

远紫外宽带极光成像仪初步研究

付利平*, 王咏梅, 王英鉴, 张仲谋, 吕建工

中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

* E-mail: fuliping@cssar.ac.cn

收稿日期: 2009-02-18; 接受日期: 2009-07-02

国家自然科学基金(批准号: 40474051, 40874099)资助项目

摘要 在回顾星载远紫外波段极光形态探测技术发展的基础上, 介绍我们研制的用于极光形态探测的远紫外宽带极光成像仪, 该仪器研制目的是用于大椭圆轨道上对极光形态及其随时间变化进行连续观测, 为我国首次研制该类型仪器. 仪器主要由望远镜系统、像增强器系统、CCD 及采集控制系统组成. 仪器工作波段在 140~190 nm, 总视场 $25^\circ \times 25^\circ$, 空间分辨率优于 0.1° .

关键词

远紫外
极光形态
成像探测

1 引言

极光是由能量电子或质子与大气的主要组成成分 N_2 和 O_2 相互作用所产生的^[1]. 极光辐射特性, 特别是远紫外波段的谱特性, 是中间层、低热层、电离层物理化学过程信息的重要来源. 由于远紫外辐射信息几乎不受地表及边界层大气复杂背景影响, 已成为分析太阳活动-磁层-电离层-热层-中高层大气能量传输和转换、地球高层大气和电离层参量日常监测的重要手段^[2,3]; 极光的形态学参数, 包括极光发生的位置、极光的边界形状、极光卵的大小及在亚暴期间极光强度的变化对于研究太阳风和地球磁层的相互作用是非常重要的, 例如极盖的面积就与磁尾中贮存的能量有关^[4]. 典型的极光发生在地磁纬度 70° 以内. 从太空中对极光椭圆区成像可提供磁层不同区域的时空信息, 可以提供总能量流、加速过程及注入粒子的能量特性^[5]. 随着卫星技术的发展, 从空间对极光进行探测, 特别是远紫外波段(100~200 nm)的探测, 提供了地面上无法得到的极光的多种信息. 星载极光探测技术目前的探测技术和模式已经足以使我们通过对极光成像得到主要参数(描述沉降粒子

参量, 如流量、能量特性等)的像^[5].

国际上在真空紫外波段对极光进行形态探测开始于 20 世纪 70 年代, 相关的理论研究也同时进行^[6~8]. 较有代表性的仪器包括 1981 年发射的 DE-1 卫星上搭载的 SAI (The Spin-Scan Auroral Imager)^[9], 用于可见和 FUV 波段的全球极光成像; 1986 年 2 月 22 日瑞典发射科学卫星 Viking 极轨卫星搭载了紫外极光成像仪(UAI)^[10], 由两个摄像机组成, 可分别对 134~180 nm 和 123.5~160 nm 波段进行成像. UAI 是一个独具创新的仪器, 它的最大特点是仪器结构紧凑, 并实现了对极光形态的可视化探测, 特别适合于在高轨道卫星上的极光探测, 在随后的近 30 年时间内, UAI 及相应的改进型远紫外极光成像仪在各种高高度、大椭圆轨道上卫星上(如 POLAR^[5], 1991; Freja^[11], 1992; Interball, 1996; IMAGE^[12], 2000, 等)为研究太阳-磁层相互关系提供了丰富的极光探测数据.

在我国, 对极光进行天基探测及研究已经引起空间物理学家及相关部门的重视, 相关的探测计划已经或正在开展, 其中包括以极光探测为主要目的的重要空间探测计划——“夸父计划”, 该计划将在大

引用格式: 付利平, 王咏梅, 王英鉴, 等. 远紫外宽带极光成像仪初步研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(12): 1905—1910

Fu L P, Wang Y M, Wang Y J, et al. Far ultraviolet auroral imager. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(12): 3709—3714, doi: 10.1007/s11431-009-0400-1

椭圆轨道上对极光进行 24 h 不间断监测. 在理论研究方面, 宗秋刚等人^[13]、蔡红涛等人^[14]利用观测资料初步研究了极光沉降粒子极区高层大气中的传输规律和特性. 在相关的仪器研制方面, 尚无星载探测仪器的研制报道, 夸父计划中的相关仪器目前多为国外引进产品. 因此, 发展我国自主研发的天基极光探测仪器对于发展我国的空间物理科学研究, 推动相关技术和研制工艺的发展都是非常重要的.

在国家自然科学基金的支持下, 我们研制了远紫外宽带极光成像仪原理样机, 该样机是我国首次针对在大椭圆轨道上对极光远紫外波段形态演化进行连续监测的仪器. 该样机的研制为将来仪器正式进行卫星搭载完成科学探测任务奠定基础, 也为我们远紫外波段的空间探测提供技术保障.

2 远紫外宽带极光成像仪系统及原理

极光 LBH(127~240 nm)带是由电子与处于激发态的 N_2 分子碰撞而产生的, Strickland^[3,15]提出可以通过对极光的 LBH 带的观测得到沉降电子能量参数. 因为OI的 135 nm 线的强度非常强, 因此我们在测量 N_2 的 LBH 带时, 为避免该谱线的影响, 选择测量波段从 140 nm 开始, 而对于大于 190 nm 辐射, 由于散射作用影响很大, 因此在空间极光 FUV 探测中基本不考虑. 同时在 140~190 nm 波段对极光进行星下点成像观测, 受云层和下垫面的太阳散射影响是最小的, 且在这个波段进行天底的极光形态观测可以很好地与高纬度的日气辉区分开^[12]. 目前国际上类似的仪器对极光的 LBH 带进行形态观测主要分为两类, 第一类是分别同时探测 LBH 带的短波和长波部分, 如 POLAR 卫星上 UVI 仪器, 同时探测 LBH 140~160 和 160~175 nm 两个波段, VIKING 卫星上 UV 相机测量波段分别为 134~180 nm 和 124~160 nm; 第二类是测量整个的 LBH 带, 其中代表性的仪器是 IMAGE 卫星上的 WIC, 其测量波段为 140~190 nm. 第一类仪器可以通过比较直接 FUV 波段长波部分(160~180 nm)和短波部分(140~160 nm)的强度值, 从而得到发射线的高度, 并通过进一步的分析最终可以得到沉降电子的能量. 而第二类仪器可结合卫星上另外的极光 FUV 成像仪器的探测结果(例如 135.4 nm 的测量结果), 通过模式计算, 同样可以得到沉降电子的能量. 对于研

制仪器来说, 二者主要差别在望远镜光学镀膜上, 即通过在镜面上镀不同的膜层可以达到波段选取的目的. 因此, 作为原理样机的研制, 我们选择 140~190 nm 作为我们仪器的探测波段.

成像仪由望远镜、像增强器(由光阴极、MCP、荧光屏组成)、耦合透镜、CCD 及数据采集读出系统组成. 望远镜对无穷远处极光形态进行成像, 像斑落在像增强器的 CsI 光阴极上, 通过像增强器对成像探测信号进行放大并转化为可见波段图象, 通过耦合透镜被 CCD 探测器接收, 最终由数据采集控制系统输入到计算机中(如图 1).

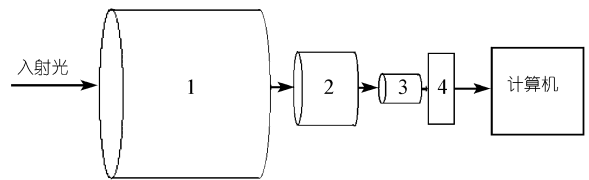


图 1 远紫外宽带极光成像仪工作原理图, 其中 1 为望远镜系统, 2 为像增强器, 3 为耦合透镜组, 4 为 CCD 探测器

2.1 望远镜系统

本仪器的视场角约为 $25^\circ \times 25^\circ$, 对应 7 Re 卫星高度处的星下点覆盖范围为 $19500 \text{ km} \times 19500 \text{ km}$, 可覆盖整个极光卵(该视场在 4~5 Re 轨道高度也可覆盖整个极光卵); 瞬时视场 0.1° , 对应地面分辨率约为 80 km, 而对极光进行形态探测分辨率 100 km 即可满足科学需求^[16]. 目前在卫星上对极光形态进行探测的仪器中常用的望远镜系统为反卡塞格林式望远镜, 这种形式的望远镜结构紧凑, 但其像面为曲面, 这样将大大增加了探测器的研制难度, 同时增加整机调节难度. 我们所设计的望远镜采用离轴三反结构, 镜面镀 $\text{Al}+\text{MgF}_2$ 反射膜. 该结构无色差, 无二级光谱, 使用波段宽, 孔径可以做得较大, 可轻量化(如采用蜂窝结构), 同时相对于同轴望远镜, 其可调节参数(离轴量、曲率、非球面因子等)增加, 因此更容易做到好的像质. 另外, 相对于目前常用的反卡塞格林式望远镜, 离轴三反的设计避免了中心遮挡的问题, 增加了进入系统的能量; 同时, 也是非常关键的一点, 即离轴三反的焦面为平面, 这样将大大降低探测器的研制难度. 我们设计的望远镜视场为 $25^\circ \times 25^\circ$, 空间分辨率约 0.02° . 望远镜设计结构及传递函数如图 2 所示.

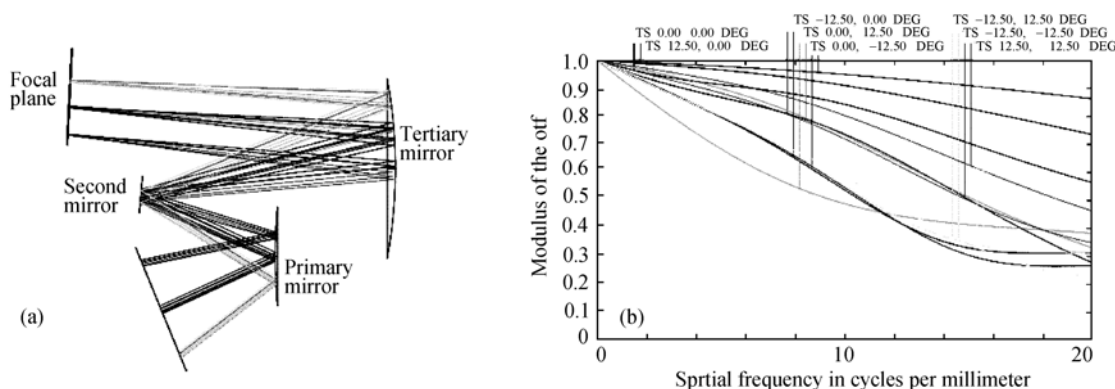


图 2 望远镜设计图

(a) 望远镜光学结构图; (b) 空间传递函数图

2.2 探测器系统

描述极光强度的单位为瑞利(Rayleigh),

$$1 \text{ Rayleigh} = 10^6 / 4\pi \cdot \text{photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{strd}^{-1}. \quad (1)$$

本仪器探测的光强范围为几十 Rayleigh~100 kRayleigh, 根据估算, 在 $\Phi 75 \mu\text{m}$ 的成像斑内接收到的光子数为 $0.11 \text{ photons/s/Rayleigh/cm}^2$, 据此我们设计仪器的探测器系统的工作方式为: 像增强器、耦合透镜、CCD.

像增强器由入射窗、光阴级、MCP 和荧光屏组成, 输入窗口选择 MgF_2 材料, 光阴级是以 MCP 为基底的反射式 CsI 光电阴极, 可对 200 nm 以上及 120 nm 以下的光谱进行截止. 像增强器选用的是 $\Phi 36$ 微通道板, 丝径为 $d=10 \mu\text{m}$, 电流增益 $G=12100$, 通道中心距 $s=12 \mu\text{m}$. 荧光屏选用的是 P20 荧光粉, 输出窗为光纤面板.

像增强器与 CCD 耦合方式有 2 种, 即光锥耦合和透镜耦合. 光锥耦合的效率较高, 但对耦合工艺要求非常高, 否则像质差, 而且对背照式 CCD 有离焦和 MFT 下降的问题; 透镜耦合的光学效率较低, 而且设计过程中杂散光的影响要考虑, 但它成像质量较好, 调焦容易, 而且对背照式和前照式 CCD 均使用. 我们仪器所选用的耦合方式是透镜耦合, 主要从以下几方面考虑.

1) 调试方便. 本仪器选用的 CCD 为背照式科学级 CCD, 而一般的背照式 CCD 所给出的光阴级与前表面的距离并不是很精确, 利用透镜耦合可以在一定的范围内调节焦平面的位置, 这样可以有较好的

聚焦效果.

2) 成本低. 由于光锥耦合涉及到与 CCD 的粘合, 而 CCD 是比较娇贵的器件, 价格也比较昂贵, 稍有不慎可能导致 CCD 的损坏. 而由于耦合透镜测量波段为可见波段, 因此透镜用 K9 玻璃即可满足要求, 且对镜面的粗糙度、面型要求也不高.

3) 透镜耦合和光锥耦合对于我们研制的原理样机所需达到的性能指标来说并无本质上的区别.

2.3 成像仪设计参数和指标

远紫外宽带极光成像仪的设计参数和指标如表 1 所示.

表 1 远紫外宽带极光成像仪的设计指标

总视场	瞬时视场	光谱范围	动态范围	曝光时间
$25^\circ \times 25^\circ$	0.1°	140~190 nm	10^4	<10 s

3 测试结果及讨论

3.1 测试结果

1) 光谱范围测试.

利用北京同步辐射真空紫外光源, 我们首先对像增强器的光谱响应特性进行测试, 测试结果如图 3 所示.

测试结果表明, 本像增强器对 140~190 nm 波段有较好的光谱响应, 其响应峰值在 160~170 nm, 能较好的用于远紫外波段的成像探测. 但在长于 200 nm 的波段, 增强器仍有一些响应, 与 CsI 光阴极的截止特性不符, 经分析主要是能由于在镀光阴极时引进

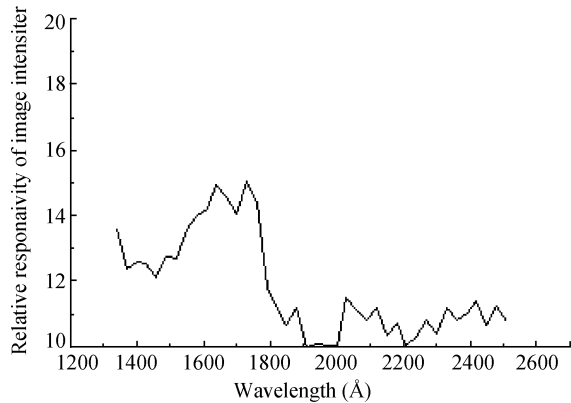


图3 像增强器光谱相对响应特性

杂质所造成,今后如果能在镀膜工艺上进一步优化,可更好地解决长波截止问题. 由于像增强器所使用窗口材料为 MgF_2 , 因此造成 140 nm 以下的波段仍有透过, 这也是我们所不希望看到的. 如果窗口材料选择 BaF_2 , 并进行适当的加热和控温, 根据 BaF_2 材料的光学特性, 可以很好的截止 140 nm 以下的波段到

达光阴极.

利用平行光管、小孔板和转台, 我们分别对远紫外宽带极光成像仪的总视场、瞬时视场、动态范围等指标进行了测试, 测试结果如下.

2) 瞬时视场(星下点).

图4为利用准直光源照射距成像仪 700 mm 距离处的直径 1 mm 的小孔在仪器上成像的结果, 其中图 4(a) 为小孔在 CCD 上的成像斑, 图 4(b) 为该成像点在 CCD 上输出强度与像素对应的输出值, 成像斑强度的半高宽在 CCD 上约占 4 个像元, 96 μm , 根据仪器的设计参数得到仪器的空间分辨率(瞬时视场)约 0.08°.

3) 总视场.

测试时, 由于测试空间位置的限制, 我们仅分别对 0°视场和-10°时星点板的成像位置进行测量, 测量结果如图5所示. 0°视场与-10°视场成像位置间隔为 8.9 mm, 由于整个望远镜的设计为中心对称, 所以可以认为 10°视场与-10°视场成像点间距离约为 20 mm, 以此

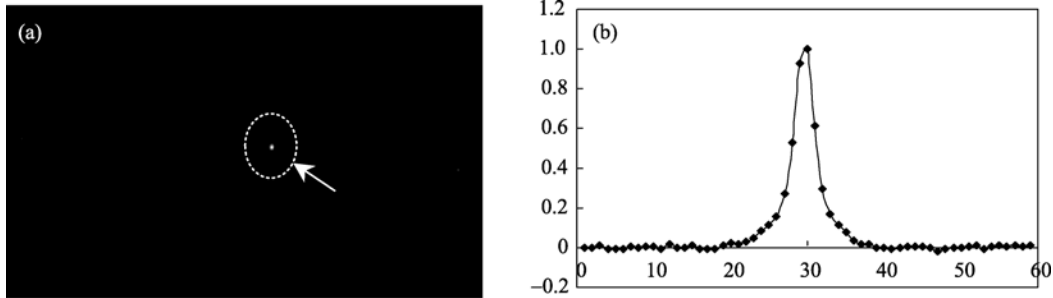


图4 对小孔板进行成像探测结果

(a) 成像仪测得的小孔成像斑; (b) 成像斑强度与像素位置关系

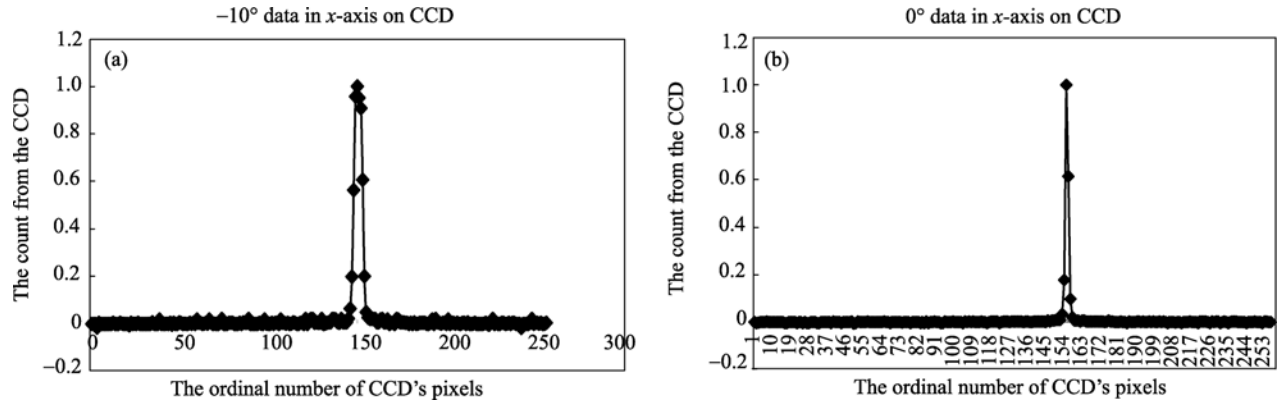


图5 总视场测试结果

(a) -10°视场测试结果; (b) 0°视场测试结果

类推, 整个 25° 视场成像斑大小应为 25 mm, 而探测器部分光阴级大小为 30 mm, 即 25° 视场完全成像于探测器有效面积. 因此可认为仪器总视场角为 25° .

4) 动态范围.

通过改变入射光强和 CCD 积分时间, 我们对仪器的动态范围进行了测试, 测试结果如下.

图6(a)是保持 CCD 的积分时间不变, 通过改变入射光强来测试仪器的动态范围, 图6中横坐标为不同滤光片组的透过率(入射光强改变), 纵坐标为 CCD 输出计数. 图6(b)是在一定的入射光强下, 通过改变 CCD 积分时间对仪器动态范围进行测试. 图6中横坐标为积分时间, 纵坐标为 CCD 输出计数. 综合分析二者的测试结果可知, 本仪器动态范围可达 10^4 .

3.2 讨论

我们对研制完成后的远紫外宽带极光成像仪的部分性能进行了测试, 测试结果表明, 仪器的整体性能满足我们的设计指标要求(见表 1).

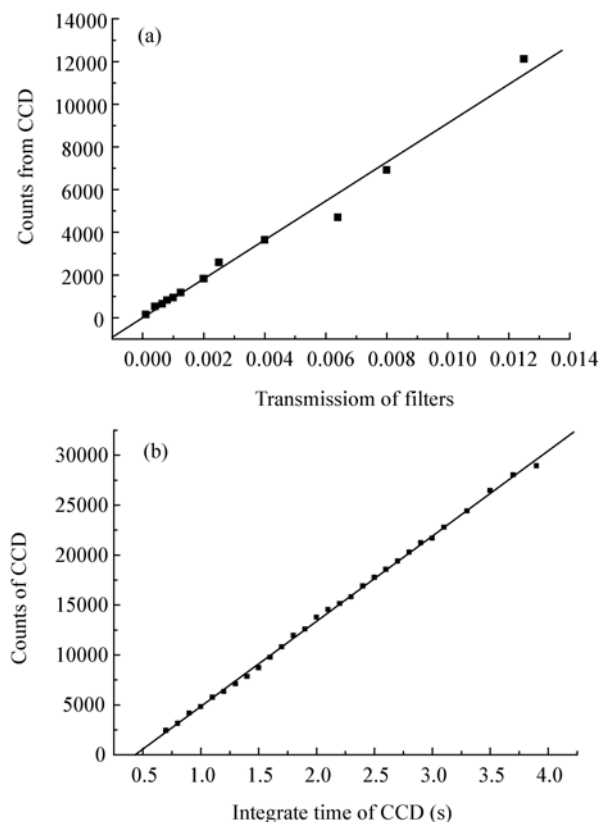


图 6 动态范围测试结果

(a) 不同光强对应的仪器输出; (b) 不同积分时间对应的仪器输出

在仪器的光谱响应范围指标上, 测试值较设计值范围宽, 即仪器在小于 140 nm 波段及高于 190 nm 波段仍有响应. 我们分析短波透过主要由于选择像增强器窗口材料 MgF_2 光学特性引起, 该材料可透过 115 nm 以上的光谱. 图 7 是我们换窗口材料后的模拟结果, 结果表明, 若将 MgF_2 窗口替换为 BaF_2 材料, 可较好抑制 140 nm 以下的杂散光.

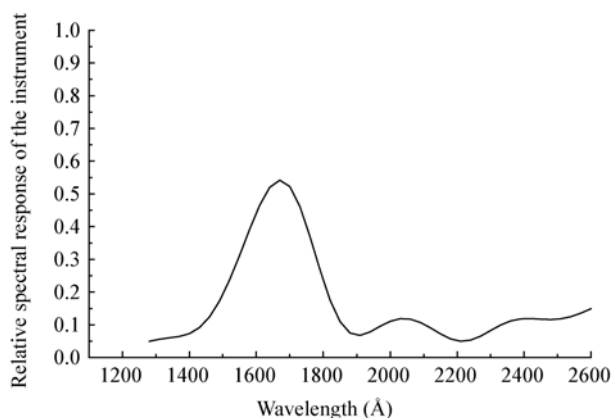


图 7 光谱响应模拟结果

在 190 nm 以上的波段, 本仪器也有响应, 这是我们所不希望的. 经分析, 主要是因为像增强器光阴极镀膜时有杂质引起的, 如果改进镀膜工艺, 可对 190 nm 以上的光谱很好抑制^[17], 国外同类产品镀 CsI 光阴极可对长波抑制达 5 个量级^[5]. 实际上, 对光谱杂散光的抑制应该是多种方式共同作用的结果^[5], 包括滤光片的选取、望远镜表面镀多层反射膜^[18~20]、探测器的选取等, 通过这几种方式的共同作用, 可以对带外杂散光抑制达 10^9 ^[5].

4 结论

极光是研究极区磁层-电离层-热层耦合过程的很好途径, 星载极光探测仪器, 特别是远紫外波段的成像探测仪器我们研究极光提供了丰富的探测数据. 本文介绍了我国首次研制的可用于远紫外波段对极光形态的时空演化进行监测的星载仪器——远紫外宽带极光成像仪, 成像仪由望远镜系统、像增强器、耦合透镜和 CCD 及相应控制采集电路组成. 对仪器主要性能进行了测试, 测试结果表明, 该仪器总视场约 $25^\circ \times 25^\circ$ 、空间分辨率优于 0.1° 、探测光谱范围 140~200 nm、动态范围 10^4 , 积分时间可根据信号大小进行调节.

本文的研究工作是进行天基远紫外极光探测的基础, 为发展我国自主研制该类空间探测仪器提供必要的技术保障. 由于目前只是原理样机的研制, 仅对仪器的一些主要指标进行了初步测试, 还有许多更细致的工作需要进行, 例如仪器性能的优化(包括

光谱杂散光抑制、空间杂散光抑制、像增强器性能优化、图象最终处理等方法), 更多详细参数的测试(包括成像均匀性、仪器灵敏度), 仪器的地面定标等, 这些都是仪器最终完成并应用于科学探测所必须完成的工作, 也是我们目前正在或即将进行的工作.

致谢 在此衷心感谢中科院西安光机所赵宝升研究员和中科院高能所同步辐射实验室陶冶博士在像增强器研制和测试方面提供的帮助.

参考文献

- 1 Mende S B, Frey H U, Immel T J, et al. Global imaging of proton and electron aurora in the far ultraviolet. *Space Sci Rev*, 2003, 109(1-4): 211—254[[doi](#)]
- 2 Meier R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere. *Space Sci Rev*, 1991, 58(1-2): 1—185[[doi](#)]
- 3 Strickland D J, Jasperse J P. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere. *J Geophys Res*, 1983, 88(A11): 8051—8062[[doi](#)]
- 4 Li X, Ramachandran R, Movva S, et al. Dayglow removal from FUV auroral images. *IEEE*, 2004, 6: 3774—3777
- 5 Torr D G, Zukic M, Johnson R B, et al. A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission. *Space Sci Rev*, 1995, 71(1-4): 329—383[[doi](#)]
- 6 Germany G A, Torr M R, Richards P G. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicator. *J Geophys Res*, 1994, 99(A1): 383—388[[doi](#)]
- 7 Germany G A, Parks G K, Brittnacher M. Remote determination of auroral energy characteristics during substorm activity. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(8): 995—998[[doi](#)]
- 8 Germany G A, Torr D G, Richards P G. Determination of ionospheric conductivities from FUV auroral emission. *J Geophys Res*, 1994, 99(A12): 23297—23305[[doi](#)]
- 9 Frank L A, Craven J D, Ackerson K L, et al. Global auroral imaging instrumentation for the dynamics explorer mission. *Space Sci Instrum*, 1981, 5(12): 369—393
- 10 Anger C D, Babey S K, Broadfoot A L, et al. An ultraviolet auroral imager for the viking spacecraft. *Geophys Res Lett*, 1987, 14(4): 387—390[[doi](#)]
- 11 Murphree J S, King R A. The FREJA ultraviolet imager. *Space Sci Rev*, 1994, 70(3-4): 421—446[[doi](#)]
- 12 Mender S B, Heeterdicks H, Frey H U, et al. Far ultraviolet imaging from the image spacecraft: 1. System design. *Space Sci Rev*, 2000, 91(1): 243—270[[doi](#)]
- 13 宗秋刚, 付媛燕, 濮祖荫. 极光粒子沉降研究: 谱形式及其在极区大气中的传输. *极地研究*, 1999, 11(3): 203—220
- 14 蔡红涛, 马淑英, 濮祖荫. 极光沉降粒子在极区大气中传输的数值研究. *中国科学 E: 技术科学*, 2008, 38(11): 1958—1969
- 15 Strickland D J, Anderson D E. Radiation transport effects on the OI 1356Å limb intensity profile in the dayglow. *J Geophys Res*, 1983, 88(A11): 9260—9264[[doi](#)]
- 16 Frey H U, Mende S B, Immel T J. Summary of quantitative interpretation of far ultraviolet auroral image data. *Space Sci Rev*, 2003, 109(1-4): 255—283[[doi](#)]
- 17 张宝, 李慧蕊. 真空紫外 MCP-PMT 中应用碘化铯阴极的研究. *光电子技术*, 1999, 19(1): 74—78
- 18 干蜀毅, 徐向东, 洪义麟, 等. 真空紫外~X 射线反射膜研究现状. *真空科学与技术学报*, 2006, 26(6): 459—468
- 19 薛春荣, 范正修, 邵建达. 真空紫外光学薄膜及薄膜材料. *激光与光电子进展*, 2008, 45(1): 57—64
- 20 李懋廉, 卢春光, 王哲, 等. 短波段光学薄膜. *薄膜科学与技术*, 1995, 8(1): 1—11