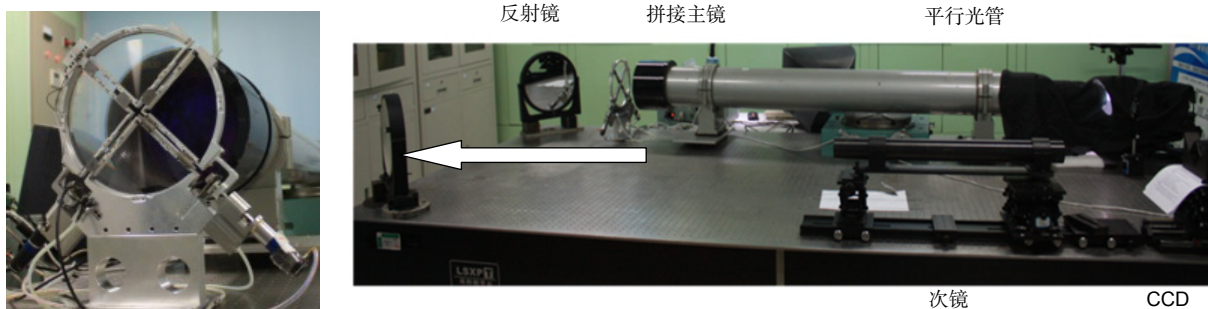


图 11 Φ200 mm 薄膜相机成像实验光路图。

Fig. 11 Φ200 mm membrane telescope system hardware.

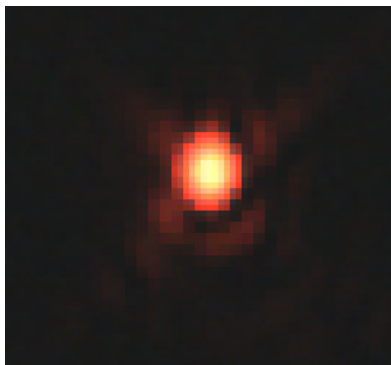


图 12 Φ200 mm 薄膜相机星点成像图。

Fig. 12 Φ200 mm membrane telescope single point imaging performance.

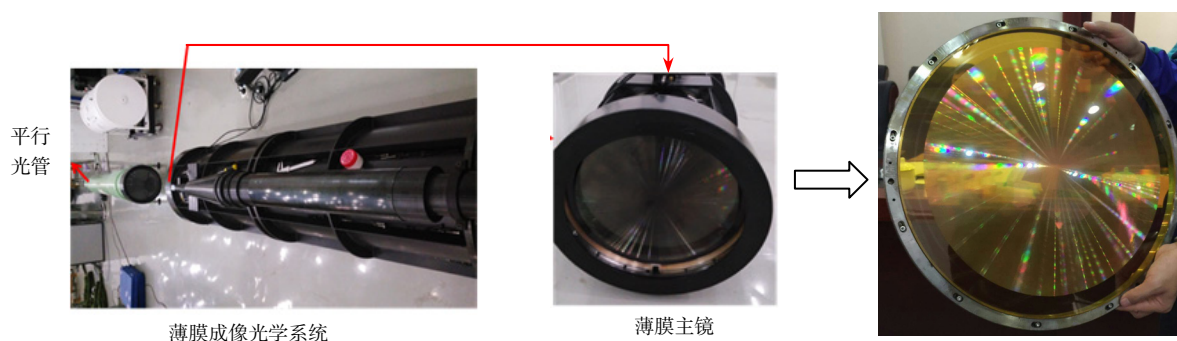
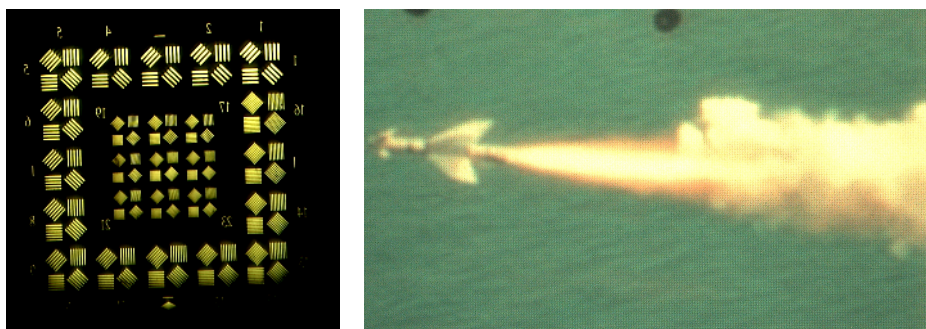
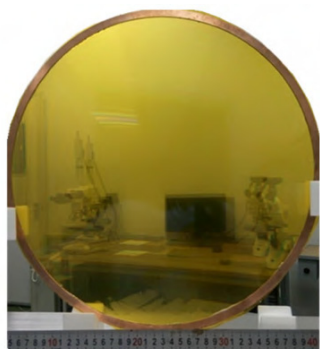
3) 2014 年完成了 Φ400 mm 薄膜望远镜研制, 如图 13 和图 14 所示。在国内首次实现了 Φ400 mm 微结构薄膜望远镜宽波段($0.49 \mu\text{m} \sim 0.68 \mu\text{m}$)成像系统的成功研制。

同时联合四川大学开展薄膜材料均匀化成型工艺研究, 取得了接近光学级均匀性的初步研究成果^[22]。

光电所研制的基于亚波长结构的功能膜层器件^[23], 也称超表面或二维超构材料, 可在平面化的亚波长结构内产生异常的相位突变, 为包括大口径平面成像提供了一种有效的手段。与传统的光学器件相比, 超构表面器件具有亚波长尺度, 相位、振幅、偏振任意调控, 为宽幅宽光谱超级透镜提供了另外一种可能。

长春光机所卢振武等人在 2016 年研制出口径 Φ70 mm 薄膜衍射透镜, 并开展了大口径薄膜主次镜两部分对准测量的研究。2017 年, 王若秋等人研制出口径 300 mm 的衍射成像系统, 并对成像性能进行了测试, 分辨率测试结果接近理论设计值^[24], 但他们的微结构制作在石英玻璃基底上。

2016 年北京空间机电研究所与中国科学技术大学国家同步辐射实验室联合研制了口径 Φ400 mm 薄膜衍射透镜^[25], 如图 15 所示。他们采用光刻刻蚀工艺加工石英基底, 再将图形转移至聚酰亚胺薄膜的方法制作衍射图形。由于工艺不够成熟, 在薄膜部分区域出现了薄膜翘曲而导致了薄膜复制图形失真, 主镜像质不佳, 但为国内大口径衍射薄膜元件研究提供了有益参考。

图 13 $\Phi 400$ mm 微结构薄膜望远镜系统分辨率靶和液晶显示远距离投影成像图。Fig. 13 $\Phi 400$ mm membrane telescope bar and complex scene target imagery.图 14 $\Phi 400$ mm 微结构薄膜望远镜系统分辨率靶和液晶显示远距离投影成像图。Fig. 14 $\Phi 400$ mm membrane telescope bar and complex scene target imagery.图 15 空间机电研究所研制的 $\Phi 400$ mm 薄膜透镜^[25]。Fig. 15 $\Phi 400$ mm membrane diffractive lens developed by replication technology^[25].

3 现状分析

美国从上世纪 90 年代起开展了薄膜成像理论和关键技术的研究,到 2010 年开始将理论和关键技术转变成工程实现,并计划在 2025 年左右将 $\Phi 10$ m、 $\Phi 20$ m 薄膜成像光学系统发射到同步轨道。法国也在 2005 年至今开展薄膜成像光学系统理论和地面样机研制工作,并计划于 2025 年完成 $\Phi 4$ m 薄膜成像光学系统的研制。

中科院光电技术研究所所在理论研究和地面工程样机研制及突破关键技术方面,为国内研制大口径薄膜成像光学系统奠定了坚实的技术基础。国内其他相关科研单位在薄膜成像理论研究和小口径薄膜透镜制备上也积累了一定的经验。现阶段中科院光电技术研究所所在科技部地球观测与导航专项—“静止轨道高分辨率轻型成像相机系统技术”支持下,薄膜成像光学系统现阶段正从原理样机研制到工程样机研制过渡。

目前,各国的研究机构正在积极筹备研制 $\Phi 10$ m 级甚至 $\Phi 20$ m 级的薄膜成像光学系统,主力微结构形式为光子筛或位相型菲涅尔。光子筛能降低加工难度抑制一定旁瓣的杂散光,但衍射效率低,可以用于空间亮目标探测,不适合对地观测;位相型菲涅尔透镜作为现阶段对地观测成像系统的主选微结构形式,采用多台阶或连续结构可以将衍射效率提高到 90% 以上,可满足空间对地观测的对比度要求。现阶段微结构主镜大口径加工工程化水平仍在突破光子筛或多台阶位相型菲涅尔,它色散大决定了系统光谱范围窄、视场相对较小。因此进一步拓宽系统成像光谱范围,需要继续研究亚波长微结构薄膜主镜,比如纳米阵列超级镜头。新的薄膜主镜结构需要更小的线宽和更复

杂的微纳结构,也给微纳加工提出了更高的要求和挑战,未来微纳结构加工能力将直接影响薄膜望远镜研制水平。

4 总结

目前微纳薄膜光学成像系统研究已从理论研究、原理样机验证过渡到工程实现的关键时期,国外特别是美国已投入了大量人力、物力和财力开展关键技术研究,使薄膜光学成像技术发展迅速。国内军用、民用科技计划对该领域的重视和支持大大缩短了和美国定义的未来颠覆性空间望远镜技术的差距,但受限于薄膜材料制备工艺、大口径微结构图形加工和高精度多自由度拼接对准技术的发展水平,空间大口径薄膜相机载荷成熟应用还需要一段时间,但其轻量化、可快速复制和低成本的特点决定了微结构薄膜望远镜将成为下一代超大口径成像系统主力,并随着技术成熟度的不断提高,应用范围越来越广。

基金项目

国家 863 高技术项目(2105AA8095050);国家重点研发计划地球观测与导航重点专项(2016YFB0500200)。

参考文献

- 1 Riess A G, Strolger L G, Casertano S, et al. New Hubble space telescope discoveries of type Ia supernovae at $z \geq 1$: narrowing constraints on the early behavior of dark energy[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, **659**(1): 98–121.
- 2 Knight J S, Feinberg L, Howard J, et al. Hartmann test for the James Webb Space telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9904**: 99040C.
- 3 Li Xiong, Ma Xiaoliang, Luo Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(3): 255–275.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- 4 Chesnokov Y M, Vasilevsky A S. Space-Based Very High Resolution Telescope based on amplitude zone plate[C]. Conf. of space optics, Toulouse Labège, France, 2–4 Dec, 1997.
- 5 Hyde R A. Eyeglass: a very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19): 4198–4212.
- 6 Hyde R A, Dixit S N, Weisberg A H, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4849**: 28–39.
- 7 Atcheson P D, Stewart C, Domber J, et al. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8442**: 844221.
- 8 Domber J L. MOIRE: technology development for large aperture membrane diffractive telescopes[M]. Ball Aerospace & Technologies Corp., 2014.
- 9 Atcheson P, Domer J, Whiteaker K, et al. MOIRE: ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9143**: 91431W.
- 10 Waller D, Campbell L, Domber J L, et al. MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing[C]// Proceedings of 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2015.
- 11 Koechlin L, Rivet J P, Deba P, et al. Generation 2 testbed of Fresnel imager: first results on the sky[J]. *Experimental Astronomy*, 2011, **30**(2): 165–182.
- 12 Andersen G. Large optical photon sieve[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(22): 2976–2978.
- 13 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.
- 14 Andersen G, McHarg M, Asmolova O, et al. FalconSAT-7: towards rapidly deployable space-based surveillance[C]// Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2013.
- 15 Luo Xiangang. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(9): 594201.
- 16 Yu Nanfang, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333–337.
- 17 Wang Dacheng, Zhang Lingchao, Gu Yinghong, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15020.
- 18 Khorasaninejad M, Wei Ting Chen, Robert C Devlin, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, **352**: 1190–1194.
- 19 Luo Xiangang. Sub-wavelength electromagnetics[M]. Beijing: Science Press, 2017.
罗先刚. 亚波长电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- 20 汪利华. 空间薄膜望远镜光学系统设计研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
- 21 Wang Lihua, Wu Shibin, Yang Wei, et al. Analysis of stitched Fresnel lens segmented mirrors miss-adjustment error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(7): 0712002.
汪利华, 吴时彬, 杨伟, 等. 拼接菲涅耳透镜子镜失调误差分析[J]. *光学学报*, 2016, **36**(7): 0712002.
- 22 王松. 应用于空间光学的聚合物薄膜性能研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
- 23 Zhao Zeyu, Pu Mingbo, Wang Yanqin, et al. The generalized laws of refraction and reflection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(2): 129–139.
赵泽宇, 蒲明博, 王彦钦, 等. 广义折反射定律[J]. *光电工程*, 2017, **44**(2): 129–139.
- 24 Wang Ruoqi, Zhang Zhiyu, Guo Chengli, et al. Design/ fabrication and performance test of a diffractive telescope system with high diffraction efficiency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 114–122.
王若秋, 张志宇, 国成立, 等. 高衍射效率衍射望远镜系统的设计/加工及成像性能测试[J]. *光子学报*, 2017, **46**(3): 114–122.
- 25 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.
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.