

文章编号 1004-924X(2003)04-0315-05

空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究

陈 波, 尼启良, 曹继红, 巩 岩, 曹健林

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:介绍国际上空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究进展情况。着重介绍了长春光机所设计的四波段同时成像空间极紫外太阳望远镜。该望远镜由四个不同波长的多层膜正入射望远镜组成,工作波长分别为 12.9 nm、17.1 nm、19.5 nm 和 30.4 nm,视场角为 $8.5^\circ \times 8.5^\circ$,设计角分辨率为 0.5'。为了验证设计方案可行性及关键技术水平,集成出一套 17.1 nm 极紫外望远镜演示样机。

关键词:空间;软 X 射线;极紫外;多层膜;望远镜

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A

Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope

CHEN Bo, NI Qi-liang, CAO Ji-hong, GONG Yan, CAO Jian-lin

(State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: While the progress in researches on space soft X-ray and EUV normal incidence telescopes world wide is reviewed, the space EUV normal incidence telescope designed and developed by Changchun institute of optics, fine mechanics and physics (CIOMP), is emphatically detailed. The telescope has four individual channels of multilayer coating normal incident optics with working wavelengths of 12.9 nm, 17.1 nm, 19.5 nm and 30.4 nm. The field of view and angular resolution are 0.2° and $0.5'$, respectively. The telescope is capable of simultaneously imaging the sun at the four wavelengths.

Key words: space; soft X-ray; EUV; multilayer coatings; telescope

1 引 言

随着空间技术和软 X 射线/极紫外波段光学技术的发展,在大气层外对太阳和非太阳软 X 射线/极紫外波段辐射源进行观测成为现实。由于太阳活动与演变过程会对地球产生巨大的影响,对日观测成为空间软 X 射线/极紫外波段观测研

究的重点。尤其是通过对日冕中高温活动区的精细结构及其长时标和短时标的演变进行高精度的观测,研究太阳风、磁通量浮现、磁重联以及它们在太阳周围空间产生的影响成为国际上研究的热点。空间软 X 射线/极紫外太阳望远镜(EUT)是进行这些观测的最重要的仪器,为此国际上已研制出众多的空间软 X 射线/极紫外波段望远镜,用于空间观测研究。

收稿日期:2003-01-16;修订日期:2003-06-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60223003);中国科学院创新基金资助项目

2 国际空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜的发展^[1-2]

早在 1952 年德国科学家 Wolter 提出了掠入射 X 射线成像系统的设计原理。这是一种由两个非球面回转体组成的同轴共焦系统,它克服了单个非球面回转体反射镜因不满足 Abbe 正弦条件而引起轴外成像存在严重彗差的缺陷,可以取得较高分辨率的 X 射线图像。但由于受当时工艺水平、制造技术及运载工具的限制,直到 70 年代,这种掠入射成像系统才在 X 射线天文观测和研究中得以广泛应用。例如美国、德国、日本、荷兰相继设计并研制出高空间分辨率的 X 射线望远镜,放置在卫星上进行空间观测研究。这些望远镜的集光面积由开始的十几 cm^2 到几十 cm^2 ,空间分辨率可达 2 ~ 10'。为提高聚光能力,实现对空间较暗目标的观测,美国于 80 年代初开始研制六层套叠的大型 X 射线轨道望远镜 (AXAF),口径达 120 cm,焦距 10 m,聚光面积 1 000 cm^2 ,空间分辨率 1'。

80 年代起,随软 X 射线多层膜技术的发展,新一代软 X 射线多层膜正入射成像望远镜的研究十分活跃。这方面具有代表性的工作有 1985 年 10 月 25 日美国首次采用多层膜软 X 线成像望远镜成功地进行了 Si 44A 处太阳日冕的观测。该望远镜由美国 Lockheed Palo Alto 实验室和 Lawrence Berkeley 实验室合作研制。主镜为球面,曲率半径 2 m,口径 4 cm,离轴使用。主镜用溅射方法镀有 W/C 软 X 线多层膜,共 30 层,其中钨膜厚度为 0.765 nm,碳膜厚度为 1.45 nm,反射率的峰值波长在 4.386 nm,采用 Kodak SD-212 软 X 线胶片作太阳图像的记录。

1987 年 10 月 23 日由美国 Marshall 空间飞行中心和 Lawrence Livermore 实验室研制的正入射 Cassegrain 型多层膜望远镜再次成功地进行了 17.1 ~ 17.5 nm 处太阳日冕观测。望远镜的主镜为球面,曲率半径 1.2 m,口径 6.4 cm;次镜亦为球面,曲率半径 0.5 m,口径 25 cm;组合焦距 2 m,分辨率 1.2' ;主、次镜表面粗糙度好于 0.3 nm,镀有 Mo/Si 多层膜,每层 Mo 的厚度为 3.68

nm,每层 Si 的厚度为 5.52 nm,17.1 ~ 17.5 nm 峰值的反射率为 35%;望远镜系统采用 Kodak TMA100 胶片记录图像。

1988 年 3 月 17 日发射的多层膜正入射望远镜,是由美国 Lockheed Palo Alto 实验室与 Colorado 大学大气与空间物理实验室合作研制的,利用光电探测器记录软 X 线日蚀前太阳图像。该望远镜系统主镜为球面,焦距 0.75 m,分辨率为 1.5',离轴使用;Mo/Si 多层膜 17.1 nm 处峰值反射率为 33%;探测器为 128 × 128 微通道板,分辨率为 16'。

俄罗斯、美国和一些欧洲国家曾联合研制极紫外成像望远镜列阵 (EUVITA),于 1993 年搭载俄罗斯 Spectrum X-G 卫星,对非太阳 X 射线源进行普查,并对固定 X 射线源进行长期监测。EUVITA 由八个极紫外多层膜正入射望远镜组成,中心波长位于 5.0 ~ 25.0 nm 之间,带宽为 1.0 nm,设计角分辨率为 10',视场为 1°;主镜为球面,直径 20 cm,焦距 1.4 m,离轴使用;探测器为微通道板 (MCP)。

美国 Los Alamos 和 Sandia 国家实验室正在研制的低能 X 射线成像传感器列阵 (ALEIS),工作波段 17.7 ~ 11.3 nm。由六个广角软 X 射线/极紫外多层膜正入射望远镜组成。每个望远镜聚光面积 25 cm^2 ,分辨率 30',采用微通道板作探测器。整个系统重 90 kg,功耗 45 W,数据率 10 kbp/s。

美国 Stanford 大学和 Livermore 国家实验室研制的多光谱望远镜列阵 (MSSTA) 由十七个软 X 线多层膜正入射成像望远镜组成。其中包含两个双曲面多层膜反射镜的 Ritchey-Chretien 型望远镜七个,口径 127 mm,焦距 3 500 mm,分辨率好于 0.5',中心波长分别为 154.6 nm、30.4 nm、15.0 nm、17.3 nm、19.3 nm、33.5 nm;包含双曲一抛物面多层膜反射镜的 Cassegrain 型望远镜两个,口径 60.33 mm,焦距 2 m,分辨率好于 0.5',中心波长分别为 17.3 nm 和 21.1 nm;包含单个抛物面多层膜反射镜的 Herschel 型望远镜八个,口径 40 mm,焦距 1.4 m,分辨率好于 0.75'。MSSTA 用于研究 $10^4 \sim 10^7$ K 温度范围的太阳大气结构和动力学。结构如图 1 所示。

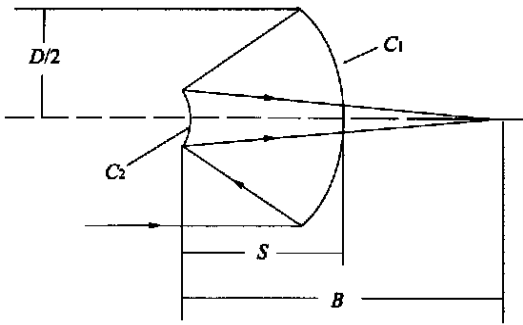


图 1 双反射镜系统望远镜
Fig.1 Double mirrors telescope

另外,美国自 1994 年起开始研制过渡区和日冕探测器 (TRACE) 极紫外波段探测器,采用卡塞格林型望远镜。其特点是将反射镜镀成四个部分,分别对不同的工作波长有较高的反射率,并配有可旋转的滤光片组,在望远镜焦面上获得不同的工作波长的太阳图像,TRACE 的工作波段和带宽如表 1。

表 1 TRACE 工作波段和带宽

Tab.1 Working wavelength and bandwidth

中心波长 (nm)	带宽 (nm)	离子谱	太阳大气区域	温度范围 Log(T)
250.0	Broad	Continuum	Photosphere	3.6 ~ 3.8
170.0	Broad	Continuum	Tmin & Chromosphere	3.6 ~ 4.0
157.0	3.0	Cl, FeII,	Tmin & Chromosphere	3.6 ~ 4.0
121.6	8.4	Continuum	Chromosphere	4.0 ~ 4.5
155.0	3.0	H I Ly	Transition Region	4.8 ~ 5.4
17.1	1.1	C	Corona	5.2 ~ 6.3
19.5	1.4	Fe	Corona	5.7 ~ 6.4
28.4	1.4	Fe, Fe XV	Corona	6.1 ~ 6.6

3 我国空间极紫外望远镜研究^[3]

鉴于太阳活动和辐射对地球的重要影响,以及我国在软 X 射线——极紫外波段光学研究的技术基础,我们在国家基金和中国科学院创新基金的支持下,开始进行我国的首台正入射极紫外

波段太阳望远镜研制工作。

研制的极紫外波段太阳望远镜由四个多层膜正入射望远镜组成,安装在同一个真空室内,可以对四个不同的工作波长同时成像,望远镜角分辨率为 0.5,比目前正在空间飞行的 TRACE 的角分辨率高一倍。具体设计指标如表 2。

表 2 望远镜技术指标

Tab.2 Parameters of the telescope

工作波长 (nm)	焦距 (mm)	视场角 (rad/ min)	分辨率 (rad/ s)	口径 (mm)
12.9, 17.1, 19.5, 30.4	3 500	8.5 × 8.5	0.5	120

首先设计了四波段成像的极紫外望远镜。因该望远镜工作在极紫外波段,且要求有很高的角分辨率,根据我所现有的超光滑表面加工水平和极紫外波段多层膜的制备能力,采用多层膜正入射型的望远镜结构。但所需波段多层膜正入射反射率最高为 60% (在 13 nm 处),最低只有 20% (在 30 nm 处)。因此,在设计上需尽可能地少用反射面,提高系统的反射率,充分利用太阳在极紫

外波段的辐射能量。具体设计采用准卡塞格林 (Cassegrain) 型望远镜结构,结构参数如图 1 所示。

具体参数可由高斯光学公式 $C_1 = (B - F)/2SF$ 和 $C_2 = (B + S - F)/2SB$ 计算^[4]。其中 C_1 为主镜曲率, C_2 为次镜曲率, B 为次镜焦点距离, S 为二次镜间距, F 为焦距。为了验证设计的可行性以及关键技术水平,设计了一个工作波长

17.1 nm 的平面——球面结构的望远镜,验证方案的可行性。具体参数如表 3 所示。

表 3 望远镜光学的结构参数

Tab. 3 Configure parameters

参数	数值
焦距 F	3 750 mm
孔径数 (NA)	31
视场 (FOV)	0.2°
次镜焦点距离 B	1 925.00 mm
主次镜间距 S	1 824.93 mm
主镜曲率半径	7 500.00 mm (凹球面)
次镜曲率半径	
像面曲率半径	

表 4 光学系统成像质量有关的参数

Tab. 4 Optical parameters

参数	计算值
角分辨率要求	0.50
像元角尺寸	0.25
衍射极限角分辨率(1.22 D)	0.04
像元几何尺寸 (mm)	4.55 μm
包含 90% 能量的弥散盘直径轴上点	0.86 μm
0.1 视场	1.22 μm
0.2 视场	2.54 μm

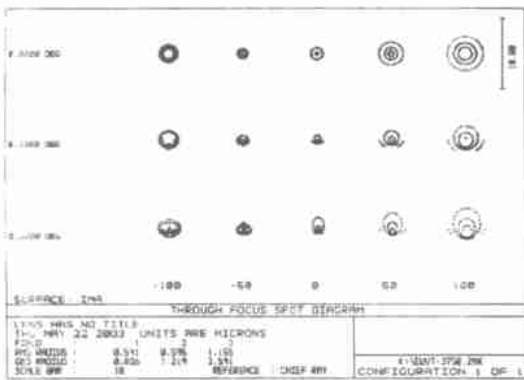


图 2 不同视场角、不同像面位置的点列图

Fig. 2 Through focus spot diagram

由于 EUT 工作在极紫外波段,光学系统的衍射极限分辨率远高于所要求的望远镜分辨率,所以可用像面上弥散斑直径和环绕能来评价成像质量。计算结果见表 4,计算结果显示出 EUT 光学系统的设计成像质量能满足要求。用 ZEMAX 光学设计软件追迹结果如图 2 和图 3,追迹结果显示在 17.1 nm 望远镜的全视场范围内,包含 90% 能量的弥散斑角尺寸均小于 4.55 μm ,达到分辨率要求。当然,除了几何像差的影响外,衍射和中频粗糙度对成像质量也有一定的影响^[5],这

里不做详细的讨论。

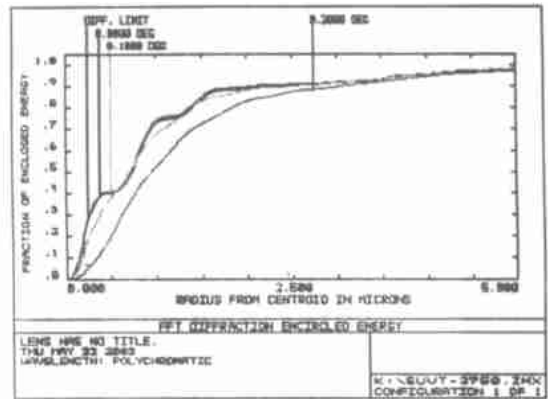


图 3 望远镜环带能随衍射光斑尺寸的变化

Fig. 3 Diffraction encircled energy

本 EUT 将安装在极轨卫星上,在设计上需考虑卫星发射和空间环境的特殊要求,要求具有体积小、重量轻、稳定性好的特点。从望远镜光学设计及对热控的考虑,在望远镜中采用双滤光片设计。第一块滤光片安装在望远镜光学系统前部,第二块安装在探测器前面。前者的作用一方面可以滤掉太阳红外、可见和紫外波段辐射,可以反射掉 95% 以上的太阳辐射,减少太阳辐射对望远镜内部温度分布的影响,保持望远镜内部温度分布的均匀性,达到实现高分辨率的要求。另外,可以减少部分无用的极紫外辐射进入望远镜,提高望远镜成像信噪比。但这种滤光片是采用质量吸收的原理滤掉长波部分的辐射,滤光片很薄,只有 100~200 nm 厚,即使是在滤光片研制中采用栅网和增加高强度膜层,也无法承受运输和发射过程中的空气流动对滤光片的破坏。因此,在结构设计中把四个望远镜安装在一个真空室中,升空进入观测轨道后打开舱盖开始观测,具体结构如 CAD 设计图 4。



图 4 EUT 结构图

Fig. 4 Telescope CAD picture

为了实现望远镜望远镜的设计目标,除了进行合理的光学设计和机械结构设计外,还需对所

涉及的关键技术进行攻关,研制高面形精度的超光滑表面,制备出正入射反射率高、反射率均匀性好的极紫外波段多层膜反射镜。已研制出的超光滑表面,面形精度达 4 nm(rms),表面粗糙度达 0.8 nm。已制备出的多层膜正入射反射率如图 5 所示。从图中看到 EUT 所用几个工作波长的反射率分别为 26% (13.0 nm)、25% (17.1 nm)、8% (30.4 nm)。其中 13.0 nm 和 17.1 nm 基本可以满足 EUT 的设计要求,19.5 nm 同样可以采用 Mo/Si 多层膜,工艺过程与前两者一致。但 30.4 nm 反射率很低,且在 15.0 nm 附近有高的反射率,所以 Mo/Si 膜不适合于 30.4 nm,应采用在 30.4 nm 反射率更高的 MgSi/Mo 材料对制备 30.4 nm 多层膜。

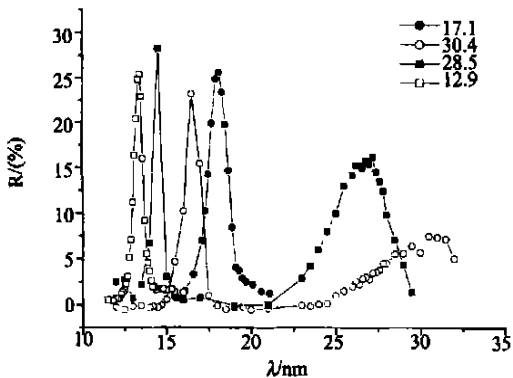


图 5 不同工作波长的多层膜反射率实测结果

Fig. 5 Reflectivity of the mirrors

多层膜反射率随位置变化的分布如图 6 所

示。对口径为 60 mm 反射镜的不同位置的均匀性进行测试,从边缘到中心,每隔 2 mm 测一个点,测量十次的结果如图 6 所示,测量结果的反射率均匀性为 $\pm 2.5\%$,上述结果基本达到 EUT 的设计要求。

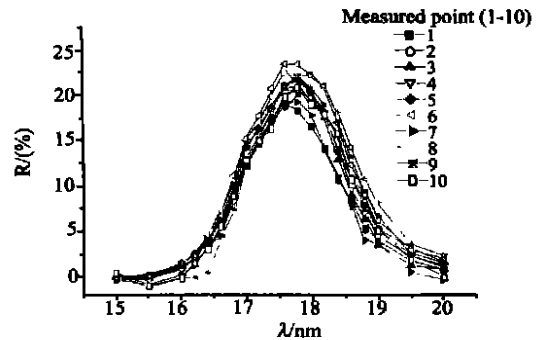


图 6 沿径向在不同位置处多层膜反射率实测结果

Fig. 6 The reflectivity of the mirrors at different positions through radius

4 结果与致谢

介绍了国际上空间 EUT 的研究水平以及发展的趋势,设计出了适合空间应用 EUT,对涉及到的关键技术进行攻关,实际检测有关技术指标,集成出一套工作波长 17.1 nm 的 EUT,验证了方案的可行性。

参加本文工作的研究人员,除作者外还有翁志成、张学军、金春水、杨宏波、吴清文研究员、王兵副研究员和马月英高级工程师。在此对他们的辛勤工作表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] ARTHUR B C, WAL KER J R, JOA KIN F, *et al.* High resolution imaging with multilayer soft X-ray, EUV and FUV telescopes of modest aperture and cost[J]. *SPIE*, 1991,1494:320.
- [2] HOOVER R B, BAKER P H, HADAWAY J B, *et al.* Performance of the multi-spectral solar telescope array[J]. *SPIE*, 1990,1343:189.
- [3] HADAWAY J B, JOHNSON R B. Design and analysis of optical systems for the Stanford/MSFC multi-spectral solar telescope array[J]. *SPIE*, 1989,1160:195.
- [4] HARVEY J E, ZMEK W P, FTACLAS C. Imaging capabilities of normal-incidence X-ray telescope[J]. *Optical Engineering*, 1990,29(6):603-608.
- [5] 空间极紫外太阳望远镜系列报告[R]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,1999. Space extreme ultra-violet telescope document[R]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. 1999.

作者简介:陈 波(1961-),男,吉林长春人,研究员,1990年在长春光机所获硕士学位,长期从事短波光学研究工作,曾获国家技术发明奖一项,国家科技进步二等奖一项,中科院科技进步一等奖一项,中科院科技进步二等奖四项,三等奖一项,主要研究领域:软 X 射线-真空紫外波段光源、探测器、辐射计量及空间光学仪器研究。