

文章编号 1004-924X(2011)09-2057-06

月基地球等离子体层极紫外成像仪的光学设计

陈波*, 何飞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 依据地球等离子体层在 30.4 nm 的辐射特性, 首次以月球为观测点进行地球等离子体层极紫外波段成像观测方法研究。确定了在月球表面使用的极紫外成像仪的技术参数, 给出了视场角为 15° 、角分辨率为 0.1° 、入瞳面积 $>70 \text{ cm}^2$ 的极紫外成像仪的结构形式, 采用单球面多层膜反射镜与球面微通道板光子计数成像探测器相结合的方式设计了极紫外成像仪。对设计的极紫外多层膜光学系统成像仪进行光线追迹, 弥散斑半径分别为 0.210 mm (0° 视场)、0.204 mm (3° 视场)、0.204 mm (5° 视场)、0.207 mm (7.5° 视场), 对应的角分辨率为 0.08° , 弥散斑在不同视场角度基本均匀, 其结果满足设计要求。该仪器可在月球表面工作, 获得视场范围为 $15.0 R_E$, 覆盖地球等离子体层主要区域, 空间分辨率为 $0.10 R_E$, 可以很好地观测到地球等离子体层主要细节, 为从外部进行地球等离子体层观测提供了一种高质量的成像观测方法。

关键词: 地球等离子体层; 极紫外成像仪; 月基观测; 光学设计

中图分类号: TH762; P354 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2057

Optical design of moon-based earth's plasmaspheric extreme ultraviolet imager

CHEN Bo*, HE Fei

(Changchun Institution of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

Abstract: According to the 30.4 nm radiation properties of the earth's plasmasphere, an earth's plasmaspheric extreme ultraviolet imaging method based on the moon was researched for the first time. The technical parameters of the extreme ultraviolet imager used in the lunar surface were determined, and its field of view is 15° , angular resolution is 0.1° and the entrance pupil area is larger than 70 cm^2 . By combining a single spherical multilayer mirror and a spherical microchannel plate photon counting imaging detector, the extreme ultraviolet imager was designed. The ray tracing of designed extreme ultraviolet imager with multilayer optics was also performed. Results show that the radii of the blur spots are 0.210, 0.204, 0.204, and 0.207 mm respectively at 0° , 3° , 5° , and 7.5° , which are basically identical at different field of views. In working on the lunar surface, the imager has a vision

收稿日期: 2010-09-13; 修订日期: 2010-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40774098; 10878004)

scope of $15.0 R_E$ to cover the main body of the earth's plasmasphere and a spatial resolution of $0.10 R_E$ that can reveal the main details of the earth's plasmasphere. It provides a high quality imaging method for the observation of earth's plasmasphere.

Key words: earth's plasmasphere; EUV imager; moon-based observation; optical design

1 引言

地球等离子体层作为近地空间的重要组成部分,存在于 $2.0 \sim 8.0 R_E$ ($R_E = 6378 \text{ km}$, 代表地球半径)的空间范围内,其分布和变化对内部的电离层以及大气层有很大的影响,而其结构形式、辐射特性以及分布的变化对近地空间环境亦有重要的影响。地球等离子体层的主要成份是由地球磁场捕获的电子和 H^+ , He^+ , O^+ 等离子,其中 H^+ 约占总离子含量 70%, He^+ 约占 20%, O^+ 约占 10%^[1-2]。 He^+ 可以共振散射太阳辐射出的 He II 30.4 nm 谱线,构成地球等离子体层极紫外辐射的主要部分,辐射强度在 $0.1 \sim 11.4 \text{ Rayleigh}$ 之间^[3-5]。等离子体层外部是地球磁层,其对 30.4 nm 辐射是光学薄的,因此,可以在地球等离子体层外部对地球等离子体层辐射出的 30.4 nm 辐射进行成像观测。月球是距离地球最近的天体,它有一侧始终面向地球,月球表面无大气,磁场和月震极其微弱,表面安静,是非常好的天然观测平台,适合进行长期、高质量成像观测。利用月球平台,在月球围绕地球运行过程中,以不同的角度对地球等离子体层进行成像,对获得的极紫外图像反演得到地球等离子体层的体分布,进而进行科学研究和空间天气预报是一项很有意义的工作。

鉴于地球等离子体层对地球近地空间环境的重要影响,美国和日本自上个世纪 70 年代开始对地球等离子体层进行了大量的观测和研究。典型的观测方法为局地观测、扫描成像观测和成像观测。如美国 1972 年发射的 STP-2 卫星上载有极紫外波段光度计^[6],首次观测到地球等离子体层的 30.4 nm 辐射,获得地球等离子体层极紫外辐射的强度分布。日本 1998 年发射的 Planet-B 卫星上搭载有一台极紫外波段光度计^[7],其视场角为 5.6° ,工作波段为 30.4 nm 和 84.3 nm,在 Planet-B 飞往火星的途中,对地球等离子体层进

行观测,将每一个小视场的图像拼接构成地球等离子体层图像,首次从地球等离子体层外部获得了地球等离子体层图像^[3]。2008 年日本发射的月亮女神号 (SELENE) 上载有一台极紫外成像仪 TEX^[8],SELENE 围绕月球运行,实现了对地球等离子体层的成像观测,TEX 工作波段为 30.4 nm 和 83.4 nm,视场角为 $10.9^\circ \times 10.9^\circ$,设计角分辨率为 0.1° 。但是,实际获得图像分辨率远远低于成像仪的设计指标,图像信噪比也较低^[9],SELENE 已经于 2009 年停止工作。

美国于 2000 年发射了在大椭圆轨道上运行的 IMAGE 卫星^[10],其远地点约为 42 000 km,近地点约为 1000 km,在远地点附近对地球等离子体层的全貌进行观测,工作波段为 30.4 nm,图像分辨率为 0.6° ,获得了很好的地球等离子体层极紫外辐射图像,这些图像是目前获得的分辨率最高的地球等离子体层极紫外辐射图像,利用 IMAGE 观测数据已经取得了大量研究成果^[4]。但是,这台卫星也于 2005 年 12 月停止工作,目前世界上没有在有轨工作的地球等离子体层极紫外辐射成像观测仪器。

IMAGE 上的极紫外成像仪所获得的极紫外图像是目前最好、最全面的地球等离子体层的极紫外图像。但是,IMAGE 卫星轨道高度只有 42 000 km,需要大于 70° 视场的成像仪器才能观测到地球等离子体层的全貌,而在极紫外波段无法实现 70° 视场,只有采用 3 台 30° 极紫外成像仪拼接构成 $84^\circ \times 30^\circ$ 视场的成像仪,再利用卫星自旋实现对地球等离子体层扫描成像。这对成像质量造成很大的影响,降低了图像分辨率,减少了极紫外成像仪的观测灵敏度。

为了获得高质量的地球等离子体层极紫外波段辐射图像,本文深入地研究了地球等离子体层的辐射特性,分析了在月球表面观测地球等离子体层辐射的分布及强度变化。利用动态全球核心等离子体层模式 (DGCPM)^[11] 模拟了在月球表面观测地球等离子体层 30.4 nm 辐射的分布,所获

得分布特性如下:

(1)地球等离子体层位于赤道面 $5.5 R_E$ 以内,子午面 $4.0 R_E$ 以内;等离子体层顶、肩和尾的典型结构尺度为 $0.10 R_E$ 。

(2)从美国 IMAGE 卫星上的极紫外成像仪的观测结果得知,磁暴期间地球等离子体层收缩和扩张的平均速率为 $0.7 R_E/h$,变化 $0.10 R_E$ 尺度所需要的时间为 9 min 。

(3)计算得到地球等离子体层中心区域 30.4 nm 辐射强度在 $0.1 \sim 11.4 \text{ Rayleigh}$,边缘区域的强度在 $0.02 \sim 0.10 \text{ Rayleigh}$ 。

根据计算得到的地球等离子体层分布特性^[5,12],设计了一台在月球表面工作的极紫外成像仪,工作波段为 30.4 nm ,光谱带宽 $< 5 \text{ nm}$,视场角为 15° ,角分辨率优于 0.1° ,探测灵敏度 $> 0.1 \text{ count} \cdot \text{s}^{-1} \text{ Rayleigh}^{-1}$,曝光时间为 $2 \sim 10 \text{ min}$ 。利用此极紫外成像仪可以获得完整的地球等离子体层图像和地球等离子体层的肩、顶、尾等的结构,可监测地磁活动引起的变化,研究地球等离子体层的晨昏不对称性、尾状结构和再注入等动力学过程,进行空间环境预报。

2 极紫外成像仪参数确定

本文根据对地球等离子体层外形尺寸、结构特征尺寸和变化速率的计算结果并利用以往卫星的观测结果,确定了在月球表面工作的极紫外成像仪的参数。按照月球距离地球的平均距离为 $60 R_E$,地球等离子体层在经度方向的变化为 $11 R_E$,在纬度方向上的变化为 $8 R_E$,只要观测要求的视场角为 $10.5^\circ \times 7.6^\circ$,即可覆盖地球等离子体层主要区域。地球等离子体层的顶、肩等典型结构尺度为 $0.10 R_E$,只要极紫外成像仪的角分辨率为 0.1° ,即可观测到地球等离子体层 $0.1 R_E$ 的结构特征。因此,选取 15° 圆视场,角分辨率为 0.1° 的极紫外成像仪即可以满足对地球等离子体层观测的需求^[4-5]。

根据极紫外成像仪的系统组成,可以计算其对待测发光物体的探测能力,即灵敏度 $S^{[10]}$, (S 代表强度为 1 Rayleigh 的均匀辐射在探测器上产生的计数),具体表示为:

$$S = A \times \omega \times \epsilon \times \tau \times \rho \times \frac{10^6}{4\pi}, \quad (1)$$

式中: ω 为每个分辨率单元所张开的立体角, τ 为滤光片的透过率, ρ 为多层膜反射镜的反射率, ϵ 为探测器的量子效率, A 为极紫外成像仪入瞳面积。可以计算得到在曝光时间 t 内,每个分辨率单元所得到的计数为:

$$N = BSt, \quad (2)$$

其中: N 为每个分辨率单元获得的光子计数, B 为等离子体层辐射的平均强度, t 为曝光时间。将公式(1)代入(2)得到每个分辨率单元在曝光时间内获得的光子数:

$$N = B \times A \times \omega \times \epsilon \times \tau \times \rho \times \frac{10^6}{4\pi} \times t. \quad (3)$$

按照地球等离子体层探测的要求,辐射强度最弱时为 $B = 0.10 \text{ Rayleigh}$,角分辨率为 0.1° ,极紫外成像仪单个分辨率单元所张立体角 $\omega = 3.1 \times 10^{-6} \text{ sr}$ 。依据现有技术所能达到的水平,可以达到透过率 $\tau = 0.25$,反射率 $\rho = 0.24$,探测器量子效率 $\epsilon = 0.12$ 。为了在曝光时间 $t = 600 \text{ s}$ 内,每个分辨率单元获得光子 $N \geq 7.2$,以获得足够的信噪比,计算得到极紫外成像仪的入瞳面积 $A = 70 \text{ cm}^2$ 。

对地球等离子体层辐射强度及其周围环境中的极紫外波段辐射强度的分析表明,能够进入极紫外成像仪的极紫外辐射有 He^+ 30.4 nm , He 58.4 nm ,以及 $\text{H Ly}\alpha$ 121.6 nm ,其中 58.4 nm 辐射强度平均为 $60 \text{ Rayleigh}^{[13]}$, 121.6 nm 辐射强度平均为 $1000 \text{ Rayleigh}^{[14]}$ 。在设计上考虑对 58.4 nm 和 121.6 nm 辐射的抑制,采用了 Al/C 滤光片和 Mo/Si 多层膜反射镜,同时考虑它们与探测器量子效率的综合作用结果,有效地抑制了 58.4 nm 和 121.6 nm 两个波段的辐射,提高了成像质量。

其中, 121.6 nm 辐射因 Al/C 滤光片的抑制作用,进入极紫外成像仪的能量极少,对成像几乎没有影响,可忽略不计。 Al/C 滤光片在 58.4 nm 波段的透过率较高,有部分辐射进入极紫外成像仪,但 58.4 nm 辐射主要集中在电离层与等离子体层交界区域,在等离子体层的中部和顶部存在很少,对地球等离子体层的成像质量影响不大。只是由于电离层中存在强 58.4 nm 辐射,需要提高极紫外成像仪的探测范围,以使强 58.4 nm 辐射进入极紫外成像仪中时探测器能正常工作,并获得高分辨率的极紫外辐射图像。

3 光学设计

因为极紫外波段无可用的透射光学材料,因此极紫外成像仪设计方案需要选择反射式光学系统。反射式光学系统有掠入射成像结构和正入射成像结构两种。目前,常用的掠入射成像结构有 Wolter 型和 K-B 型,这两种结构具有视场范围小和体积比较大的特点,不适合极紫外成像仪的光学设计要求。常用正入射成像结构有 Cassegrain 和 Schwarzschild 成像结构,这两种成像结构可以实现很高的光学分辨率,但是,Cassegrain 结构只能在很小的视场范围内实现高光学分辨率,且需要采用两块反射镜,不适合本项目设计要求。Schwarzschild 同样需要采用两块多层膜反射镜,且结构尺寸较大,也不适合极紫外成像仪的设计要求。因此,可供选用的只有单球面配合球面探测器的设计方案,这种设计方案结构尺寸较小,只用一个反射面,且视场范围较大。美国和日本已经发射的几台地球等离子体层成像探测器都采用了这种光学设计方案。

在月球表面观测地球等离子体层,距离远,探测目标辐射亮度微弱,需要采用高效率光学系统和高灵敏度探测器。因此,极紫外成像仪采用了单球面反射镜与带微通道板像增强器的位敏阳极探测器^[15]相结合的简单结构。探测器空间分辨率为 0.20 mm,有效口径为 $\Phi 40$ mm,背景计数率为 $1 \text{ count} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,接收面为球面,曲率半径为 300 mm。在单球面反射镜设计方面,考虑探测器有一定的支撑结构,取中心遮拦部分为 $\Phi 66$ mm。根据以上参数并结合视场角和分辨率要求,设计出凹球面反射镜,其曲率半径为 300 mm,口径为 $\Phi 191$ mm;入瞳在反射镜面的球心处,入瞳外口径为 $\Phi 118$ mm,中心遮拦口径为 $\Phi 66$ mm;系统有效焦距为 150 mm。利用 ZEMAX 光学设计软件对极紫外成像仪进行结构优化和光线追迹,得到的光路如图 1 所示,点列图如图 2 所示。从点列图中看到,弥散斑在不同的视场角度时基本均匀,弥散斑的半径分别为:0.210 mm(0° 视场),0.204 mm(3° 视场),0.204 mm(5° 视场)和 0.207 mm(7.5° 视场),所对应的角分辨率为 0.08°,满足极紫外成像仪在 15° 圆视场范围内分辨率的设计要求,具体结构参数如表 1 所示。

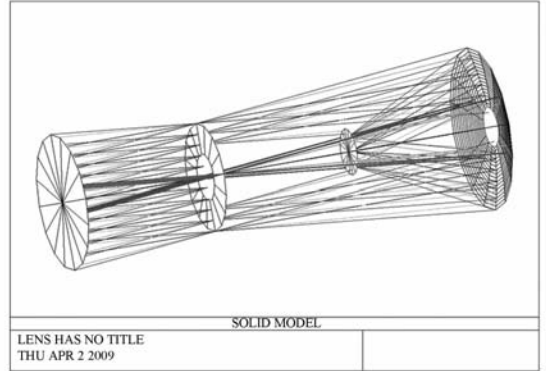


图 1 极紫外成像仪光路图

Fig. 1 Optical configuration of extreme ultraviolet imager

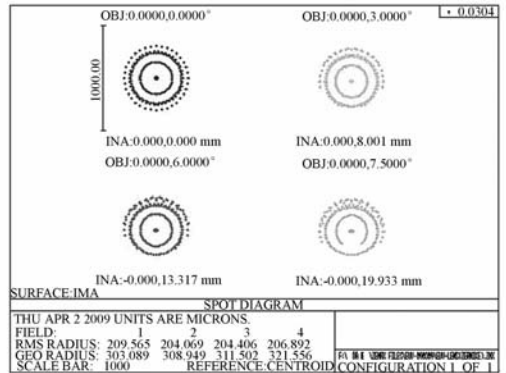


图 2 极紫外成像仪点列图

Fig. 2 Spot diagram of extreme ultraviolet imager

表 1 极紫外成像仪光学设计参数

Tab. 1 Optical design parameters for extreme ultraviolet imager

项 目	参 数
工作波长	30.4 nm
视 场	15° 圆视场
角分辨率	0.10°
反射镜口径	187.1 mm
探测器有效口径	40.0 mm
有效焦距	150.0 mm

4 结 论

依据地球等离子体层辐射特性以及现有的技术基础,提出了在月球表面进行地球等离子体层观测的极紫外波段成像仪设计方案,给出了极紫外成像仪的结构参数。据此进行了光学设计,并

进行光线追迹。追迹结果表明:文中的设计具有很好的可实现性,主要性能指标高于美国和日本发射的同类极紫外成像仪器。该仪器可以在月球表面工作,获得视场范围 $15 R_E$ 、空间分辨率 0.1

R_E 的地球等离子体层高质量图像。视场覆盖地球等离子体层主要区域,可以很好地观测到主要细节,为科学研究和空间天气预报提供准确、可靠的数据。

参考文献:

- [1] FARRUGIA C J, GEISS J, YOUNG D T, *et al.*. GEOS-1 observations of low-energy ions in the earth's plasmasphere: a study on composition, and temperature and density structure under quiet geomagnetic conditions [J]. *Adv. Space. Res.*, 1988, 8: 25-33.
- [2] FARRUGIA C J, GEISS J, YOUNG D T, *et al.*. The composition, temperature and density structure of cold ions in the quiet terrestrial plasmasphere: GEOS-1 results [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94 (A9):11865-11891.
- [3] NAKAMURA M, YOSHIKAWA I, YAMAZAKI A, *et al.*. Terrestrial plasmaspheric imaging by an extreme ultraviolet scanner on Planet-B [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(2):141-144.
- [4] SANDEL B R, GOLDSTEIN J, GALLAGHER D L, *et al.*. Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere [J]. *Space. Sci. Rev.*, 2003, 109(1):25-46.
- [5] HE F, ZHANG X X, CHEN B, *et al.*. Calculation of the extreme ultraviolet radiation of the earth's plasmasphere [J]. *Sci. China Tech. Sci.*, 2010, 53 (1):200-205.
- [6] WELLER C S, MEIER R R. First satellite observations of the He+ 304-Å radiation and its interpretation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79(10):1572-1574.
- [7] NAKAMURA M, YAMASHITA K, YOSHIKAWA I, *et al.*. Helium observation in the Martian ionosphere by an X-ray ultraviolet scanner on Mars orbiter NOZOMI [J]. *Earth Planets Space*, 1999, 51:61-70.
- [8] YOSHIKAWA I, YAMAZAKI A, MURAKAMI G, *et al.*. Telescope of extreme ultraviolet (TEX) onboard SELENE: science from the Moon [J]. *Earth Planets Space*, 2008, 60(4):407-416.
- [9] MURAKAMI G, YOSHIKAWA I, OBABA Y, *et al.*. First sequential images of the plasmasphere from the meridian perspective observed by KAGUYA [J]. *Earth Planets Space*, 2010, 62:9-12.
- [10] SANDEL B R, BROADFOOT A L, CURTIS C C, *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the image mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, 91(1):197-242.
- [11] OBER D M, HORWITZ J L, GALLAGHER D L. Formation of density troughs embedded in the outer plasmasphere by subauroral ion drift events [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102 (A7): 595-602.
- [12] 何飞,陈波,张效信,月基观测地球等离子体层极紫外辐射特性[J]. *光学精密工程*, 2010, 18 (12):2564-2573.
HE F, CHEN B, ZHANG X X, Moon-based imaging of the earth's plasmaspheric extreme ultraviolet radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (12):2564-2573. (in Chinese)
- [13] MEIER R R, WELLER C S. Extreme ultraviolet observations of the latitudinal variation of Helium [J]. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79(10):1575-1758.
- [14] MEIER R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1991, 58:1-185.
- [15] 尼启良,刘世界,陈波.极紫外位置灵敏阳极光子计数成像探测器研究[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(1): 36-40.

NI Q L, LIU S J, CHEN B. Investigation on extreme ultraviolet photon-counting imaging detector

with position-sensitive anode [J]. *Chi J. Opt. App. Opt.*, 2009, 2(1):36-40. (in Chinese)

作者简介:



陈波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软X射线-极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp. ac. cn



何飞(1984—),男,四川汉源人,博士,助理研究员,2006年于西南大学获得学士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间物理学和空间短波段光学成像技术的研究。E-mail: kahifly@163. com

●下期预告

干涉仪成像畸变引起测量误差的校正方法

刘满林¹,杨旺¹,许伟才^{1,2}

- (1. 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 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

根据光学系统的波像差理论和干涉检测原理,分析了干涉仪系统的成像畸变对测量结果的影响。重点讨论了被测面的摆放存在倾斜和离焦的情况下所导致的测量误差,并提出了误差校正方法。实验中对同一个被测面进行多次测量,干涉图样为3个条纹时的测量结果为30.96 nm PV,6.32 nm RMS,10个条纹的测量结果为41.25 nm PV,8.22 nm RMS。校正后两次测量结果的PV值相差降低到1.5 nm,RMS值相差<0.5 nm。实验结果表明:提出的畸变校正方法可以有效地降低测量误差,提高测量结果的复现性,为高精度面形测量提供了参考。