

光学学报

空间太阳极紫外三波段成像光谱仪系统设计

段紫雯¹, 邢阳光^{1*}, 彭吉龙², 代树武³, 王颖³, 朱成林³, 闫雷⁴, 黄一帆¹, 刘越^{1**}, 李林¹

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

³北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

⁴北京宇航系统工程研究所, 北京 100076

摘要 太阳上层大气,即日冕、过渡区和色球,是由炽热的高度动态的磁化等离子体构成,其中高度电离的离子发射出丰富的极紫外谱线。空间太阳极紫外光谱成像观测对于捕获太阳上层大气中爆发活动的动态物理演化过程,以及实现对大气等离子体特征参数的精确测量具有重要的意义。然而现有的极紫外光谱成像仪器只能针对太阳上层大气的一个或两个目标区域进行成像观测,缺乏采用单一仪器对整个太阳上层大气区域在大空间和宽波段尺度范围内的光谱进行诊断的能力,严重制约了人们对太阳爆发活动中的能量及物质运输过程的理解。为了利用单个仪器实现对日冕、过渡区和色球的高分辨率同时诊断观测,本文提出并设计了一款同时工作在 17~21 nm、70~80 nm 和 95~105 nm 三个波段的太阳极紫外成像光谱仪,该仪器基于非罗兰圆结构下的椭球面变线距(EVLS)光栅像差校正理论,采用狭缝扫描式成像光谱结构,实现了具有大离轴狭缝视场的高空间、高光谱分辨的消像散光谱成像。基于蒙特卡罗统计模拟方法对太阳极紫外三波段成像光谱仪的最优模型开展光线追迹仿真实验,仿真结果表明,所设计的成像光谱仪取得了良好的光栅像差校正效果,系统空间分辨率优于 0.6",光谱分辨率在 17~21 nm 波段优于 0.006 nm,在 70~80 nm 和 95~105 nm 波段优于 0.008 nm。本文研究对我国未来的太阳极紫外光谱成像仪器的发展和研制具有重要的理论意义,对我国未来的太阳空间探测任务的型号遴选具有重要的参考价值。

关键词 太阳空间探测; 太阳极紫外; 成像光谱仪; 光栅像差校正; 光线追迹

中图分类号 O434

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230980

1 引言

太阳是天然的天体物理实验室^[1],研究太阳上发生的各种物理过程对于空间天文学、粒子物理学和等离子体物理学等学科都具有极其重要的价值^[2]。同时,日地空间环境与人类的生存和发展息息相关^[3],而太阳活动中的典型事件,如耀斑^[4]和日冕物质抛射(CMEs)^[5],会在短时间内释放出巨大的能量^[3],可能引起日地空间环境的剧烈变化,对载人航天、无线电通信、卫星导航、电力网络等领域产生灾害性的影响^[6]。空间太阳极紫外(EUV:10~120 nm)光谱学观测及其诊断技术是研究太阳大气各区域基本物理过程最重要的手段之一^[7],太阳的日冕、过渡区和色球都辐射出丰富的极紫外谱线,其中,日冕的辐射谱线集中在 10~40 nm 波段,过渡区的辐射谱线集中在 40~160 nm 波段,色球的辐射谱线集中在 90~160 nm 波段。因此,工作在大于 90 nm 波长处的光谱成像仪器可以探测到温度高达 0.2 MK 的色球层和低过渡区,而工作在

90 nm 以下波长处的光谱成像仪器则最适合探测温度介于 0.2~1 MK 之间的过渡区以及温度超过 1 MK 的日冕^[8]。特别地,极紫外短波(10~40 nm)包含铁、氦、镁等重要的高度电离的离子发射谱线,是诊断高温日冕等离子体参数的重要光谱区,对解决日冕加热问题以及理解太阳风加速的物理机制具有重要意义。通过对极紫外观测波段的辐射谱线轮廓的拟合,可以获取极紫外辐射谱线强度、宽度和多普勒频移等重要参数^[9],从而对太阳爆发活动中太阳等离子体特征(如温度、流速、密度分布、元素丰度等)进行精确的诊断测量^[10]。这些测量结果对于研究太阳活动与恶劣地球空间天气的因果链关系具有重要的意义,通过深入研究太阳爆发活动背后的物理机制,进而可以更好地理解空间天气事件发生、发展、传播和影响的完整物理场景,从而为完善空间天气预报和防范提供有效的科学依据^[11]。

根据不同的科学任务目标,过去国外研制并发射了工作在不同太阳极紫外波段的光谱成像仪器。1972

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-06-12; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(62205027,42274208)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA15018300)

通信作者: *xyg@bit.edu.cn; **liuyue@bit.edu.cn

年,美国在发射的第七个轨道太阳观测台(OSO-7)卫星上搭载了极紫外光谱仪,工作波长为17~40 nm,采用了经典的掠入射光栅的结构,牺牲了仪器的空间分辨率(大于10")来保证一定的光谱分辨率(0.08 nm)^[12]。1973年,美国发射的太空实验室(Skylab)空间站上搭载的S082A极紫外光谱仪,工作波长为17.1~63 nm,采用了无狭缝式的光谱成像结构,虽然其空间分辨率略有提升(2"~10"),但仪器光谱分辨能力由于相邻谱线图像的混叠受到了严重的影响^[13]。1995年,美国发射的太阳和日球层天文台(SOHO)卫星上则搭载了多台极紫外观测设备,日冕诊断光谱仪(CDS)采用了掠入射式的前置望远系统和正入射光栅与掠入射光栅两种不同的光栅工作结构,互相配合实现了15~80 nm的波长覆盖,但多个掠入射结构的使用使其仅具有最高6"的空间分辨率,无法实现对日冕精细结构的探测,所采用的掠入射光栅工作方式存在着宽波段像散校正能力不足的问题,从而限制了该通道的光谱分辨率(0.03 nm)^[14];太阳紫外辐射测量仪(SUMMER)的工作波段在50~160 nm,其缺少对日冕极紫外短波(10~40 nm)发射谱线的诊断观测^[15]。1989—1997年期间,美国在十几次发射的探空火箭上都搭载了太阳极紫外火箭望远镜及光谱仪(SERTS)系列载荷,SERTS系列仪器均采用掠入射式望远结构搭配正入射式超环面等线距光栅,工作波长都在17~45 nm光谱范围内,与CDS相似,受到前置掠入射望远结构的限制,空间分辨率仅为6",由于探空火箭飞行时间的限制(10~15 min),无法实现对太阳极紫外光谱的可持续性观测。2001年,俄罗斯发射的复杂近地轨道太阳活动观测台F星(KORONAS-F)上搭载的日冕高能分辨光谱仪(RES),工作波段为17.6~20.7 nm和28~33 nm,其采用了掠入射平面光栅主镜搭配正入射球面反射次镜的无狭缝式光谱成像结构,尽管实现了高的光谱分辨率,但由于受到光谱像压缩的影响,其色散方向上的空间分辨率仅具有100"的量级^[16]。2006年,美日合作的日出(Hinode)卫星上搭载的极紫外成像光谱仪(EIS),工作波段为17~21 nm和25~29 nm,其缺少对太阳色球和过渡区谱线的观测诊断^[17]。2006—2021年,美国在四次发射的探空火箭上都搭载了极紫外正入射成像光谱仪(EUNIS),仪器的工作波长均位于9.0~63.5 nm波段范围内,EUNIS系列仪器均由两台独立且具有相同指向目标的成像光谱仪构成来分别实现两个极紫外波段的同时成像观测^[18],其增加了系统总体研制成本的同时,仪器的空间分辨率(3"~4")有待提高。2020年,美国和欧洲合作发射的太阳轨道者号(SOLO)飞行器上搭载了日冕环境光谱成像仪(SPICE),工作波段为70.4~79.0 nm和97.3~104.9 nm,其缺少针对日冕极紫外短波的探测^[19]。

国际上过去发射的以及现有在轨运行的太阳极紫

外光谱成像仪器只能针对日冕、过渡区和色球中的一个或两个目标区域进行诊断观测,无法实现对整个太阳上层大气的探测。比如S082A、CDS和EUNIS缺少对色球的诊断观测;SERTS、RES和EIS缺少对色球和过渡区的诊断观测;SUMER和SPICE则无法实现对高温日冕的诊断观测等。鉴于此,为了获取对太阳日冕、过渡区和色球的超宽温度范围的同时诊断观测,本文提出并设计了一款高分辨率狭缝式成像光谱仪,工作在17~21 nm、70~80 nm和95~105 nm三个波段,基于非罗兰圆结构的像差校正理论,采用椭球面变线距(EVLS)光栅设计,光线追迹的谱线成像结果表明,系统各个波段的空间分辨率均优于0.6",17~21 nm波段的光谱分辨率优于0.006 nm,70~80 nm和95~105 nm波段的光谱分辨率优于0.008 nm。由于我国目前尚没有在轨运行的太阳极紫外光谱仪载荷,因此本文研究对我国未来的太阳极紫外光谱仪发展及型号研制具有重要的理论意义,对于我国未来的太阳空间探测计划中的极紫外载荷遴选,如“太阳爆发抵近探测^[20]”“太阳立体观测^[21-23]”“环日全景探测任务^[24-25]”“太阳极轨天文台^[26]”等具有重要的参考价值。

2 仪器总体概述

2.1 仪器科学目标

本文所设计的太阳极紫外三波段成像光谱仪的科学目标是,通过同时获取日冕、过渡区和色球的超宽温度覆盖和更全面的等离子体谱线信息,进而研究从光球到日冕的磁场能量储存及爆发式释放的物理过程,研究色球和日冕的加热机制,研究太阳的爆发活动现象如日冕物质抛射和耀斑的演变机制,研究太阳风的形成及加速机制。测量在不同大气区域观测到的整个空间、光谱和时间范围内的物质及能量释放过程,为空间天气预报及预警提供精准的原始科学数据。

2.2 仪器技术指标

明确系统的初始输入参数和相关的技术要求,是在仪器设计时必须考量的要素。仪器首先应具备同时对日冕、过渡区和色球的重要等离子体谱线的诊断能力,温度覆盖范围能够达到 $10^4\sim 10^7$ K,针对日冕区域,选择光谱诊断范围为17~21 nm,其中包含Fe IX-XXIV、Ca XIV-XVII、O IV-V等重要日冕极紫外发射谱线;针对过渡区域,选择光谱诊断范围为70~80 nm,包含S V、O IV-V、Ne VIII、Mg VIII、Fe XX等重要离子谱线;针对色球区域,选择光谱诊断范围为95~105 nm,包含H I、C II-III、O VI、Ne VI、Si VII、Fe X、Fe XVIII等重要离子谱线。为了实现对小尺度太阳爆发活动及其精细结构的准确观测,根据太阳动力学天文台(SDO)卫星^[27]上的大气成像组件^[28](AIA)望远镜的观测结果,所设计的仪器应具有约1"的空间分辨率;考虑各个波段谱线差异,对于17~21 nm的短波段(SW),仪器的光谱分辨率应该优于0.006 nm,对于70~80 nm和95~

105 nm 的长波段(LW),参考 SPICE 仪器的设计^[19],仪器的光谱分辨率应优于 0.01 nm。受到地球大气层的影响,极紫外波段的观测需要在地球大气层外进行,基

于卫星平台的观测应用,仪器结构设计应该尽量紧凑。仪器相关的技术指标需求如表 1 所示。

表 1 成像光谱仪的技术指标

Table 1 Specifications for imaging spectrometer

Performance parameter	Design value
Wavelength region /nm	SW: 17-21, LW: 70-80 and 95-105
Temperature coverage /K	10^4-10^7
Spectral resolution /nm	$\leq 0.006 @SW, \leq 0.01 @LW$
Spatial resolution /(")	≤ 1.0
Slit length /(")	≥ 300
Raster coverage /(")	300
Pixel size / μm	13.5 @SW, 20 @LW
Optical volume /(mm \times mm \times mm)	$\leq 1800 \times 400 \times 100$

2.3 仪器光学架构

狭缝式成像光谱仪利用窄狭缝来限制视场,采用凹面光栅和平场二维探测器,通过狭缝扫描实现对于二维区域的高空间分辨率和高光谱分辨率成像,本文将光谱仪获取的信息理解为一个包含观测目标二维空间信息的 $I(x, y)$ 和光谱信息 $I(\lambda)$ 的集合三维立方体数据 $I(x, y, \lambda)$,本文设计的太阳极紫外三波段成像光谱仪的仪器原理和光学组成如图 1 所示。仪器光轴指向二维日面的目标观测区域,区域内的极紫外发射谱线经过前置离轴望远镜的反射后在望远系统的聚焦平面上成一次像,狭缝作为后置凹面光栅分光系统的入

射孔径,位于望远系统的焦面上,窄狭缝利用瞬时视场(IFOV)对二维的一次像进行采样,被采样的发散光束照明非罗兰圆结构下的椭球面变线距光栅,经过光栅同时地分光色散和聚焦成像,最终不同波段的极紫外谱线分别在三个传感器上成二次像。狭缝对 y 方向视场的限制使得不同波长(λ_1, λ_2)的狭缝像在聚焦成像面上得以分开, λ_1, λ_2 谱线的高斯强度分布如图 1 所示,这样单次曝光可以获得一维方向上的高光谱分辨信息 $I(x, \lambda)$ 。为了获取二维日面的三维立方体数据 $I(x, y, \lambda)$,窄狭缝需要沿 y 方向进行一个步进扫描过程,经过连续的曝光后可以重建获得 $I(x, y, \lambda)$ 。

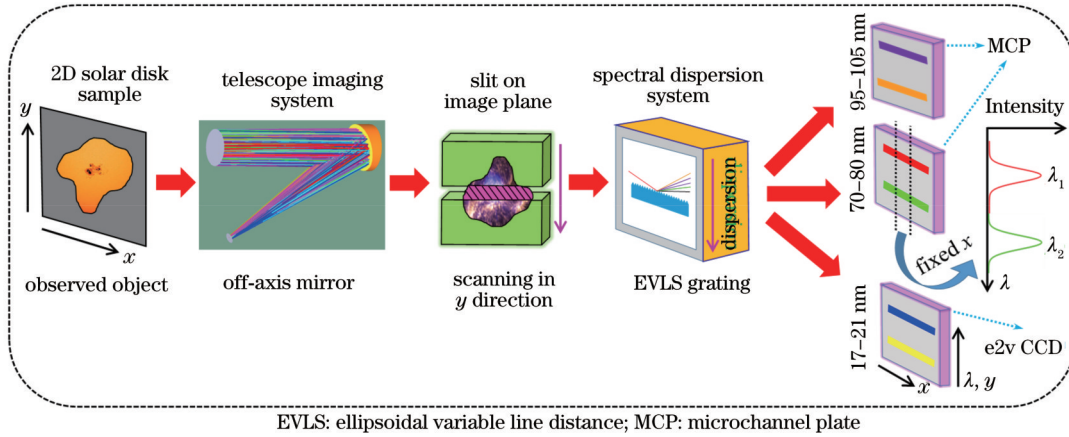


图 1 太阳极紫外三波段成像光谱仪工作原理

Fig. 1 Operating principle of solar EUV three-waveband imaging spectrometer

3 仪器设计理论

3.1 EVLS 光栅像差解析

三个面型参数的 EVLS 光栅^[29]具有先天性的宽波段消像散光栅像差校正能力。因此,选择 EVLS 光栅作为仪器的光谱色散元件。EVLS 光栅原理如图 2 所示,定义与光栅刻线平行的方向为 Z 轴,与光栅刻线垂直的方向为 Y 轴,光栅表面法线的方向为 X 轴。以光

栅顶点 O 为原点建立笛卡儿坐标系,狭缝长边方向与 Z 轴平行。经过入射狭缝上的任意一点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 的发散光束照射到 EVLS 光栅表面,定义点 $P(x, y, z)$ 是光栅表面的任意一点,入射光线 AO 和 AP 经过光栅表面衍射后成像于点 $B(x_b, y_b, z_b)$ 。点 A 和点 B 在 XOY 平面上的投影位置分别为 $A_0(x_a, y_a, 0)$ 和 $B_0(x_b, y_b, 0)$,可知 A_0 经光栅衍射后成像在 B_0 ,光栅的入射臂长 $|OA_0|=r_A, A_0O$ 与 X 轴的夹角 i 为光栅的入射

角;光栅的出射臂长 $|OB_0|=r_B$, B_0O 与 X 轴的夹角 θ 为光栅的衍射角。

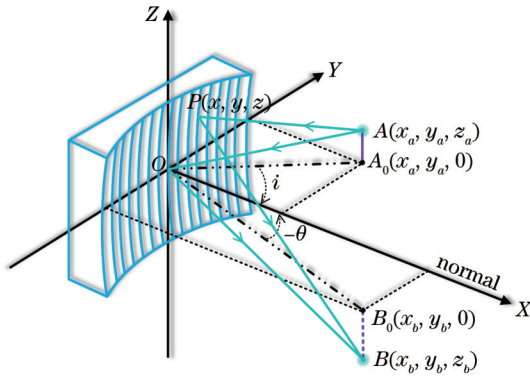


图2 EVLS光栅原理图

Fig. 2 Schematic of EVLS grating

点 $P(x, y, z)$ 位于EVLS光栅表面上,其满足如下的椭球面方程:

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (1)$$

式中, a 、 b 和 c 分别为光栅椭球面在 X 、 Y 和 Z 方向上的半轴长度,将 x 展开为 y 和 z 的泰勒级数,获得如下的矢高形式表征的表面方程:

$$x = \frac{a}{2} \left[\left(\frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) + \frac{1}{2^2} \left(\frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right)^2 + \frac{1}{2^3} \left(\frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right)^3 + \dots \right]. \quad (2)$$

EVLS光栅的刻线密度沿 Y 轴变化,用多项式来定义从 O 点到 P 点的刻线总数 $N(y)$,

$$N(y) =$$

$$\left[y + \frac{a}{b^2} \psi_2 y^2 + \left(\frac{a}{b^2} \right)^2 \psi_3 y^3 + \left(\frac{a}{b^2} \right)^3 \psi_4 y^4 + \dots \right] / d_0, \quad (3)$$

式中: d_0 为光栅原点 O 处的刻线间距; $\psi_2, \psi_3, \psi_4, \dots$ 为刻线密度多项式的空间变化参数。

根据费马原理,对于一个光学系统,从物点到像点的光线路径必须是在所有可能的路径中光程最短的路径,光线 AOB 与光线 APB 的光程函数应满足如下方程:

$$F = \langle AO \rangle + \langle OB \rangle = \langle AP \rangle + \langle PB \rangle + N(y) \cdot m\lambda, \quad (4)$$

式中: m 是衍射级次; λ 是衍射波长。将式(4)中的 A 、 O 、 P 、 B 各点坐标代入可得

$$\begin{cases} F(y, z) = r_A + r_B + \sum_{j,k} y^j z^k F_{jk} \\ F_{jk} = C_{jk} + (m\lambda/d_0) M_{jk} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: j 和 k 不同时为零; F_{jk} 的每一项对应EVLS光栅的一个像差,包括基本像差(像散和离轴离焦)和高阶像差(彗差、场曲和球差); C_{jk} 项与光栅基底面型以及工作结构的参数相关; M_{jk} 项与光栅刻线的空间变化参数相关。

F_{01} 和 F_{10} 与光栅基本方程相关, F_{01} 决定了EVLS光栅的横向放大率:

$$F_{01} = -\frac{1}{\sqrt{1+r_A^2/z_a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+r_B^2/z_b^2}}; \quad (6)$$

F_{10} 决定了EVLS光栅工作在离轴条件下的光栅基本方程:

$$F_{10} = -\frac{\sin i}{\sqrt{1+z_a^2/r_A^2}} - \frac{\sin \theta}{\sqrt{1+z_b^2/r_B^2}} + m\lambda/d_0; \quad (7)$$

F_{20} 对应了光栅的子午像散,可以用于衡量光栅在色散平面上的光谱离焦性能:

$$F_{20} = \frac{1}{2} \left[\frac{\cos^2 i}{r_A} + \frac{\cos^2 \theta}{r_B} - \frac{a(\cos i + \cos \theta)}{b} \right] + \frac{z_a^2}{2r_A^2} \left(\frac{\sin^2 i}{r_A} - \frac{\cos^2 i}{2r_A} + \frac{a \cos i}{2b^2} \right) + \frac{z_b^2}{2r_B^2} \left(\frac{\sin^2 \theta}{r_B} - \frac{\cos^2 \theta}{2r_B} + \frac{a \cos \theta}{2b^2} \right) + \psi_2 \left(\frac{a}{b^2} \right) m\lambda/d_0; \quad (8)$$

F_{02} 对应了光栅的弧矢像散,可以用于衡量光栅在垂直色散平面上的空间离焦性能:

$$F_{02} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{a(\cos i + \cos \theta)}{c^2} \right] - \frac{z_a^2}{4r_A^2} \left(\frac{3}{r_A} - \frac{a \cos i}{c^2} \right) - \frac{z_b^2}{4r_B^2} \left(\frac{3}{r_B} - \frac{a \cos \theta}{c^2} \right); \quad (9)$$

F_{11} 对应了光栅的离轴像差,可以用于表征光栅在空间和光谱方向上的离轴离焦性能:

$$F_{11} = -\frac{z_a}{r_A^2} \sin i - \frac{z_b}{r_B^2} \sin \theta. \quad (10)$$

3.2 EVLS光栅像差校正条件

根据费马原理,当图2中的像点 B 为理想成像时,

对于任意的位于EVLS光栅表面上的 $P(x, y, z)$,其光程函数 $F(y, z)$ 存在极值,即满足如下条件:

$$\begin{cases} \partial F(y, z) / \partial y = 0 \\ \partial F(y, z) / \partial z = 0 \end{cases} \quad (11)$$

若要使式(11)成立,需要对于任意的 j 和 k 满足 $F_{jk}=0$,即光栅的所有像差系数均为零,以保证系统成像质量。

对于任意的 y 和 z ,满足 $F_{01}=0$ 成立时,可以得到光栅的横向放大率公式:

$$\beta = \frac{r_B}{r_A} = -\frac{z_b}{z_a}; \quad (12)$$

满足 $F_{10}=0$ 成立时,可以获得离轴条件下的基本光栅

方程:

$$d_0(\sin i + \sin \theta) \left(1 + \frac{z_a^2}{r_A^2}\right)^{-1/2} = m\lambda; \quad (13)$$

满足 $F_{11}=0$ 成立时,可以校正光栅的离轴离焦像差,

$$\frac{\sin \theta}{\sin i} = -\frac{z_a}{z_b} \left(r_B/r_A\right)^2. \quad (14)$$

将式(12)代入式(14),可以得到校正离轴像差的条件:

$$\frac{\sin \theta}{\sin i} = \frac{r_B}{r_A} = \beta \neq 1. \quad (15)$$

对于工作在罗兰圆结构下的凹面光栅,辐射点光源 S 和消像散成像点均位于罗兰圆周上,这样的光栅具有单位的横向放大率,即满足 $\beta=1$,此时的衍射光线会沿着入射光束返回,探测器的位置会阻挡入射光线,单位放大率的罗兰圆结构无法满足离轴像差的校正条件。而本文采用的 EVLS 光栅工作在非罗兰圆结构下,当设计满足式(15)时,可以实现光栅离轴像差的校正。

满足 $F_{20}=0$ 成立时,可以校正光栅的子午像散,考虑到 $z_a \ll r_A$, $z_b \ll r_B$,可以忽略 z_a/r_A 和 z_b/r_B 的二阶小量,得到轴上点的光谱聚焦曲线:

$$\frac{\cos^2 i}{r_A} + \frac{\cos^2 \theta}{r_B} - \frac{a(\cos i + \cos \theta)}{b} + 2\psi_2 \left(\frac{a}{b^2}\right) m\lambda/d_0 = 0. \quad (16)$$

同理,满足 $F_{02}=0$ 成立时,可以校正光栅的弧矢像散,从而得到轴上点的空间聚焦曲线:

$$\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{a(\cos i + \cos \theta)}{c^2} = 0. \quad (17)$$

通过对 EVLS 光栅的椭球面基底面型参数、变线距刻线密度参数以及其结构参数进行优化,综合考虑光栅的光谱聚焦曲线公式(16)和空间聚焦曲线公式(17),获取系统的初始结构,然后使用光学设计软件 ZEMAX 对光谱仪系统的各阶像差进行进一步优化,最终获取系统的最优结构,实现宽波段、高光谱分辨率和高空间分辨率的消像散光谱成像。

4 光线追迹和设计结果

4.1 系统参数约束

为了保证光线追迹过程中的设计精度和收敛速度,本文使用模拟退火算法和计算机辅助设计进行全局最优求解。式(15)~(17)分别约束控制 EVLS 光栅的离轴像差、子午像散和弧矢像散,以实现目标光谱范围内的像散校正。系统分辨率作为优化约束条件,将进一步限制系统的结构,仪器的空间和光谱分辨率技术指标要求如表 1 所示。对于极紫外狭缝式成像光谱仪,系统的光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 主要受到 EVLS 光栅参数和狭缝参数的影响,系统沿狭缝方向的像元空间分辨率 δ 则由前置望远镜和 EVLS 光栅共同决定,如下式

所示:

$$\begin{cases} \Delta\lambda = \frac{d_0 \cos \theta \cos \gamma}{\beta m r_A} \times \max(\rho x, \beta s) \\ \delta = \frac{\rho x}{\beta \sqrt{R_T^2 + 4\Delta^2}} \times \frac{12.96}{\pi} \times 10^5 \end{cases}, \quad (18)$$

式中: d_0 为光栅顶点处的刻线宽度; θ 为光线衍射角度; γ 是在色散平面内衍射光线在探测器上的入射角度; β 为 EVLS 光栅的横向放大率; m 为光栅衍射级次; r_A 为光栅入射臂长; ρx 是探测器的像素尺寸; s 是入射狭缝的宽度; R_T 为前置离轴望远镜的曲率半径; Δ 为离轴量。

4.2 模型构建结果

图 3 为经过 ZEMAX 最终优化后得到的光学系统布局图。仪器由离轴抛物望远主镜、EVLS 光栅次镜、入射狭缝装置和三个用于不同波段(17~21 nm、70~80 nm 和 95~105 nm)的极紫外探测器组成。太阳极紫外光线经过前置离轴抛物望远主镜在望远镜焦平面成一次实像,位于望远镜焦平面位置的狭缝通过 IFOV 获取一次实像的一部分后经过 EVLS 光栅色散,三个波段的狭缝像最终分别成像于对应的三个探测器上。每个探测器分别对应 17~21 nm、70~80 nm 和 95~105 nm 消像散波段,17~21 nm 波段的探测器采用 e2v 技术研制的背照式减薄型电荷耦合器件 (CCD),与 EIS 极紫外成像光谱仪相同^[17],70~80 nm 和 95~105 nm 波段的探测器,采用带有微通道板 (MCP) 增强的有源像素传感器件 (APS),与 SPICE 成像光谱仪相同^[30]。为了提高正入射下极紫外的反射效率,综合考虑三个波段的反射特性及膜层加工难度,前置望远主镜与 EVLS 光栅表面采用厚度为 15 nm B_4C 覆盖于顶层的 Mo/Si 周期性多层膜,17~21 nm^[31] 和 35~110 nm^[8,31-33] 的膜层反射率如图 4 所示,反射效率在 19.3 nm 波长处可达 0.14,在 78.0 nm 处可达 0.31,在 97.7 nm 处可达 0.34^[8,34]。

太阳极紫外三波段成像光谱仪最终的设计指标及元件参数如表 2 所示。成像光谱仪系统实现了极紫外短波段(17~21 nm)光谱分辨率优于 0.006 nm 以及长波段(70~80 nm 和 95~105 nm)光谱分辨率优于 0.008 nm 的设计,仪器像元空间分辨率优于 0.6"。成像光谱仪系统总焦距长 7000 mm,整个仪器具有 1700 mm × 370 mm × 100 mm 的光学包络体积,均满足表 1 的技术指标要求。前置望远成像系统采用入射口径为 100 mm、离轴量为 75 mm 的抛物面单反镜,以实现在狭缝一次像面上的清晰成像;狭缝装置采用具有不同宽度的 5 种狭缝,不同宽度的狭缝通过线性平移进行切换,以适应具有不同空间和时间尺度太阳爆发活动的快速光谱成像,狭缝宽度分别为 0.4"、0.6"、1.2"、2.4" 和 5",狭缝的长度均为 576",沿色散方向的扫描视场为 ±150",因此通过望远主镜的步进旋转可

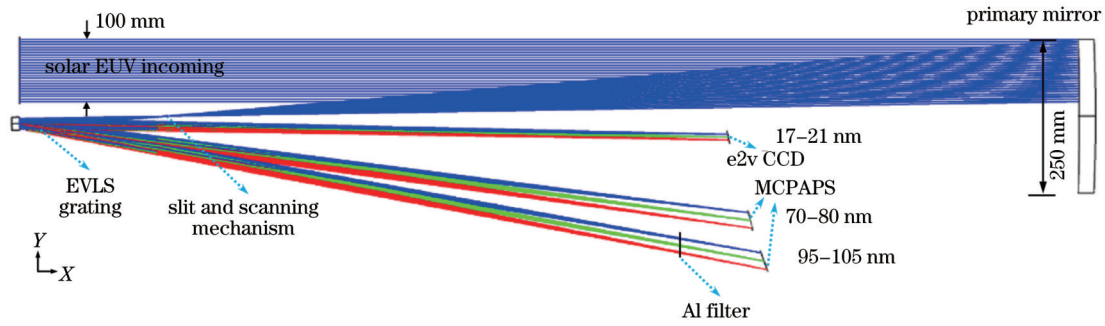


图 3 太阳极紫外三波段成像光谱仪光路布局图

Fig. 3 Optical layout of solar EUV three-waveband imaging spectrometer

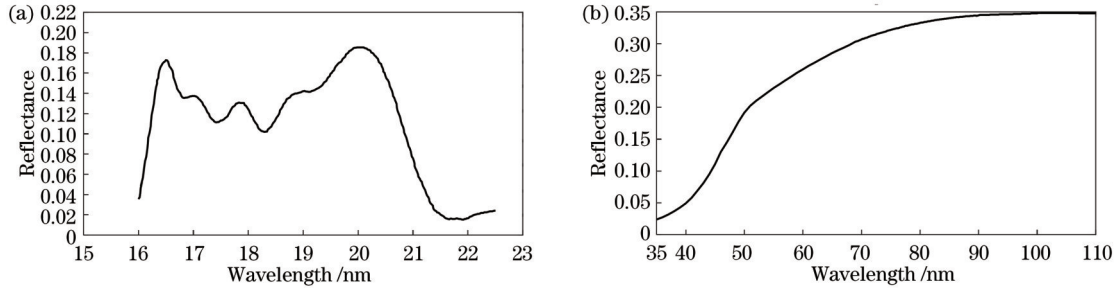


图 4 15 nm 厚的 B_4C 覆盖于顶层的 Mo/Si 周期性多层膜在极紫外波段的反射率。(a) 17~21 nm; (b) 35~110 nm

Fig. 4 Reflectance of Mo/Si periodic multilayer film with 15 nm thickness of B_4C coating on top in EUV band. (a) 17~21 nm; (b) 35~110 nm

对视场为 $9.6' \times 5.0'$ 的二维日面实现高分辨率光谱成像; 仪器分光系统采用 EVLS 光栅元件, 工作在 +1 衍射级次下, 具有 4.78 倍的横向放大率, 椭球面基底的参数 $a=715.821$ mm, $b=529.293$ mm, $c=529.590$ mm, 光栅基底的椭球面矢高图如图 5(a) 所示, 光栅中心处的刻线密度为 2000 line/mm, 色散方向的刻线区域为 ± 10.5 mm, 光栅的刻线密度在 1995~2005 line/mm 的范围内沿色散方向线性变化, 如图 5(b) 所示; 17~21 nm 采用的 CCD, 量子效率为 25%~40%^[17], 像元尺寸为 13.5 μm , 像素数为 1536×1024 , 其与竖直面 (图 3 中的 YOZ 面) 的倾斜角度为 10.942° , 70~80 nm 和 95~105 nm 采用的 APS 探测器, 量子效率为 10%~20%^[19], 等效像元尺寸为 20 μm , 像素数为 1536×1536 , 70~80 nm 波段对应的

探测器与竖直面的倾斜角度为 16.847° , 95~105 nm 波段对应的探测器与竖直面的倾斜角度为 19.580° 。

对于光栅的二级次衍射, 35~40 nm 理论成像位置与 70~80 nm 波段的一级次成像位置重合, 由于多层膜的抑制效果, 如图 4(b) 所示, 35~40 nm 的反射率低于 5%, 二阶光谱数据被抑制, 可以直接获取 70~80 nm 的一阶光谱数据。47.5~52.5 nm 理论成像位置与 95~105 nm 波段的一级次成像位置重合, 根据图 4(b), 47.5~52.5 nm 的反射率在 15%~21% 之间, 二阶光谱数据会被影响, 通过采用 100 nm 厚度的透射式 Al 滤光片^[35]实现一阶和二阶光谱的切换成像, 当 Al 滤光片位于 95~105 nm 波段成像的光路中时 (如图 3 所示), 仪器可以直接获得 47.5~52.5 nm 的二阶光谱数据; 当 Al 滤光片从光路中被移除时, 仪器可以获得一

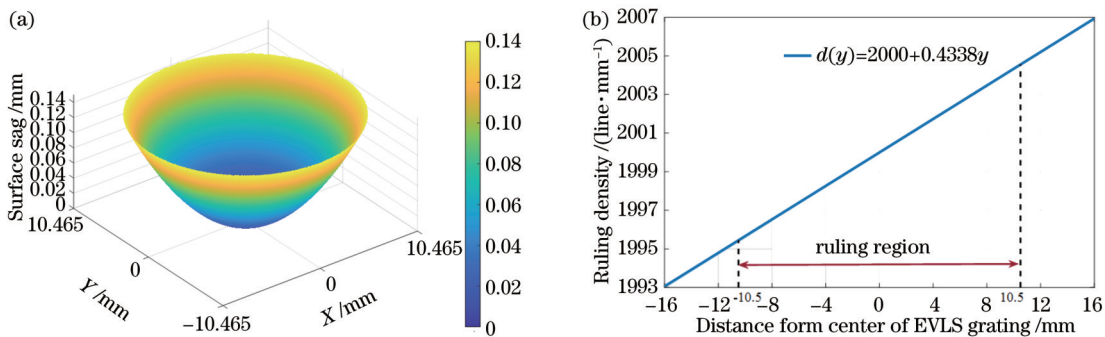


图 5 EVLS 光栅。(a) 基底表面矢高图; (b) 刻线密度分布曲线图

Fig. 5 EVLS grating. (a) Substrate surface sag map; (b) curve of ruling density distribution

表 2 太阳极紫外三波段成像光谱仪的设计指标和光学元件参数

Table 2 Specifications and optical element parameters of solar EUV three-waveband imaging spectrometer

Instrument system parameter design	
Spectral resolution @17~21 nm /nm	0.0058
Spectral resolution @70~80 nm /nm	0.0077
Spectral resolution @95~105 nm /nm	0.0071
Spatial resolution @SW /(")	0.40
Spatial resolution @LW /(")	0.589
Optical volume / (mm×mm×mm)	1700×370×100
Telescope design	
Entrance aperture /mm	100
R_T /mm	2926.811
Conic	-1
Δ /mm	75
f_T /mm	1465.326
Slit design	
Slit width /(")	0.4, 0.6, 1.2, 2.4, 5
Slit length /(")	576
Raster coverage /(")	±150
EVLS grating design	
m	+1
d_0 / μm	0.5
i /($^\circ$)	0.899
r_A /mm	236.595
β	4.78×
a /mm	715.821
b /mm	529.293
c /mm	529.590
ϕ_2 /mm ⁻²	4.244×10 ⁻²
Ruling area / (mm×mm)	21×21
Groove density / (line·mm ⁻¹)	2000+0.4338y
Three independent detectors design	
Wavelength band	Tilt angle /($^\circ$)
17~21 nm	10.942
70~80 nm	16.847
95~105 nm	19.580

阶和二阶的混叠数据,通过数据相减可以提取出一阶光谱数据。

5 光谱成像质量评价

5.1 光谱成像聚焦性能

由于受到光学系统像差以及入射口径衍射的影响,物空间的理想点源经过成像聚焦和光谱分光后在像面上的成像不再是一个理想的点,而是一个扩散的弥散斑。极紫外成像光谱仪系统采用 EVLS 光栅作为分光元件,其在空间和光谱方向上的聚焦性能不同,当

空间聚焦曲线和光谱聚焦曲线完全重合时,得以实现理想情况下的消像散聚焦成像。由于 EVLS 光栅工作在非罗兰圆结构下仅仅具有两个消像散波长点,因此要在整个目标光谱区域内实现完全的消像散光谱成像实际上是无法做到的,但可以控制光谱成像聚焦的性能在允许的像差范围内。

特定的离轴视场下,通过光线追迹可以获得像面上不同光谱的聚焦弥散斑,其在空间和光谱方向上的均方根(RMS)半径大小可以衡量光谱仪系统在整个目标光谱区域内的像散像差的校正情况。17~21 nm、70~80 nm 和 95~105 nm 三个波段的指定离轴视场(FOV)(轴上点、±2.4' 和 ±4.8')下像面聚焦弥散斑在空间和光谱方向上的 RMS 半径大小随波长的变化曲线分别如图 6(a)~6(c)所示,从曲线中可以看出:17~21 nm 在空间和光谱方向上的弥散斑 RMS 半径随着波长的增大而缓慢减小,从 5.4 μm 缓慢减小到 3.6 μm ;70~80 nm 在光谱方向上的弥散斑 RMS 半径随着波长的增大而缓慢减小,在空间方向上的弥散斑 RMS 半径受波长变化的影响较小;95~105 nm 在空间和光谱方向上的弥散斑 RMS 半径随着波长的增大而缓慢增大。总体来说,17~21 nm 的弥散斑 RMS 半径小于 6 μm ,70~80 nm 的弥散斑 RMS 半径小于 11 μm ,95~105 nm 的弥散斑 RMS 半径小于 12 μm ,光谱仪实现了较好的像散校正。

三个波段的指定成像光谱下像面聚焦弥散斑在空间和光谱方向上的 RMS 半径大小随狭缝长度方向离轴视的变化曲线分别如图 6(d)~6(f)所示,从曲线中可以看出:对于任意的成像波长,空间和光谱方向上的弥散斑 RMS 半径受到离轴视场的影响较小,整体随着离轴视场的增加弥散斑 RMS 半径变化平稳,说明光谱仪的离轴像差得到了非常好的校正。

仪器在三个中心波长(19、75、100 nm)处的调制传递函数(MTF)曲线分别如图 7(a)~7(c)所示,从曲线中可以看出,17~21 nm 在奈奎斯特空间频率(37 lp/mm)下的光谱衍射成像在子午和弧矢方向的 MTF 值均大于 0.6,70~80 nm 和 95~105 nm 在奈奎斯特空间频率(25 lp/mm)下的光谱衍射成像在子午和弧矢方向的 MTF 值均大于 0.4,均接近衍射极限,表明仪器系统具有良好的光谱成像性能。

仪器在三个中心波长(19、75、100 nm)处的全视场像散像差分布图如图 8(a)~8(c)所示,从图中可以看出,19 nm 处的像散最大值为 0.481 λ ,75 nm 处的像散最大值为 0.391 λ ,100 nm 处的像散最大值为 0.291 λ ,在扫描视场范围内整个目标波段的像散基本实现理想的像散校正。

仪器在三个中心波长(19、75、100 nm)的线扩散函数图如图 9(a)~9(c)所示,从图中可以看出:19 nm 处的线扩散函数轴上半峰全宽(FWHM)为 2 μm ,边缘视场 FWHM 为 3.8 μm ,小于像元尺寸 10 μm ;

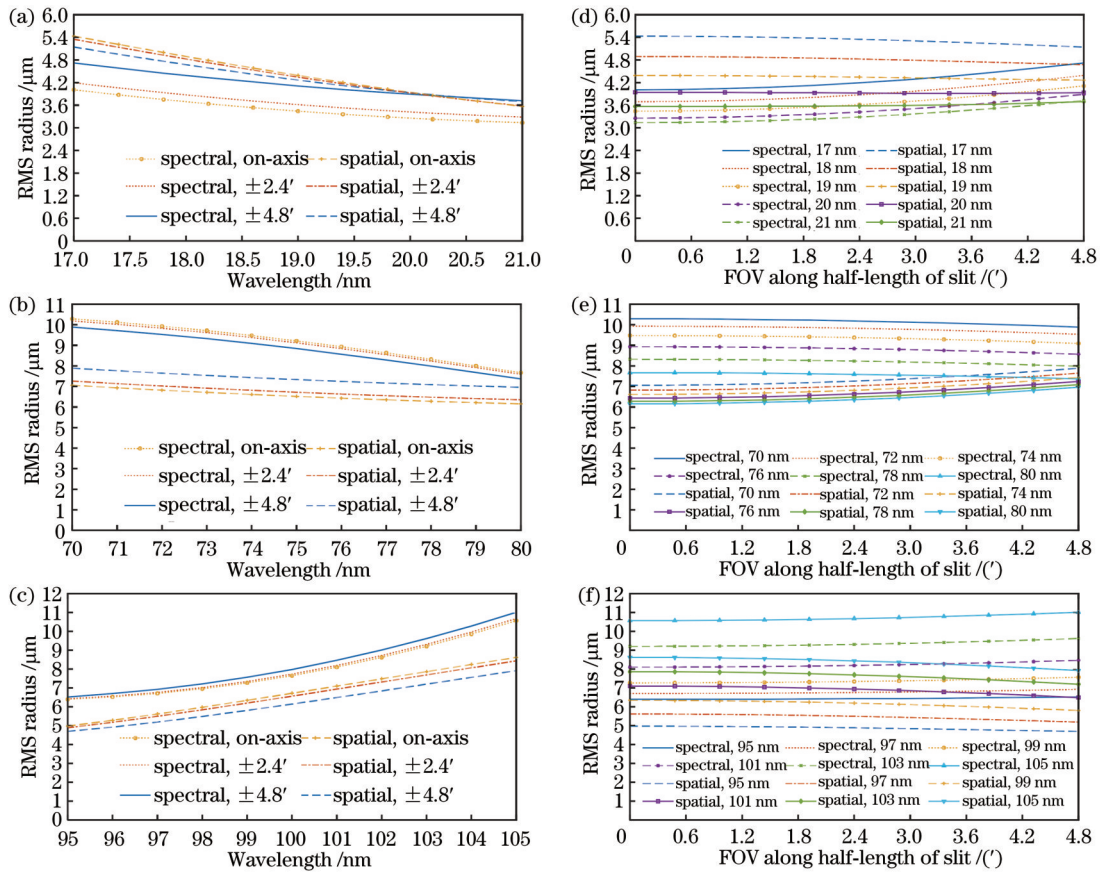


图 6 太阳极紫外三波段成像光谱仪像面上聚焦成像性能评估。(a) 17~21 nm 波段 RMS 半径随波长的变化曲线图；(b) 70~80 nm 波段 RMS 半径随波长的变化曲线图；(c) 95~105 nm 波段 RMS 半径随波长的变化曲线图；(d) 17~21 nm 波段 RMS 半径随离轴视场的变化曲线图；(e) 70~80 nm 波段 RMS 半径随离轴视场的变化曲线图；(f) 95~105 nm 波段 RMS 半径随离轴视场的变化曲线图

Fig. 6 Focusing imaging performance evaluation of solar EUV three-waveband imaging spectrometer on image plane. (a) Curves of RMS radius with wavelength in 17-21 nm band; (b) curves of RMS radius with wavelength in 70-80 nm band; (c) curves of RMS radius with wavelength in 95-105 nm band; (d) curves of RMS radius with off-axis field of view in 17-21 nm band; (e) curves of RMS radius with off-axis field of view in 70-80 nm band; (f) curves of RMS radius with off-axis field of view in 95-105 nm band

75 nm 处的线扩散函数轴上 FWHM 为 $9 \mu\text{m}$, 边缘视场 FWHM 为 $15.8 \mu\text{m}$, 小于像元尺寸 $20 \mu\text{m}$; 100 nm 处的线扩散函数轴上 FWHM 为 $8.4 \mu\text{m}$, 边缘视场 FWHM 为 $17.8 \mu\text{m}$, 小于像元尺寸 $20 \mu\text{m}$ 。

5.2 空间和光谱分辨率

极紫外成像光谱仪的光线追迹表明, 在 $\pm 4.8'$ 的离轴视场下, 17~21 nm 的像面成像的弥散斑 RMS 直径均小于 $13.5 \mu\text{m}$ 的像元尺寸, 70~80 nm 和 95~105 nm 的像面成像的弥散斑 RMS 直径基本小于 $20 \mu\text{m}$ 的像元尺寸, 因此系统的空间角分辨率受限于像元尺寸, 利用式(18)理论计算得到的系统像元空间分辨率为 $0.6''$ 。像面光谱的弥散斑在一个方形像素 ($13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$ @SW, $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ @LW) 内被圈入的能量分数能否达到 80% 是衡量成像光谱仪系统空间角分辨率的重要指标。图 10 (a) 为极紫外成像光谱仪在波长 19 nm 处的圈入能量曲线, 在距离弥散斑质心为 $6.75 \mu\text{m}$ 的半宽距离内, 圈入的能量分数

为 82.5%; 图 10(b)、10(c) 为极紫外成像光谱仪在波长 75 nm 和 100 nm 处的圈入能量曲线, 在距离弥散斑质心为 $10 \mu\text{m}$ 的半宽距离内, 其圈入的能量分数分别为 80.5% 和 85.9%。因此表明成像光谱仪的空间分辨率能达到 $0.60''$ 。

利用式(18)理论计算得到的成像光谱仪在 17~21 nm 仪器短波段(SW)的光谱分辨率为 0.006 nm , 在 70~80 nm 和 95~105 nm 仪器长波段(LW)的光谱分辨率为 0.008 nm 。理论计算是没有考虑狭缝像宽度以及能量分布的, 因此为了验证仪器系统在实际的光谱成像中具有优于 $\Delta\lambda$ 的光谱分辨率, 需要利用非序列的光线追迹来对目标波段内的不同光谱线对 (λ 与 $\lambda + \Delta\lambda$) 的狭缝成像进行模拟, 进而获得像面上不同光谱线对的狭缝像光强分布, 通过光强分布进而判断成像光谱仪是否具有上述计算得到的光谱分辨率。非序列光线追迹是对具有辐射能的光线基于蒙特卡罗方法进行的随机计算模拟, 不指定光线与系统内每个物体、表

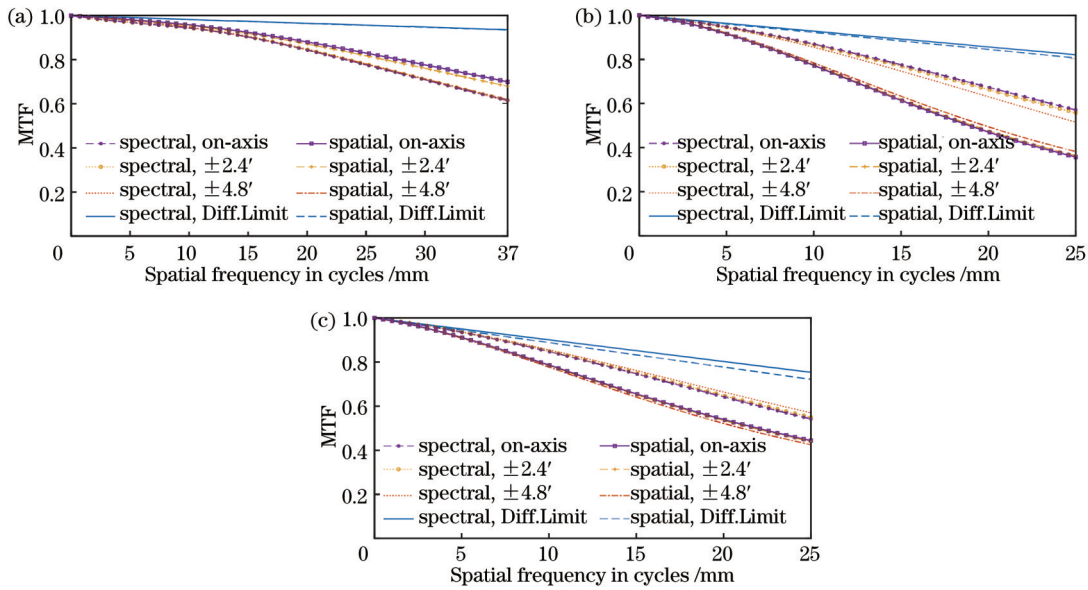


图 7 太阳极紫外三波段成像光谱仪在不同波长处的 MTF 值。(a) $\lambda=19$ nm; (b) $\lambda=75$ nm; (c) $\lambda=100$ nm
Fig. 7 MTFs of solar EUV three-waveband imaging spectrometer at different wavelengths. (a) $\lambda=19$ nm; (b) $\lambda=75$ nm; (c) $\lambda=100$ nm

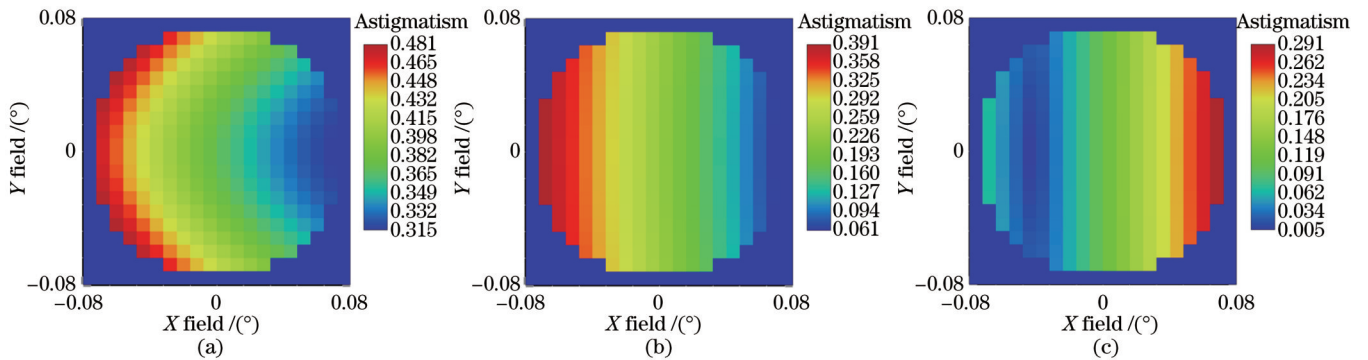


图 8 太阳极紫外三波段成像光谱仪在不同波长处的全视场像散分布图。(a) $\lambda=19$ nm; (b) $\lambda=75$ nm; (c) $\lambda=100$ nm
Fig. 8 Full-field astigmatic aberration distribution of solar EUV three-waveband imaging spectrometer at different wavelengths. (a) $\lambda=19$ nm; (b) $\lambda=75$ nm; (c) $\lambda=100$ nm

面相交的顺序及相互位置关系,光线在系统内的任意方向和空间传播,通过追踪每条光线经过各种材料和表面后所携带的辐射能量变化,进而获得狭缝像在像面上的强度分布。发射随机光线的光源采用双角光源,双角光源两个方向的宽度应覆盖成像光谱仪系统的入射孔径,两个方向的半发散角度对应前置望远镜的视场,光源能量采用归一化总功率 1 W,目标视场内追迹的随机光线条数为 1 亿条;光线追迹的光谱线对采用如下: $\lambda=17、19、21、70、75、80、95、100、105$ nm,短波段的最小光谱分辨间隔 $\Delta\lambda_{sw}=0.006$ nm,长波段的最小光谱分辨间隔 $\Delta\lambda_{lw}=0.008$ nm;狭缝大小设置为 $2.85 \mu\text{m} \times 4.10$ mm 的入射口径;虚拟探测器设置为对能量进行吸收的材质,像元尺寸和光敏面大小对应为每个波段所采用的标准探测器规格。

通过执行光线追迹模拟,探测器分别在 19、75、100 nm 三个波长上得到的不同光谱线对的狭缝像如

图 11(a)所示,图 11(b)为沿狭缝方向狭缝像的相对强度分布曲线,通过数据分析可知:狭缝像长度为 19.67 mm 与理论计算值(19.60 mm)相符合。图 11(a)中虚线框为中心狭缝像的放大图,白色矩形上的曲线为光谱线对的相对光强分布,可见每个光谱线对的狭缝像均出现了两个明显的能量峰值,19、75、100 nm 三个中心波长分别对于具有各自计算的理想光谱分辨率间隔的光谱线对的狭缝像明显分开。因此瑞利判据表明,成像光谱仪系统在 17~21 nm 波段光谱分辨率优于 0.006 nm,在 70~80 nm 和 95~105 nm 波段光谱分辨率优于 0.008 nm。

5.3 公差容限分析

将制造公差和装配公差引入到极紫外成像光谱仪系统中,分析对光谱成像性能的影响,并获取合理的公差分配。在 ZEMAX 软件中的公差编辑器中给定初始的公差范围,仿真过程中采用后焦距补偿(即探测器作

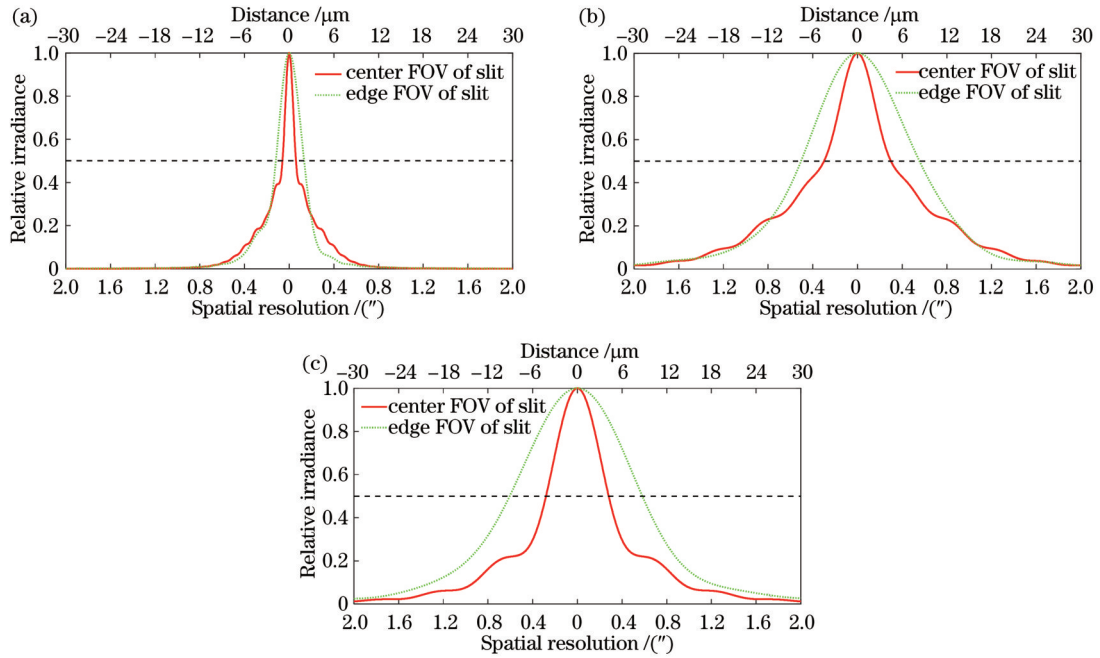


图 9 太阳极紫外三波段成像光谱仪在不同波长处的线扩散函数图。(a) $\lambda=19\text{ nm}$; (b) $\lambda=75\text{ nm}$; (c) $\lambda=100\text{ nm}$
 Fig. 9 Line spread function of solar EUV three-wavelength imaging spectrometer at different wavelengths. (a) $\lambda=19\text{ nm}$; (b) $\lambda=75\text{ nm}$; (c) $\lambda=100\text{ nm}$

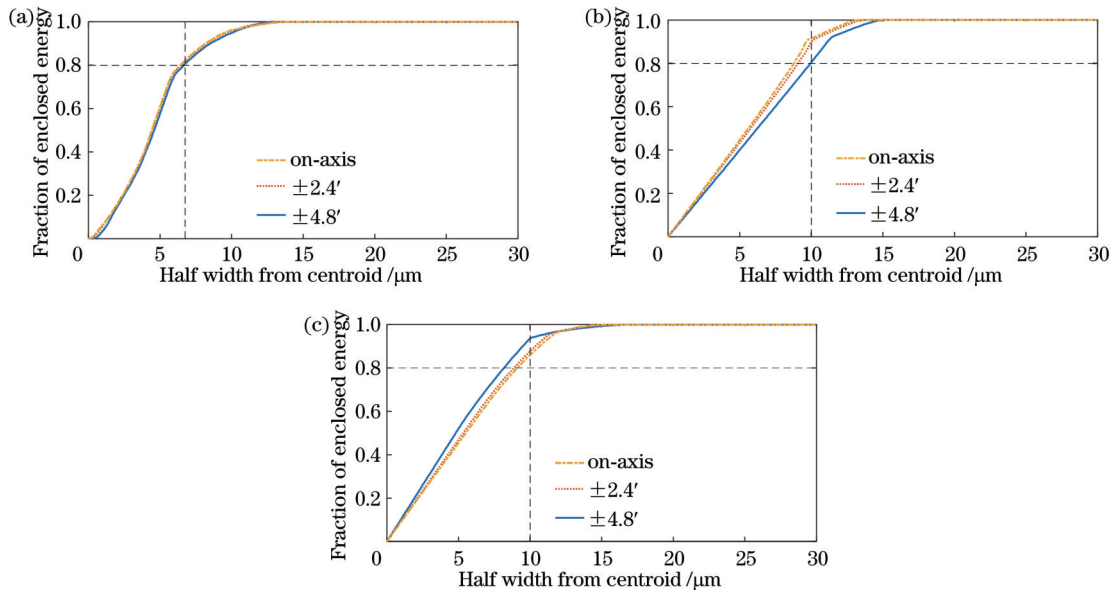


图 10 评估系统空间分辨率的衍射包围圆能量。(a) $\lambda=19\text{ nm}$; (b) $\lambda=75\text{ nm}$; (c) $\lambda=100\text{ nm}$
 Fig. 10 Diffraction enclosed energy to evaluate system's spatial resolution. (a) $\lambda=19\text{ nm}$; (b) $\lambda=75\text{ nm}$; (c) $\lambda=100\text{ nm}$

为调整元件),使用像面弥散斑 RMS 半径作为评价标准,蒙特卡罗循环次数为 500 次,通过反复迭代,最终系统关键元件的公差容限如表 3 所示。在该公差容限下,正态分布统计的结果表明,在工作波长 19、75、100 nm 处的像面弥散斑 RMS 半径有 90% 的概率在 0.5 个像元尺寸内变化,说明成像光谱仪的像质衰减在可控的范围内。

6 结 论

鉴于目前国际上无论是过去发射的还是在轨运行

的太阳极紫外成像光谱仪都只能针对太阳上层大气的一个或两个目标区域进行成像观测,本文创新性地提出一种工作在 17~21 nm、70~80 nm 和 95~105 nm 三个波段的狭缝扫描式光谱成像架构,能够对日冕、过渡区和色球区域内的重要等离子体谱线同时进行诊断观测。本文设计的成像光谱仪采用 EVLS 光栅作为衍射分光元件,为了获得消像散的光谱成像性能,利用光程函数和费马原理对非罗兰圆结构下的 EVLS 光栅像差进行了解析,并获得了校正离轴光栅像差和实现仪器消像散光谱成像的条件。基于计算机辅助设计和全

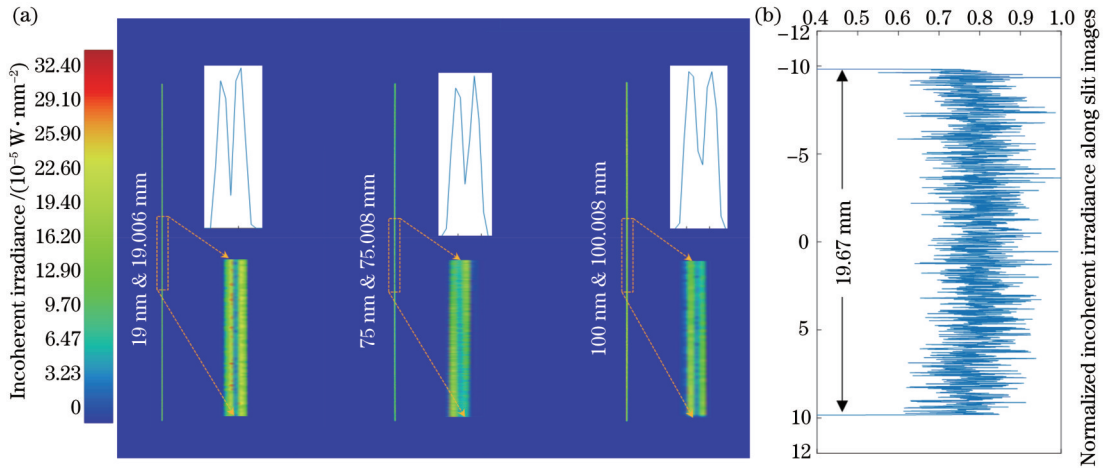


图 11 基于蒙特卡罗光线追迹方法的狭缝成像模拟。(a)不同光谱线对的狭缝像;(b)狭缝像沿狭缝长度方向的归一化能量分布
Fig. 11 Simulation of slit imaging based on Monte Carlo ray tracing method. (a) Slit images of different spectral lines; (b) normalized energy distribution along length direction of slit

表 3 太阳极紫外三波段成像光谱仪关键元件的公差分析容限参数

Table 3 Key components tolerance analysis parameters of solar EUV three-waveband imaging spectrometer

Component	Tolerance item	Value of tolerance
Primary mirror	Surface irregularity (RMS) / nm	$\lambda/25$ ($\lambda=632.8$)
	Conic	± 0.008
	Radius of curvature /mm	± 2.0
	Element decenter / μm	± 30
	Element tilt /($^{\circ}$)	± 20
EVLS grating	Surface irregularity (RMS) / nm	$\lambda/40$ ($\lambda=632.8$)
	Line density / (groove/mm)	± 1
	Radius of curvature /mm	± 0.26
	Element decenter / μm	± 20
	Element tilt /($^{\circ}$)	± 0.025
Slit	Element decenter / μm	± 20
	Element tilt /($^{\circ}$)	± 0.04

局优化,构建了太阳极紫外三波段成像光谱仪的最优模型,光线追迹的仿真结果表明,成像光谱仪的离轴光栅像差和像散均取得了良好的校正效果,系统空间分辨率优于 $0.6''$,光谱分辨率在 $17\sim 21\text{ nm}$ 波段优于 0.006 nm ,在 $70\sim 80\text{ nm}$ 和 $95\sim 105\text{ nm}$ 波段优于 0.008 nm 。本文所提出的太阳极紫外三波段成像光谱仪的先进设计能够为实现对大离轴视场下太阳爆发活动的高空间分辨、高光谱分辨和超宽温度诊断的同时成像提供原理层面的技术支撑,对我国未来的极紫外光谱仪器的发展和型号研制具有重要的理论意义和应用价值。

参 考 文 献

[1] 宋乔, 杨书红. 我们的恒星太阳: 一个巨大的物理实验室[J]. 现

代物理知识, 2018, 30(2): 56-62.
 Song Q, Yang S H. Our star Sun-a huge physics laboratory[J]. Modern Physics, 2018, 30(2): 56-62.
 [2] 杨孟飞, 代树武, 王颖, 等. 太阳空间探测进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(5): 1-10.
 Yang M F, Dai S W, Wang Y, et al. Progress and prospect of solar space exploration[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(5): 1-10.
 [3] 方成. 走进我们生活的新学科: 空间天气学[J]. 自然杂志, 2006, 28(4): 194-198, 250.
 Fang C. Space weather comes into our life[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(4): 194-198, 250.
 [4] Benz A O. Flare observations[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2008, 5(1): 1-64.
 [5] Hudson H S, Bougeret J L, Burkepile J. Coronal mass ejections: overview of observations[J]. Space Science Reviews, 2006, 123(1): 13-30.
 [6] 甘为群, 颜毅华, 黄宇. 2016—2030年我国空间太阳物理发展的若干思考[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(5): 059602.
 Gan W Q, Yan Y H, Huang Y. Prospect for space solar physics in 2016-2030[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2019, 49(5): 059602.
 [7] Dwivedi B N. EUV spectroscopy as a plasma diagnostic[J]. Space Science Reviews, 1993, 65(3): 289-316.
 [8] Teriaca L, Andretta V, Auchère F, et al. LEMUR: large European module for solar Ultraviolet Research: European contribution to JAXA's Solar-C mission[J]. Experimental Astronomy, 2012, 34(2): 273-309.
 [9] 邢阳光, 李林, 彭吉龙, 等. 具有非罗兰圆结构的太阳极紫外正入射宽波段成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2312005.
 Xing Y G, Li L, Peng J L, et al. Optical design of solar extreme ultraviolet normal-incidence broadband imaging spectrometer with non-rowland circle mounting[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2312005.
 [10] Davila J M, Oktem F S, Kamalabadi F. Slitless solar imaging spectroscopy[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2019, 883(1): 7.
 [11] 汪景琇, 季海生. 空间天气驱动源: 太阳风暴研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(6): 883-911.
 Wang J X, Ji H S. Study on the driving source of space weather-solar storm[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2013, 43(6): 883-911.
 [12] Underwood J H, Neupert W M. The GSCF EUV and X-ray spectroheliograph on OSO-7[J]. Solar Physics, 1974, 35(2):

- 241-258.
- [13] Tousey R, Bartoe J D F, Brueckner G E, et al. Extreme ultraviolet spectroheliograph ATM experiment S082A[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(4): 870-878.
- [14] Harrison R A, Sawyer E C, Carter M K, et al. The Coronal Diagnostic Spectrometer for the solar and heliospheric observatory[J]. *Solar Physics*, 1995, 162(1): 233-290.
- [15] Wilhelm K, Curdt W, Marsch E, et al. SUMER-solar ultraviolet measurements of emitted radiation[J]. *Solar Physics*, 1995, 162(1/2): 189-231.
- [16] Zhitnik I A, Kuzin S V, Urnov A M, et al. X-ray and EUV diagnostics of active plasma structures with the RES spectroheliograph in the SPIRIT experiment onboard the CORONAS-F satellite[J]. *Solar System Research*, 2006, 40(4): 272-281.
- [17] Culhane J L, Harra L K, James A M, et al. The EUV imaging spectrometer for hinode[J]. *Solar Physics*, 2007, 243(1): 19-61.
- [18] Brosius J W, Daw A N, Rabin D M. Pervasive faint Fe XIX emission from a solar active region observed with EUNIS-13: evidence for nanoflare heating[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, 790(2): 112.
- [19] Anderson M, Appourchaux T, Auchère F, et al. The Solar Orbiter SPICE instrument: an extreme UV imaging spectrometer [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 642: A14.
- [20] 林隽, 汪敏, 田晖, 等. 太阳爆发的抵近探测[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(5): 059607.
Lin J, Wang M, Tian H, et al. *In situ* measurements of the solar eruption[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(5): 059607.
- [21] 季海生, 汪毓明, 汪景琇. 太阳的立体观测[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(5): 059605.
Ji H S, Wang Y M, Wang J X. Stereoscopic observations of the Sun[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(5): 059605.
- [22] 王颖, 周文艳, 代树武. 日地 L4/L5 点太阳立体探测任务初步设计[J]. *空间电子技术*, 2018, 15(4): 68-74.
Wang Y, Zhou W Y, Dai S W. A mission to the Sun-Earth L4/L5 for solar physics and space weather[J]. *Space Electronic Technology*, 2018, 15(4): 68-74.
- [23] 杨孟飞, 汪景琇, 王赤, 等. 太阳立体探测任务设想[J]. *科学通报*, 2023, 68(8): 859-871.
Yang M F, Wang J X, Wang C, et al. Envisioning the solar stereo exploration mission[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(8): 859-871.
- [24] Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. Concept of the solar ring mission: an overview[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(9): 1699-1713.
- [25] Wang Y M, Bai X Y, Chen C Y, et al. Solar ring mission: building a panorama of the Sun and inner-heliosphere[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1): 1146-1164.
- [26] 邓元勇, 周桂萍, 代树武, 等. 太阳极轨天文台[J]. *科学通报*, 2023, 68(4): 298-308.
Deng Y Y, Zhou G P, Dai S W, et al. Solar polar orbit observatory[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(4): 298-308.
- [27] Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. The Solar dynamics observatory (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, 275(1): 3-15.
- [28] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. The Atmospheric imaging assembly (AIA) on the Solar dynamics observatory (SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, 275(1): 17-40.
- [29] 邢阳光, 李林, 彭吉龙, 等. 三级次太阳极紫外窄波段无狭缝成像光谱仪光学设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0730003.
Xing Y G, Li L, Peng J L, et al. Optical design of 3-order solar extreme ultraviolet narrowband slitless imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0730003.
- [30] Fludra A, Griffin D, Caldwell M, et al. SPICE EUV spectrometer for the solar orbiter mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8862: 88620F.
- [31] Teriaca L, Feigl T, Schühle U. Broadband EUV/FUV mirror coatings for a solar spectrograph mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10699: 106992Y.
- [32] Monaco G, Garoli D, Frison R, et al. Optical constants in the EUV soft X-ray (5÷152 nm) spectral range of B₄C thin films deposited by different deposition techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6317: 631712.
- [33] Larruquet J I, Pérez-Marín A P, García-Cortés S, et al. Self-consistent optical constants of sputter-deposited B₄C thin films [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 29(1): 117-123.
- [34] Gautier J, Delmotte F, Françoise Ravet M, et al. Two channel multilayer mirrors for astrophysics[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(11): 3032-3035.
- [35] Lindblom J F. Multi-Spectral Solar Telescope Array IV: the soft X-ray and extreme ultraviolet filters[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(8): 1134.

System Design of Space Solar Extreme Ultraviolet Three-Waveband Imaging Spectrometer

Duan Ziwen¹, Xing Yangguang^{1*}, Peng Jilong², Dai Shuwu³, Wang Ying³, Zhu Chenglin³, Yan Lei⁴, Huang Yifan¹, Liu Yue^{1**}, Li Lin¹

¹*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

²*Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;*

³*Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;*

⁴*Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China*

Abstract

Objective The solar upper atmosphere including the corona, transition region, and chromosphere is composed of hot and highly dynamic magnetized plasma, from which highly ionized ions emit abundant extreme ultraviolet (EUV) spectral

lines. Existing EUV imaging spectrometers can only conduct imaging on one or two target regions of the solar upper atmosphere but cannot diagnose the whole region in a wide spectral and spatial scale using a single instrument. This severely restricts our understanding of the energy and material transport processes in solar eruptive activities. Therefore, we propose and design a solar EUV three-waveband imaging spectrometer with an elliptical varied line-space (EVLS) grating that operates at non-Rowland circle mounting. This innovative solar EUV imaging spectrometer boasts exceptional spectral imaging performance in an extremely large off-axis slit field of view (FOV) while maintaining a compact instrument package. Furthermore, it provides excellent grating aberration correction even at very high spectrograph magnifications and beam speeds. We hope that our spectral imaging strategy and instrument system design will be instrumental in the simultaneous observation of the solar corona, transition region, and chromosphere in the near future.

Methods The instrument utilizes an EVLS grating as the diffraction spectroscopic element. To achieve simultaneous correction of aberrations and free-astigmatism in all three spectral bands, we analyze the grating for aberrations by employing the optical path function and Fermat's principle. The correction condition of off-axis aberrations for the grating is obtained by optimizing the elliptical base shape parameters, line-space parameters, and structure parameters of the EVLS grating, with the grating's spectral focusing formula and spatial focusing curve formula considered. The global optimal solution for the instrument is then obtained via the simulated annealing algorithm and computer-aided design method to build the optimal model of the solar EUV three-waveband imaging spectrometer. Finally, the Monte Carlo method is adopted to non-sequentially trace different spectral line pairs in the target spectral band to verify the spectral imaging performance of the designed system.

Results and Discussions Figure 3 shows the final optimized optical system layout of the designed solar EUV three-waveband imaging spectrometer. The working wavelengths of 17–21 nm, 70–80 nm, and 95–105 nm are respectively utilized for observing the solar corona, transition region, and chromosphere. The detector for the 17–21 nm band adopts the charge-coupled device (CCD) structure of e2v technology with a pixel size of 13.5 μm , while the detectors for the 70–80 nm and 95–105 nm bands leverage an active pixel sensor (APS) structure with micro-channel plate (MCP) technology, and the pixel size is 20 μm . The entire instrument has an optical envelope volume of 1700 mm \times 370 mm \times 100 mm, and the slit has five different widths to adapt to different spatial and temporal scales of solar eruption activities. High-resolution spectral imaging of the two-dimensional solar disk with an FOV of $9.6' \times 5.0'$ can be achieved by stepwise rotation of the off-axis primary mirror.

The instrument exhibits excellent imaging performance. The root mean square (RMS) radii at 17–21 nm are all less than 6 μm , while the RMS radii at 70–80 nm and 95–105 nm are mostly less than 10 μm . As the FOV increases, the radius of the diffractive spot RMS changes smoothly [Figs. 5(d)–5(f)], which indicates good correction of off-axis aberrations. At 19 nm, the modulation transfer function values at the Nyquist spatial frequency (37 lp/mm) are all greater than 0.6 [Fig. 6(a)], and the geometric encircled energy within a single pixel size (13.5 μm) is better than 82.5% [Fig. 7(a)]. At 75 nm and 100 nm, the modulation transfer function values at the Nyquist spatial frequency (25 lp/mm) are both greater than 0.4 [Figs. 6(b)–6(c)], and the geometric encircled energy within a single pixel size is 80.5% and 85.9% [Figs. 7(b)–7(c)] for each. Generally, the spatial resolution of the system is better than 0.6". The simulation results of non-sequential ray tracing show that the slit image length is 19.67 mm, which is consistent with the theoretically calculated value of 19.60 mm [Fig. 8(b)]. The slit images of the spectral lines with their respective calculated ideal spectral resolution intervals at the three center wavelengths of 19, 75, and 100 nm are separated [Fig. 8(a)]. Therefore, the spectral resolution of the imaging spectrometer system is better than 0.006 nm in the 17–21 nm band and better than 0.008 nm in the 70–80 nm and 95–105 nm bands.

Conclusions We propose an innovative slit-scanning spectral imaging architecture that operates at 17–21 nm, 70–80 nm, and 95–105 nm. It can simultaneously diagnose and observe important plasma spectral lines in the solar corona, transition region, and chromosphere. Meanwhile, the theory of correcting the image aberrations caused by EVLS grating operating at non-Rowland circle mounting is studied. This structure can correct off-axis grating aberrations in a relatively compact design to achieve high-resolution spectroscopic imaging with broadband and large off-axis FOV. The ray tracing simulation experimental results reveal that the system's spatial resolution is better than 0.6", and its spectral resolution is better than 0.006 nm at 17–21 nm, and better than 0.008 nm at 70–80 nm and 95–105 nm respectively. The advanced design research of this instrument has theoretical significance for the development and research of China's solar EUV imaging spectrometers in the near future and provides references for the model selection of China's future solar space exploration missions.

Key words solar space exploration; solar extreme ultraviolet; imaging spectrometer; grating aberration correction; ray tracing