

亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像 光谱仪光学设计*

黄一帆¹⁾ 邢阳光^{1)†} 沈文杰¹⁾ 彭吉龙²⁾ 代树武³⁾
王颖³⁾ 段紫雯¹⁾ 闫雷⁴⁾ 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)

(2023年9月13日收到; 2023年10月21日收到修改稿)

狭缝式成像光谱仪是太阳极紫外光谱成像探测的重要工具之一, 然而目前国内尚无该类载荷, 导致太阳物理学和空间天气学等学科在极紫外光谱诊断研究方面主要依赖国外仪器数据, 严重制约了相关学科的发展. 国外已发射的成像光谱仪仅具有 $2''$ 量级的空间分辨率, 很难观测到日冕加热模型预测的等离子体核心特征. 为了更好地理解太阳不同层次大气之间的耦合过程, 需要更宽光谱覆盖的太阳观测数据. 鉴于此, 本文提出并设计了一款亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪, 相比现有仪器, 系统能够实现更高空间和光谱分辨率、更宽光谱范围覆盖的观测. 性能评价结果表明, 系统在 $62\text{--}80\text{ nm}$, $92\text{--}110\text{ nm}$ 波段内的像元空间分辨率均优于 $0.4''$, 光谱分辨率均优于 0.007 nm , 光谱成像质量接近衍射极限, 对我国未来首台空间太阳极紫外成像光谱仪的研制具有重要参考价值.

关键词: 太阳极紫外, 光学设计, 成像光谱仪, 超环面变线距光栅

PACS: 95.85.Mt, 42.15.Eq, 07.60.Rd, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.73.20231481

1 引言

太阳是天然的物理学实验室, 呈现出丰富的等离子体活动现象, 太阳观测能够为粒子物理、高能物理、磁流体力学等学科提供地面条件无法获得的复杂物理过程的详细观测数据^[1]. 作为距离地球最近的恒星, 太阳活动会直接影响日地空间环境和人类家园宜居性^[2], 爆发性太阳活动引起的灾害性空间天气, 将会对通讯、导航、电力等设施造成危害^[3]. 太阳极紫外光谱学观测和诊断技术能够实现不同层次太阳大气等离子体特征参数的精确测量, 在研

究太阳风起源、日冕加热、太阳爆发活动机理等方面具有独特优势^[4].

国外对太阳极紫外光谱成像探测重视较早, 发展了一系列仪器^[4]. 1995年发射的太阳和日球层天文台(SOHO)卫星^[5]上搭载了太阳紫外辐射测量仪SUMER^[6]和日冕诊断光谱仪CDS^[7]两款极紫外光谱成像仪器. SUMER是一台工作于 $46.5\text{--}161\text{ nm}$ 波段的正入射狭缝光谱仪, 空间分辨率约 $3''$, 光谱分辨率可达 0.0044 nm , 然而其宽光谱覆盖需要通过复杂结构运动进行波长扫描得到, 单次曝光无法同时对观测波段内所有谱线进行观测. CDS是一台包含掠入射(GIS)和正入射(NIS)双通道的成

* 国家自然科学基金(批准号: 62205027, 42274208)和中国科学院战略性先导科技专项(批准号: XDA15018300)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xyg@bit.edu.cn

像光谱仪, 两个通道共用掠入射 Wolter-Schwarzschild type II 型望远镜, 因掠入射成像限制, CDS 的空间分辨率不高于 $6''$. GIS 通道的分光元件采用掠入射球面等线距 (SULS) 光栅, 通过扫描镜旋转可实现 15.1—78.5 nm 范围内四个工作波段的切换, 光谱分辨率为 0.021 nm; NIS 通道的分光元件采用两个不同刻线密度的正入射超环面等线距 (TULS) 光栅, 通过扫描镜旋转分别实现 30.8—38.1 nm 和 51.3—63.3 nm 波段消像散成像, 两波段光谱分辨率分别为 0.008 nm 和 0.014 nm. 2006 年发射的日出 (Hinode) 卫星^[8]上的极紫外成像谱仪 EIS^[9], 采用两反系统, 在望远镜和光栅表面划分了两个“D”型区域, 分别使用具有不同参数的 Mo/Si 多层膜, 以获得正入射下目标谱段 17—21 nm 和 25—29 nm 较高的反射效率, 取得了当前该波段太阳极紫外探测较高的空间和光谱分辨性能, 由于 EIS 主要用于铁系离子的日冕发射谱线研究, 其缺少对色球和过渡区谱线的光谱诊断. 2013 年发射的探空火箭仪器 EUNIS-13^[10]的探测波段为 30—37 nm 和 52.5—63.5 nm, 空间分辨率约 $3''$ — $4''$, 光谱分辨率约 0.02 nm, 然而其极紫外双波段光谱成像需要通过两台独立的成像光谱仪实现, 增加了系统的研制成本, 同时部署于探空火箭也导致其无法提供长时间有效观测. 2020 年发射的太阳轨道器 (SOLO)^[11]上搭载的日冕环境光谱成像仪 SPICE^[12]工作于 70.4—79 nm 和 97.3—104.9 nm 双波段, 长波段二级光谱包括 48—53 nm, 像元空间分辨率可以达到 $1.1''$ (对应约 800 km 日面尺度), 短波段和长波段的光谱分辨率分别为 0.0095 nm 和 0.0083 nm. 然而, SPICE 的探测波段内缺少了上层过渡区 Ne VII 46.52 nm, OV 62.95 nm 和日冕 Mg X 62.5 nm 等重要谱线, 且因工作于抵近探测轨道, SPICE 仅能在每周轨道上有限观测窗口期内获取数据^[13], 在实际探测中受到限制.

国内在太阳极紫外光谱成像探测方面的基础较为薄弱^[2]. 2021 年发射的太阳探测科学技术试验卫星“羲和号”(CHASE)^[14]实现了国际首次空间太阳 H_{α} (656.28 nm) 波段光谱成像探测, 反演获得了高精度的全日面 H_{α} 波段多普勒速度分布. 2022 年发射的先进天基太阳天文台卫星“夸父一号”(ASO-S)^[15]作为我国首颗综合性太阳探测卫星, 实现了我国首次空间太阳磁场探测、太阳硬 X 射线

和莱曼阿尔法成像探测^[2]. 通过长期的关键技术攻关, 国内近期在极紫外成像仪研制方面取得了一定进展. 2021 年发射的风云三号 E 星 (FY-3E)^[16]上搭载的太阳 X 射线极紫外成像仪 X-EUVI^[17], 获得了我国首幅 19.5 nm 太阳极紫外图像, 实现了国内太阳极紫外成像观测零的突破. 2022 年发射的中国科学院空间新技术试验卫星 (SATech-01) 上搭载的极紫外成像仪 SUTRI^[18], 实现了上层过渡区关键谱线 Ne VII 46.52 nm 窄波段全日面高分辨率成像. 然而, 在极紫外光谱探测方面, 目前尚无一款实际在轨运行的太阳极紫外成像光谱仪载荷.

国外已发射的太阳极紫外成像光谱仪各自存在一些缺陷, 在实际观测中受到限制. SUMER 和 CDS 需要通过复杂的光栅入射角旋转和波长扫描, 以获取宽波长范围的光谱; EUNIS-13 使用两台成像光谱仪搭配实现极紫外双波段光谱成像, 增加了系统研制成本; EIS 和 SPICE 各自缺少了一些重要的极紫外辐射谱线, 在诊断宽温度范围内的太阳大气结构及其活动现象时受到限制, 且 SPICE 无法提供对太阳的连续观测. 根据最新的太阳物理学研究的探测需求, 未来发射的太阳极紫外成像光谱仪应同时具有亚角秒量级的高空间分辨率和更宽的光谱范围覆盖能力^[4]. 鉴于此, 本文提出并设计了一款亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪, 工作波段为 62—80 nm 和 92—110 nm, 长波段二级光谱包括 46—55 nm, 同时涵盖了形成于色球、过渡区和日冕宽温度范围内的极紫外谱线, 相比现有仪器, 覆盖了更宽的光谱范围. 系统无需复杂机械结构运动, 单次曝光即可实现整个探测波段内覆盖的极紫外强谱线的同时光谱诊断, 且系统工作轨道选择晨昏太阳同步轨道, 相比 EUNIS-13 和 SPICE, 可实现对太阳近似全年无间断连续观测. 性能评价结果表明, 系统各波段像元空间分辨率均优于 $0.4''$, 62—80 nm 和 92—110 nm 波段光谱分辨率分别为 0.00615 nm 和 0.00642 nm, 取得了优良的空间和光谱分辨性能, 对国内未来太阳极紫外成像光谱仪型号研制具有重要参考价值.

2 系统总体概述

2.1 系统科学意义

本文设计的亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽

波段成像光谱仪,能够实现色球、过渡区、日冕等
离子体运动学和热力学参数的详细光谱诊断,获取
太阳大气中发生的基本物理过程的高分辨率光谱
数据,探测耀斑和日冕物质抛射等瞬时活动现象,
研究太阳大气中的不同尺度结构特征及其演化,为
太阳大气物质和能量传输机制、太阳爆发事件的能
量积累与释放过程、灾害性空间天气监测预报等方
面的研究提供关键支持.

2.2 系统技术指标

近地空间的晨昏太阳同步轨道接收的太阳
辐射仅为 SPICE 在其轨道最小近日点 (0.28 AU)
处的 1/13,为获得与 SPICE 相当的灵敏度和时
间分辨率,系统主镜口径应远大于 SPICE,达到
156 mm×156 mm. 系统狭缝方向视场为±2.4',相
比 SPICE,其瞬时视场覆盖了更大的日面区域. 系
统工作波段为 62—80 nm 和 92—110 nm,涵盖色
球顶部、过渡区、下层日冕重要谱线,能够获得
0.01—10 MK 温度范围内等离子体物理状态和成
分组成的精确数据,其长波段二级光谱 46—55 nm,
涵盖了 EIS, SPICE 等先驱仪器未覆盖的上层过渡
区关键谱线 Ne VII 46.52 nm,该谱线对应的温度
区域 (约 0.5 MK) 是当前太阳物理学研究的热点.
Ne VII 46.52 nm 谱线可用于观测过渡区普遍存在
的系统性流动,以促进日冕加热机制的研究,同时
可用于识别太阳风的起源区域,探测各类太阳爆发

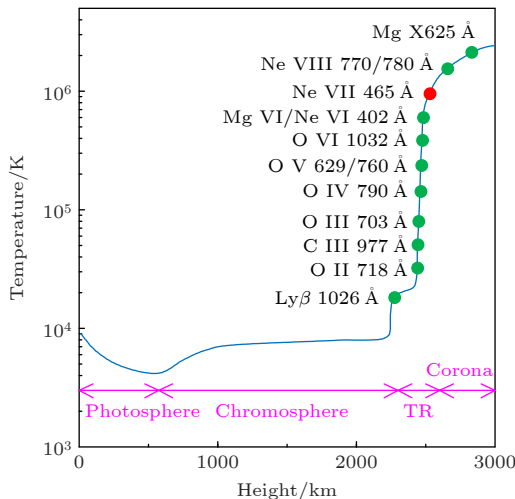


图 1 太阳大气温度随表面高度变化曲线. 图上标注了本
文设计的系统工作波段覆盖的极紫外强辐射谱线^[19]

Fig. 1. Curve of solar atmospheric temperature versus sur-
face height. The EUV strong emission lines covered by our
design are marked on the figure^[19].

活动现象,是目前太阳物理学研究迫切需要的关键
谱线^[18,19]. 系统工作波段内覆盖的极紫外强辐射谱
线,如图 1^[19]所示. 太阳大气具有高度的动态性,
存在大量的瞬变活动现象和精细结构,例如过渡区
爆发事件 (EEs),其红蓝两翼的多普勒速度高达
50—200 km/s,时间尺度约 60—90 s. 为最大化地
获得高度动态变化的太阳大气的高光谱分辨数据,
系统在各波段的光谱分辨率应优于 0.007 nm. 最
新的太阳物理学研究结果表明,需要将观测仪器的
空间分辨率提升至亚角秒量级,才能探测到日冕加
热模型预测的阿尔文波和纳耀斑的精细结构和演
化过程^[4],因此本文设计的系统的像元空间分辨率
应优于 0.5'',仪器空间分辨率应优于 1''. 系统总体
技术指标如表 1 所列.

表 1 亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像
光谱仪技术指标

Table 1. Specifications of the sub-angular second
spatial resolved solar extreme ultraviolet broadband
imaging spectrometer.

Performance parameters	Design values
Satellite orbit	Dawn-dusk solar synchronous orbit
Entrance aperture/mm ²	156 × 156
Slit FOV/(")	4.8
Wavelength range/nm	62—80 & 92—110 & 46—55 (2nd order)
Spectral resolution/nm	≤ 0.007
Spatial plate scale/(")·pixel ⁻¹)	≤ 0.5
Spatial resolution/(")	≤ 1.0
System focal length/mm	11000
Optical volume/mm ³	≤ 2800 × 500 × 450
Pixel size of detector/μm	15 (1536 × 1536)

2.3 系统光学架构

由窄狭缝和多层镀膜凹面光栅构成的狭缝式
成像光谱仪,可实现沿狭缝方向的一维消像散光谱
成像观测,通过狭缝扫描或旋转前置望远镜能够获
得探测区域的高分辨率空间信息 $I(x, y)$ 和光谱信
息 $I(\lambda)$. 本文设计的成像光谱仪系统工作原理如
图 2 所示. 前置离轴望远主镜在焦面上成太阳的一
次像,在主镜焦面处放置窄狭缝选择线源观测视
场,经非罗兰圆结构的超环面变线距 (TVLS) 光栅
次镜色散和聚焦后,不同波段的极紫外光线同时在
两个平面探测器上成二次像. 通过狭缝限制 y 方向
视场,单次曝光即可获得瞬时视场 (IFOV) 截取的

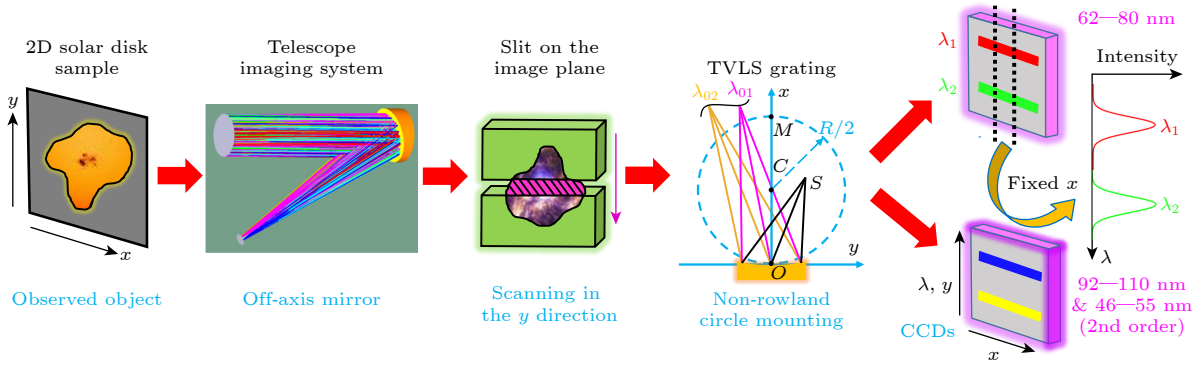


图 2 亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪工作原理图

Fig. 2. Operation principal diagram of sub-angular second spatial resolved solar extreme ultraviolet broadband imaging spectrometer.

窄条形日面区域内的高分辨率光谱信息 $I(x, \lambda)$. 为获得二维日面的光谱立方体数据 $I(x, y, \lambda)$, 需要使望远镜所成一次像垂直于狭缝移动, 以实现对整个探测区域的扫描成像, 通过多次曝光重构出 $I(x, y, \lambda)$.

3 系统光线追迹建模

3.1 系统像差校正条件

为解析本文设计的成像光谱仪的像差校正和参数约束条件, 建立如图 3 所示的光线追迹模型, 系统采用单元件的离轴反射镜作为前置望远镜, 以非罗兰圆结构的 TVLS 光栅作为分光元件, 使用两个独立的平面探测器接收两个通道的极紫外宽波段光谱辐射.

前置望远系统采用单个离轴抛物面反射镜, 离轴量为 Δ , 通光口径为 D , 如图 3 所示, 由近轴光学理论可知, 其焦距 f_T 满足:

$$f_T = 0.5\sqrt{R_T^2 + 4\Delta^2}, \quad (1)$$

式中, R_T 为离轴望远镜的曲率半径.

系统选用的 TVLS 光栅工作于非罗兰圆结构

扩展光源照明条件下, 其光栅面型方程为

$$\{[(x - R)^2 + y^2]^{1/2} - (R - \rho)\}^2 + z^2 = \rho^2, \quad (2)$$

式中, R 和 ρ 分别为 TVLS 光栅在色散方向 (子午方向) 和垂直色散方向 (弧矢方向) 的曲率半径.

TVLS 光栅刻线密度随 Y 轴坐标变化, 其表达式为

$$d(y) = d_0 + \sigma_1 y + \sigma_2 y^2 + \sigma_3 y^3 + \dots, \quad (3)$$

式中, d_0 为光栅中心刻线间距; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ 为光栅刻线密度的空间变化参数. 鉴于变刻线光栅的加工成本和技术难度, 令刻线密度空间变化参数 $\sigma_k = 0$ ($k = 2, 3, \dots$), 以获得刻线密度线性变化的 TVLS 光栅.

根据 Poletto 和 Thomas 的研究成果^[20], 直接给出了离轴照明条件下 TVLS 光栅初始结构参数的计算方法. 为获得合理的光栅初始解, 使其同时取得良好的宽波段消像散光谱成像和离轴视场成像性能, 需要确定一些已知量, 包括: 两个消像散波长点 λ_1 和 λ_2 、光栅入射臂长 r_A 、中心波长 $\lambda_c = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ 处的光栅横向放大率 β_c 、光栅中心刻线间距 d_0 . 成像光谱仪校正离轴光栅像差的条件为

$$\beta = \sin \theta / \sin i = r_B / r_A, \quad (4)$$

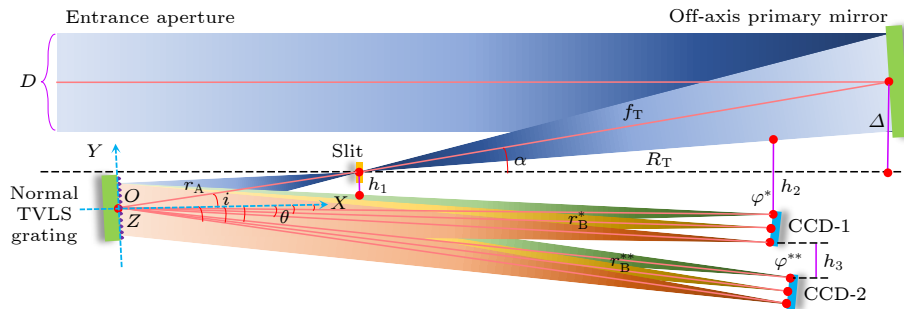


图 3 亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪的光线追迹模型

Fig. 3. Ray-tracing model for sub-angular second spatial resolved solar extreme ultraviolet broadband imaging spectrometer.

式中, β 为光栅放大率; r_A, r_B 为光栅入射臂长和出射臂长; i, θ 为光栅入射角和衍射角. 当光栅入射角 i 满足 (5) 式时, 可在中心波长 λ_c 处实现离轴光栅像差的校正. 当 TVLS 光栅在子午和弧矢方向上的曲率半径 R, ρ 以及刻线密度空间变化参数 σ_1 满足 (5) 式时, 能够使光谱聚焦曲线和空间聚焦曲线相交于两个消像散波长点 λ_1, λ_2 , 以实现宽波段的消像散成像.

$$\begin{cases} i = \arcsin\left(\frac{m\lambda_c d_0}{1 + \beta_c}\right), \\ \rho = r_A (\cos i + \cos \theta_c) \frac{\beta_c}{1 + \beta_c}, \\ R = \frac{\lambda_1 (\cos i + \cos \theta_2) - \lambda_2 (\cos i + \cos \theta_1)}{\lambda_1 K_1 - \lambda_2 K_2}, \\ \sigma_1 = \frac{1}{m} \frac{K_2 (\cos i + \cos \theta_1) - K_1 (\cos i + \cos \theta_2)}{\lambda_1 (\cos i + \cos \theta_2) - \lambda_2 (\cos i + \cos \theta_1)}, \\ K_1 = \frac{\cos^2 i}{r_A} + \cos^2 \theta_1 \left(\frac{\cos i + \cos \theta_1}{\rho} - \frac{1}{r_A} \right), \\ K_2 = \frac{\cos^2 i}{r_A} + \cos^2 \theta_2 \left(\frac{\cos i + \cos \theta_2}{\rho} - \frac{1}{r_A} \right), \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ_1, θ_2 分别为两个消像散波长点 λ_1, λ_2 的光

栅衍射角; θ_c 为中心波长 λ_c 的光栅衍射角.

3.2 系统参数约束条件

为保证优化得到的系统满足表 1 给出的分辨率要求, 将系统的光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 和沿狭缝方向的像元空间分辨率 δ 作为优化约束条件, 以限制系统结构, 其表达式为

$$\begin{cases} \Delta\lambda = \frac{d_0 \cos \theta \cos \gamma}{\beta m r_A} \max(px, \beta s), \\ \delta = \frac{px}{\beta \sqrt{R_T^2 + 4\Delta^2}} \times \frac{12.96}{\pi} \times 10^5, \end{cases} \quad (6)$$

式中, γ 为衍射光线在探测器上的入射角; px 为探测器像元尺寸; s 为狭缝宽度.

为使系统具有合理的结构布局, 避免出现系统各元件之间的空间干涉和光线遮挡, 如图 3 所示, 将狭缝中心到短波段最小波长上边缘衍射光线的距离 h_1 , 短波段探测器上边缘到前置离轴望远主镜下边缘反射光线的距离 h_2 , 短波段探测器下边缘到长波段探测器上边缘的距离 h_3 , 作为几何约束条件, 其表达式为

$$\begin{cases} h_1 = \frac{r_A}{\sqrt{(R_T/2)^2 + \Delta^2}} [\tan(\theta_1^* - \alpha) R_T/2 + \Delta], \\ h_2 = \Delta - \frac{D}{2} + \frac{r_A \Delta}{\sqrt{(R_T/2)^2 + \Delta^2}} + \tan(\theta_1^* - \alpha) \frac{\beta^* r_A \cos(\theta_0^* - \alpha) [\tan(\theta_0^* - \alpha) - \cot \varphi^*]}{\tan(\theta_1^* - \alpha) - \cot \varphi^*}, \\ h_3 = \tan(\theta_1^{**} - \alpha) \frac{\beta^{**} r_A \cos(\theta_0^{**} - \alpha) [\tan(\theta_0^{**} - \alpha) - \cot \varphi^{**}]}{\tan(\theta_1^{**} - \alpha) - \cot \varphi^{**}} \\ - \tan(\theta_3^* - \alpha) \frac{\beta^* r_A \cos(\theta_0^* - \alpha) [\tan(\theta_0^* - \alpha) - \cot \varphi^*]}{\tan(\theta_3^* - \alpha) - \cot \varphi^*}, \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\theta_0^*, \theta_1^*, \theta_3^*$ 为短波段中心、最小和最大波长衍射角; θ_0^{**} 和 θ_1^{**} 为长波段中心和最小波长衍射角; φ^* 和 φ^{**} 为短波段和长波段探测器倾斜角度; α 为前置望远镜离轴角, 定义为 $\alpha = \arctan(\Delta/f_T)$, β^* 和 β^{**} 为短波和长波中心波长处的光栅横向放大率.

3.3 系统优化流程

基于表 1 给出的技术指标, 本文设计了一款亚角秒空间分辨的太阳能紫外宽波段成像光谱仪, 其设计流程如图 4 所示. 首先利用 (1)—(5) 式给出的

初始结构求解方法, 计算得到系统初始解. 将 (6) 式作为性能约束条件, 以控制成像光谱仪系统的空间和光谱分辨率符合技术指标要求, (7) 式作为边界约束条件, 以保障各元件之间没有空间位置上的干涉, 使得成像光谱仪系统具有合理的光路布局结构. 以各个波长下像面上聚焦弥散光斑在空间和光谱方向上的均方根 (RMS) 半径大小作为优化函数, 且空间和光谱方向上的权重相同, 在 ZEMAX 软件中对系统初始解进行全局优化, 通过反复迭代和性能评价, 最终得到综合性能最优的成像光谱仪系统参数.

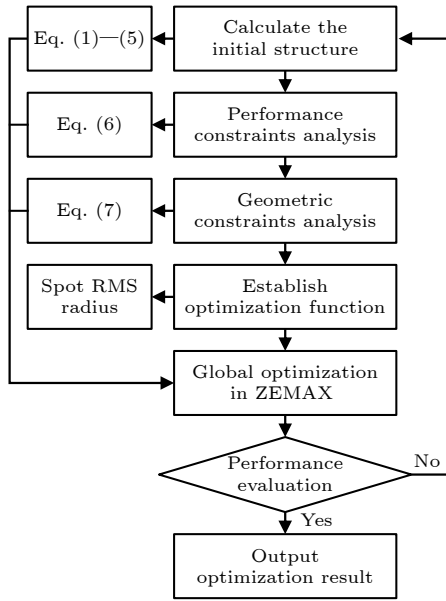


图 4 成像光谱仪系统的设计流程

Fig. 4. Design flow process for imaging spectrometer system.

4 设计结果和性能评价

4.1 系统设计结果

最终优化得到的成像光谱仪系统光学布局图, 如图 5 所示, 整个光学系统仅包含六个元件, 包括孔径光阑、离轴望远主镜、入射狭缝、TVLS 光栅次镜和两个平面探测器。

成像光谱仪的技术指标和元件参数, 如表 2 所列. 系统在 62—80 nm, 92—110 nm 的光谱分辨率均优于 0.007 nm, 像元空间分辨率均优于 0.4", 满足设计指标要求. 系统焦距达到 11 m, 具有 2600 mm×420 mm×400 mm 的光学包络体积. 前置望远镜采用口径为 156 mm×156 mm, 曲率半径为 4320.025 mm, 离轴量为 120 mm 的抛物面镜. 系统采用四种入射狭缝 (宽度为 0.28, 1, 2, 40", 长度为 288") 以实现不同尺度太阳爆发活动的光谱成像, 扫描方向视场为±144".

表 2 亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪技术指标和元件参数

Table 2. Specifications and optical element parameters of sub-angular second spatial resolved solar extreme ultraviolet broadband imaging spectrometer.

Specification	
Wavelength range@SW/nm	62—80
Wavelength range@LW/nm	92—110 & 46—55 (2nd order)
Spectral resolution@SW/nm	0.00615
Spectral resolution@LW/nm	0.00642
Spatial plate scale @SW/(("·pixel ⁻¹))	0.340(@71 nm)
Spatial plate scale @LW/(("·pixel ⁻¹))	0.382(@101 nm)
System focal length/mm	11000
Optical volume/mm ³	2600 × 420 × 400
Detector/μm	15 (1536 × 1536)
Telescope design	
Aperture/mm ²	156 × 156
R_T /mm	4320.025
Conic	-1
Δ /mm	120
Slit design	
Slits width/(")	0.28, 1, 2, 40
Slits length/(")	288
Raster coverage/(")	±144
TVLS grating design	
m	+1 order
$1/d_0$ /mm ⁻¹	1500
β	5.177×@SW; 5.261×@LW
i (°)	0.909
r_A /mm	440.667
R /mm	735.545
ρ /mm	737.138
b_2	0.0349
Groove density/(lines·mm ⁻¹)	1500 ± 4
Ruling area/mm ²	36 × 36
Two independent detectors design	
Wavelength range/nm	Tilt angle/(°)
62—80	15.259
92—110	17.824

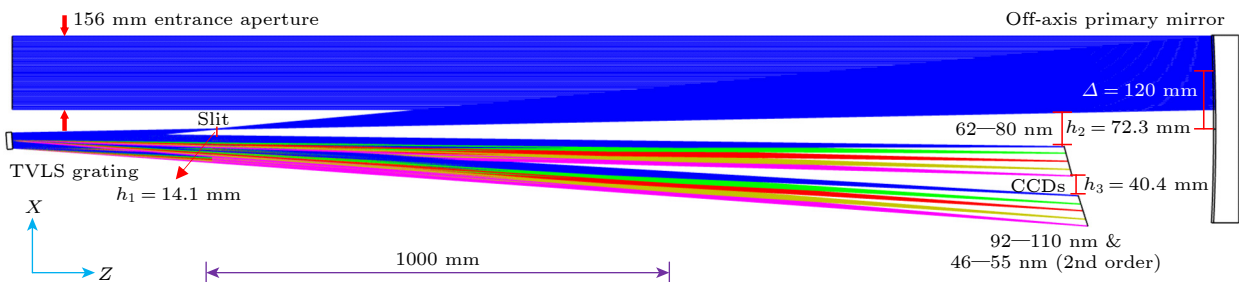


图 5 亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪光学布局图

Fig. 5. Optical layout of sub-angular second spatial resolved solar extreme ultraviolet broadband imaging spectrometer.

TVLS 光栅刻线区域为 $36\text{ mm}\times 36\text{ mm}$ 的矩形区域, 光栅在色散方向的曲率半径 R 为 735.545 mm , 垂直色散方向的曲率半径 ρ 为 737.138 mm , 光栅基底表面矢高分布如图 6(a) 所示; 光栅中心刻线密度为 1500 lines/mm , 刻线密度沿色散方向线性变化, 如图 6(b) 所示.

4.2 光谱聚焦性能评价

图 7(a) 和图 7(b) 为不同离轴视场下的点列图均方根 (RMS) 半径随波长变化曲线. 可见, 在两个消像散波段和 $\pm 2.4'$ 的离轴视场内, 成像光谱仪在空间和光谱方向上的点列图 RMS 半径均小于 $7\text{ }\mu\text{m}$, 小于像元尺寸 ($15\text{ }\mu\text{m}$) 的一半, 说明系统取得了

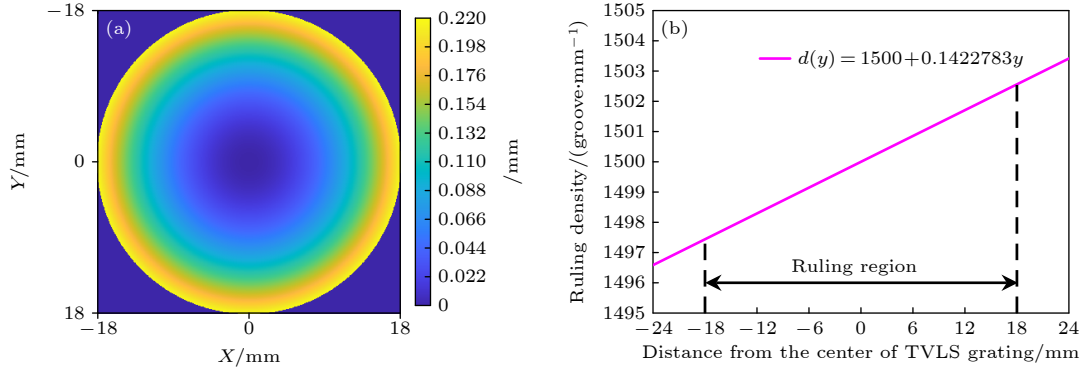


图 6 TVLS 光栅 (a) 基底表面矢高图; (b) 刻线密度分布曲线图

Fig. 6. TVLS grating: (a) The substrate surface sag map; (b) the curve of the ruling density distribution.

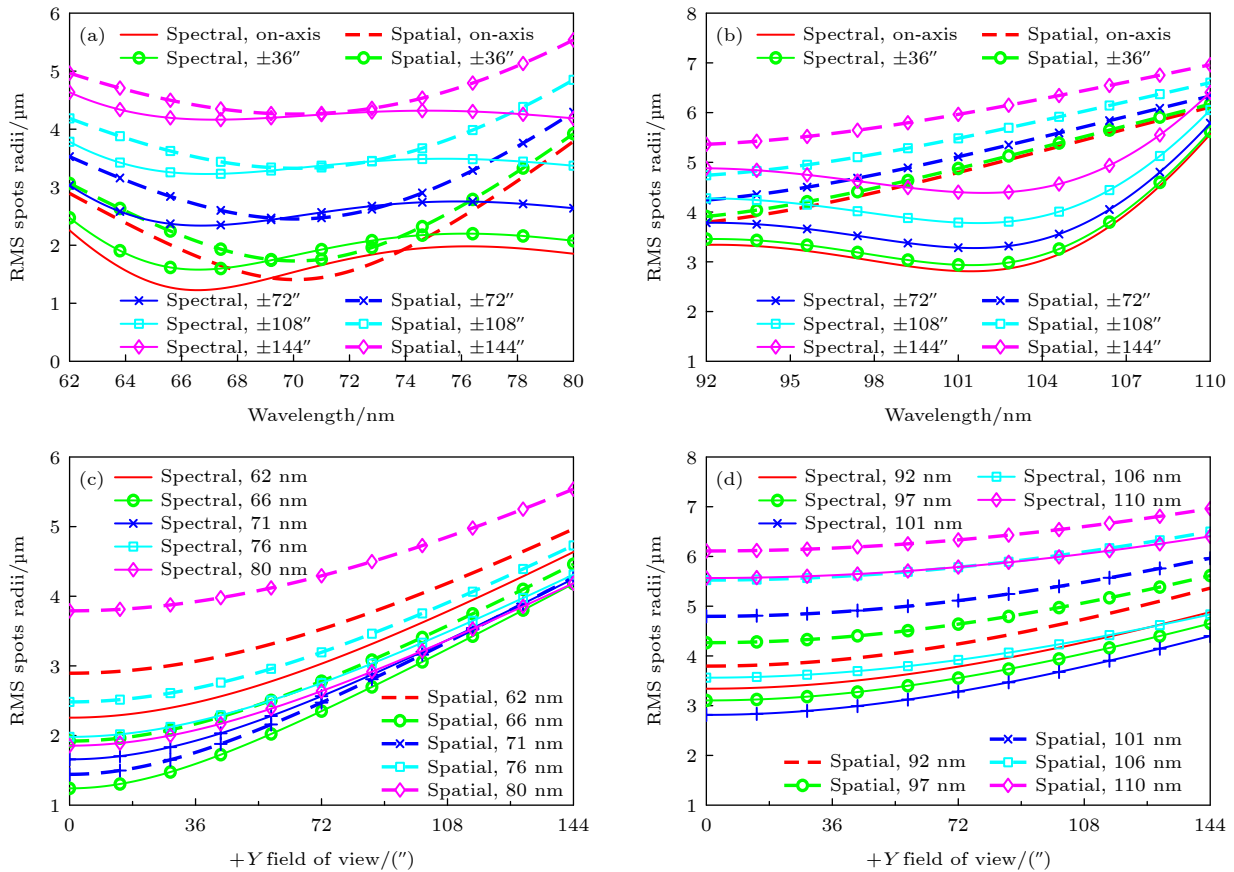


图 7 光线追迹结果 (a), (b) 不同离轴视场下 RMS 点列图半径随波长的变化; (c), (d) 不同波长下 RMS 点列图半径随视场的变化

Fig. 7. Ray tracing results: (a), (b) RMS spots radii versus wavelengths under different off-axis FOV; (c), (d) RMS spots radii versus FOV in the different wavelengths.

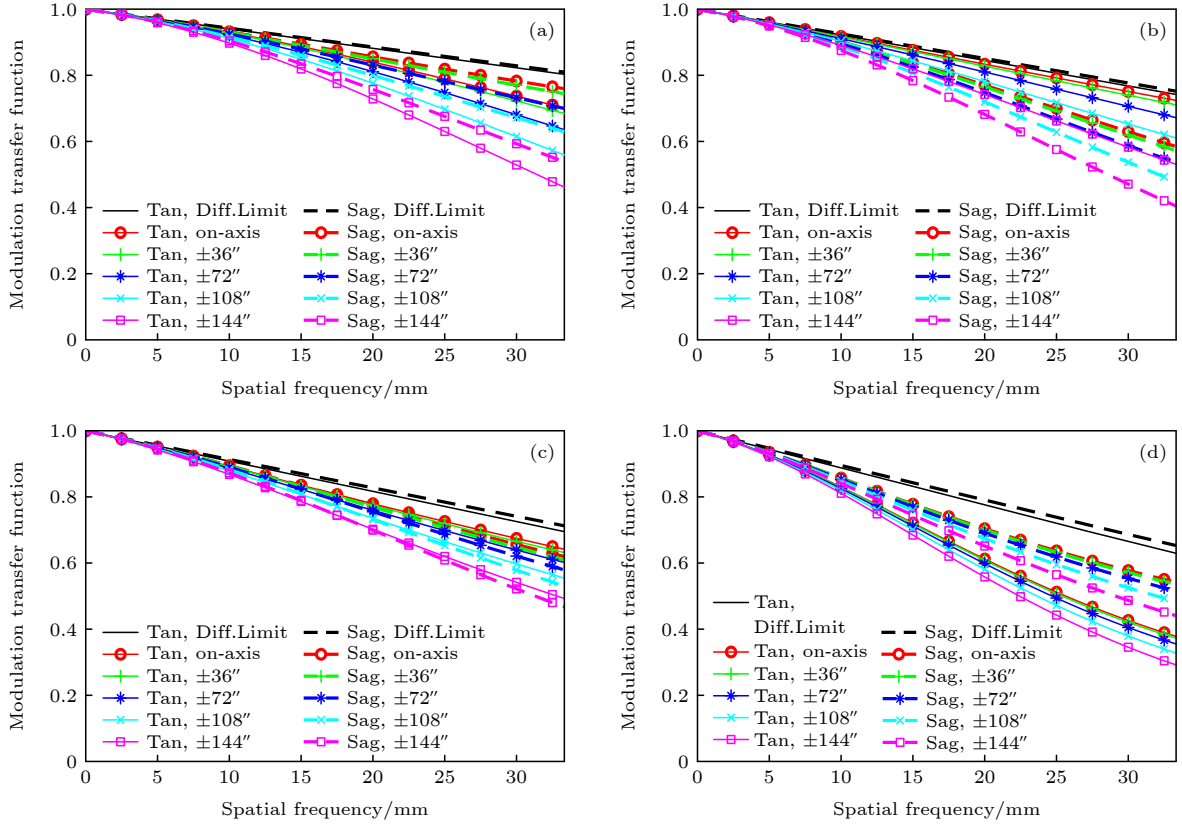

 图 8 光学系统在不同波长处的调制传递函数 (a) $\lambda = 62 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 80 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 92 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 110 \text{ nm}$

 Fig. 8. MTFs of optical system under different wavelengths: (a) $\lambda = 62 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 80 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 92 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 110 \text{ nm}$.

良好的空间和光谱成像性能. 图 7(c) 和图 7(d) 为不同波长下的点列图 RMS 半径随离轴视场变化曲线. 可见, 在任意波长下, 空间和光谱方向上的点列图 RMS 半径均随离轴视场增大而增大, 但总体变化较为平稳, 点列图 RMS 半径最大值小于 $7 \mu\text{m}$, 说明系统在宽波段内校正了离轴像差.

图 8(a)—(d) 分别为系统在 62, 80, 92, 110 nm 处的调制传递函数 (MTF) 曲线. 可见, 除 110 nm 的边缘视场外, MTF 在奈奎斯特频率 (33.33 lp/mm) 处均大于 0.4, 接近衍射极限, 说明系统取得了良好的光谱成像质量.

4.3 空间分辨率和光谱分辨率

利用 Poletto 等^[21] 提出的成像光谱仪的像元空间分辨率和光谱分辨率评价方法, 如 (8)—(10) 式所示, 对系统进行了分辨率性能评价:

$$\begin{cases} R_{\text{spat}_x} = \sqrt{(2\text{rms}_{T_x})^2 + W^2}, \\ \delta_x = \frac{R_{\text{spat}_x}}{f_T} \times \frac{6.48}{\pi} \times 10^5, \\ f_T = 0.5\sqrt{R_1^2 + 4\Delta^2}, \end{cases} \quad (8)$$

式中, rms_{T_x} 为前置望远镜在狭缝平面上 x 方向 (垂直狭缝方向) 点列图 RMS 半径, W 为狭缝宽度, f_T 为望远镜焦距. 可见, 系统在垂直狭缝方向的像元空间分辨率 δ_x 仅取决于前置望远镜设计和狭缝宽度.

$$\begin{cases} R_{\text{spat}_y} = \sqrt{(2\text{rms}_{T_y}\beta)^2 + (2\text{rms}_{G_y})^2 + p^2}, \\ \delta_y = \frac{R_{\text{spat}_y}}{\beta f_T} \times \frac{6.48}{\pi} \times 10^5, \end{cases} \quad (9)$$

式中, rms_{T_y} 为望远镜在狭缝平面上 y 方向 (平行狭缝方向) 点列图 RMS 半径, rms_{G_y} 为狭缝处理理想点光源照明 TVLS 光栅后所成像在像面上 y 方向点列图 RMS 半径, p 为探测器像元尺寸. 可见, 系统在平行狭缝方向的像元空间分辨率 δ_y 受望远镜、光栅和探测器参数共同影响.

$$\begin{cases} R_{\text{spec}} = \sqrt{(W\beta)^2 + (2\text{rms}_{G_x})^2 + p^2}, \\ \Delta\lambda = \frac{d_0 \cos\theta \cos\gamma}{\beta m r_A} R_{\text{spec}}, \end{cases} \quad (10)$$

式中, rms_{G_x} 为理想点光源照明 TVLS 光栅所成像在系统像面处 x 方向点列图 RMS 半径. 可见, 系统光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 受光栅、狭缝宽度、探测器参

数影响.

图 9(a)—(c) 为系统像元空间分辨率随离轴视场变化曲线. 可见, 系统垂直狭缝方向的像元空间分辨率 δ_x 在整个离轴视场和 $\pm 2.4'$ 扫描视场下达到 $0.387''$, 平行狭缝方向的像元空间分辨率 δ_y 在 71, 101 nm 波长处分别为 $0.34''$ 和 $0.382''$.

图 10(a) 和图 10(b) 为系统光谱分辨率随波长变化曲线. 可见, 系统光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 在 62—80 nm 和 92—110 nm 两个消像散波段内分别为 0.00615 nm 和 0.00642 nm.

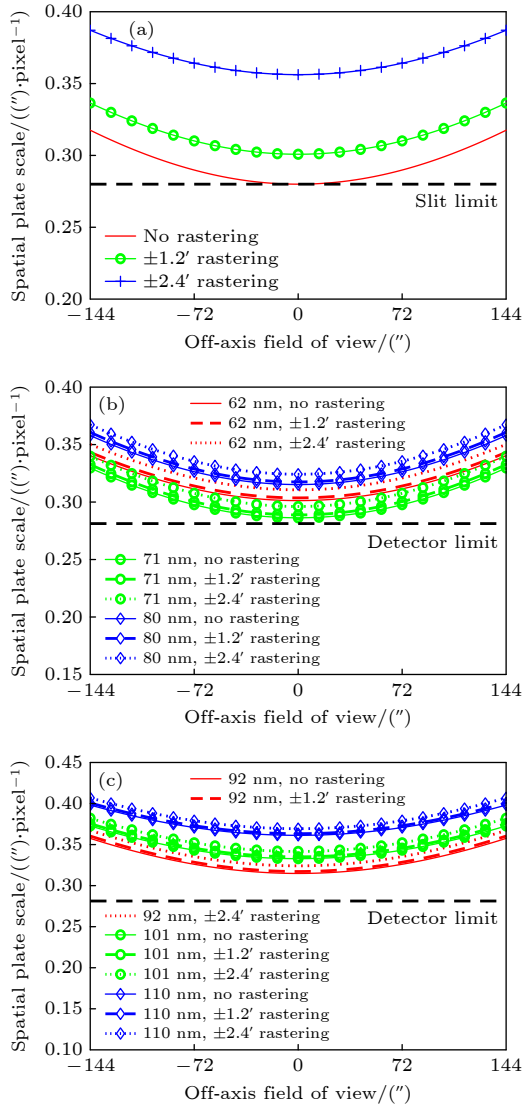


图 9 系统像元空间分辨率评价 (a) 垂直狭缝方向的像元空间分辨率; (b) 62—80 nm 波段平行狭缝方向的像元空间分辨率; (c) 92—110 nm 波段平行狭缝方向的像元空间分辨率

Fig. 9. System spatial plate scale evaluation: (a) Spatial plate scale perpendicular to the slit; (b) spatial plate scale parallel to the slit in 62–80 nm wavelengths; (c) spatial plate scale parallel to the slit in 92–110 nm wavelengths.

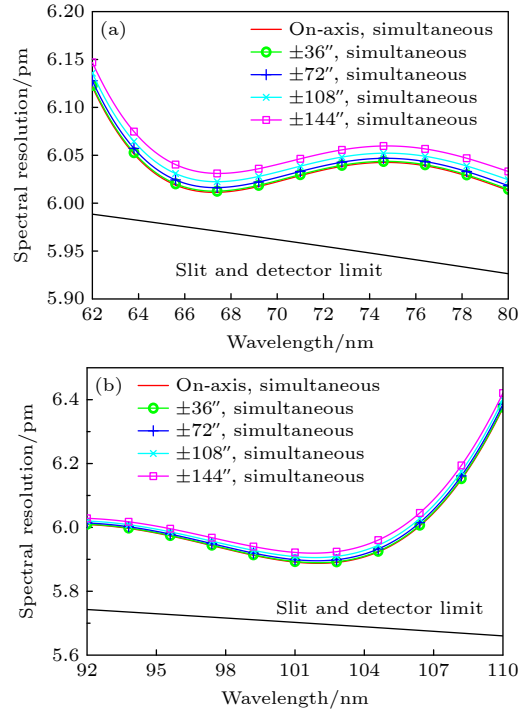


图 10 系统光谱分辨率评价 (a) 62—80 nm 波段的光谱分辨率; (b) 92—110 nm 波段的光谱分辨率

Fig. 10. System spectral resolution evaluation: (a) Spectral resolution in 62–80 nm wavelengths; (b) spectral resolution in 92–110 nm wavelengths.

4.4 反射膜层和有效面积

系统在波长 λ 处的总效率为 $E_{\text{TOT}}(\lambda)$, 有效面积为 $A_{\text{EFF}}(\lambda)$, 其表达式为

$$\begin{cases} E_{\text{TOT}}(\lambda) = R_{\text{film}}^2(\lambda) T_{\text{filter}}(\lambda) \eta_{\text{gra}}(\lambda) QE(\lambda), \\ \eta_{\text{gra}}(\lambda) = \eta_{\text{groove}} \frac{\sin^2(\gamma)}{\gamma^2}, \\ \gamma = m\pi(\lambda_0 - \lambda)/\lambda, \\ A_{\text{EFF}}(\lambda) = A_{\text{ape}} E_{\text{TOT}}(\lambda), \end{cases} \quad (11)$$

式中, $R_{\text{film}}(\lambda)$ 为反射镜和光栅表面膜层反射率; $T_{\text{filter}}(\lambda)$ 为滤光片透过率; $\eta_{\text{gra}}(\lambda)$ 为光栅衍射效率, 包含光栅刻槽效率 η_{groove} ; $QE(\lambda)$ 为探测器量子效率; A_{ape} 为入射孔径的面积, 单位为 mm^2 .

为获得正入射下目标波段较高的反射效率, 在主镜和光栅表面镀膜热压 B_4C 单层膜^[22], 以提供观测波段内最高 0.43 的峰值反射率, 其反射率曲线如图 11(a) 所示. 在第二通道探测器前方位置, 设置厚度为 150 nm 的铝滤光片^[23], 以滤除 92—110 nm 波段内极紫外辐射, 通过滤光轮旋转分别获取 92—110 nm 和 46—55 nm 波段的高光谱数

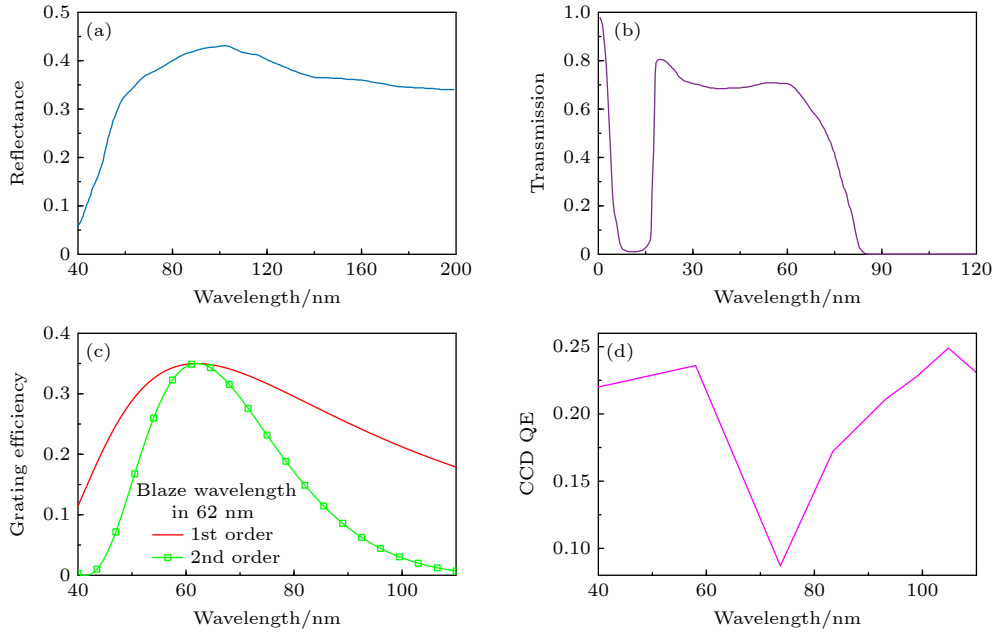


图 11 反射膜层、滤光片、TVLS 光栅效率和探测器量子效率随波长的变化曲线 (a) 热压 B_4C 单层膜的反射率曲线; (b) 厚度为 150 nm 铝滤光片的透过率曲线; (c) 光栅效率; (d) 探测器量子效率
 Fig. 11. Curves of reflective film, filter, TVLS grating efficiency and detector quantum efficiency change with wavelength: (a) Reflectance curve of hot-pressed B_4C single-layer film; (b) transmission curve of Al filter with thickness of 150 nm; (c) grating efficiency; (d) detector quantum efficiency.

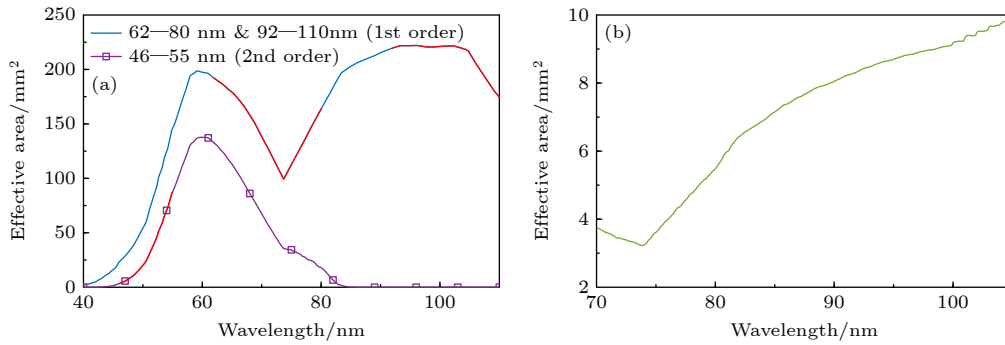


图 12 系统有效面积随波长的变化曲线 (a) 本文设计的系统, 红色加粗的曲线为系统观测波段内的有效面积; (b) SPICE
 Fig. 12. Curves of system effective area change with wavelength: (a) Our design, red bold curves represent the effective area within the observed wavelength range of the system; (b) SPICE.

据, 其透过率曲线如图 11(b) 所示. 图 11(c) 为利用 (11) 式计算获得的 62 nm 闪耀波长下的 TVLS 光栅衍射效率曲线, $\eta_{\text{gra}}(\lambda)$ 在观测波段内的最大值为 0.35; 图 11(d) 为系统采用的带有微通道板 (MCP) 增强的有源像素传感器 (APS)^[12] 的量子效率曲线, 探测器在观测波段内具有最高为 0.25 的量子效率.

图 12(a) 为系统的有效面积曲线. 可见, 系统在 62—80 nm 和 92—110 nm 波段内的峰值有效面积分别为 192 mm^2 和 222 mm^2 , 二级光谱区 46—55 nm 波段内的峰值有效面积为 88 mm^2 . 图 12(b)

为 SPICE 在其工作波段 70.4—79 nm 和 97.3—104.9 nm 内的有效面积曲线. 通过对比, 可知系统在观测波段范围内的有效面积是 SPICE 的 8—22 倍, 系统具有较高的传输效率.

4.5 光谱畸变和空间畸变

光谱 (Smile) 畸变和空间 (Keystone) 畸变是评价太阳紫外成像光谱仪的空间和光谱一致性的重性能指标. 图 13(a) 为不同波长的 Smile 畸变曲线. 可见, Smile 畸变对称于视场中心, 且随波长增大而增大, 所有波长的 Smile 畸变量均小于 $3 \mu\text{m}$,

未超过像元尺寸的 20%。图 13(b) 和图 13(c) 分别为 62—80 nm 和 92—110 nm 波段不同视场的 Keystone 畸变曲线。可见, 在两个波段内的 Keystone 畸变呈现出相同的变化趋势, 均随视场增大而增大, 在最大视场处的 Keystone 畸变量相对于半像高分别小于 0.5% 和 0.6%。仿真模拟结果表明, 系统的光谱和空间畸变均被控制在合理的范围内。

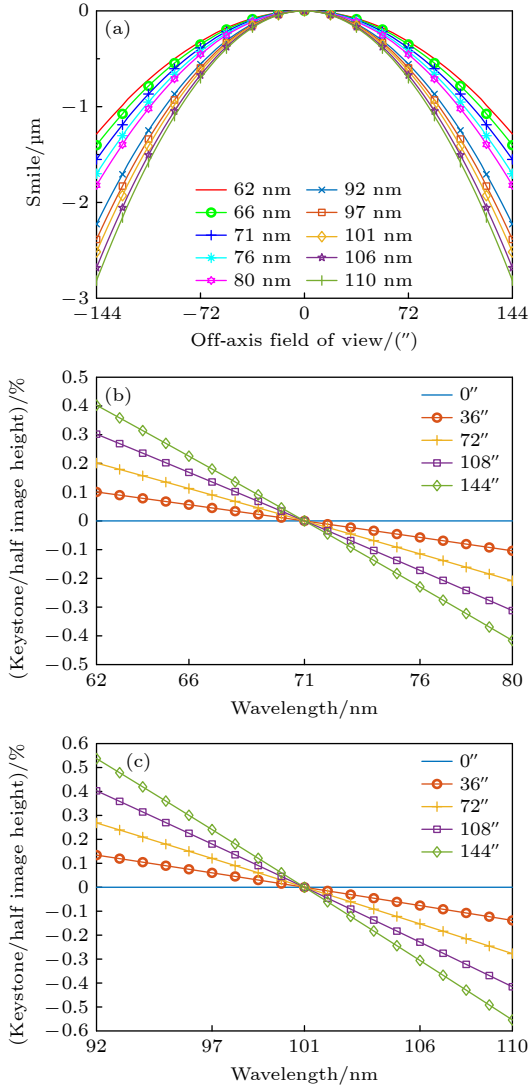


图 13 光谱 (Smile) 畸变和空间 (Keystone) 畸变 (a) 不同波长的 Smile 畸变; (b) 62—80 nm 波段不同视场的 Keystone 畸变; (c) 92—110 nm 波段不同视场的 Keystone 畸变
Fig. 13. Spectral (Smile) distortion and spatial (Keystone) distortion: (a) Smile distortion of different wavelengths; (b) Keystone distortion of different field of view in 62—80 nm wavelengths; (c) Keystone distortion of different field of view in 92—110 nm wavelengths.

4.6 公差分析

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 1000 次, 通过反复迭代, 最终系统关键元件的公差容限如表 3 所列. 在该公差容限下, 正态分布统计的结果表明在工作波长 62, 71, 80, 92, 101 和 110 nm 处的像面弥散斑 RMS 半径有 90% 的概率均在 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。

表 3 系统关键元件的公差容限

Table 3. Tolerance limits of key components of the system.

Component	Tolerance items	Values of tolerances
Primary mirror	Surface irregularity (RMS)	$\lambda/20$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)
	Conic	± 0.005
	Radius of curvature/mm	± 3.6
	Microroughness (RMS)/nm	0.4
	Element decenter/ μm	± 50
TVLS grating	Element tilt/($''$)	± 15
	Substrate irregularity (RMS)	$\lambda/30$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)
	Line density/(groove- mm^{-1})	± 0.65
	Radius of curvature/mm	± 0.3
	Microroughness (RMS)/nm	0.8
Slit assembly	Element decenter/ μm	± 20
	Element tilt/($^{\circ}$)	± 60
	Element tilt/($^{\circ}$)	± 0.03

5 讨论与未来应用

相比国外已发射仪器, 本文设计的系统在技术指标方面有较高的先进性. 系统相比 EIS, SPICE 等先驱仪器实现了更宽的光谱范围覆盖, 二级光谱 46—55 nm 波段包含形成温度约 0.5 MK 的高过渡区谱线 Ne VII 46.52 nm, 该温度范围对太阳风起源、日冕加热问题的研究非常关键, 而过往仪器对其探测较少. 与 SUMER, CDS 等仪器相比, 系统具有更优异的空间和光谱分辨性能, 在两个通道内的空间分辨率均优于 0.8'', 光谱分辨率均优于 0.007 nm, 能够满足太阳物理学界对亚角秒量

级的高空间分辨率和高光谱分辨率观测的迫切需要。

国内在极紫外光谱探测领域研究基础较为薄弱, X-EUVI 和 SUTRI 的成功实践, 使中国在窄波段多层膜反射镜、极紫外滤光片、高性能极紫外探测器等核心部件研制方面取得了一定进展, 然而在极紫外凹面衍射光栅 (包括非球面、变线距等光栅类型)、宽波段极紫外多层膜、高性能大口径超光滑反射镜等关键元件的加工及检测方面的研究基础还相对薄弱, 是当前制约我国极紫外光谱成像仪器研制的主要障碍, 也是后续亟需开展的关键技术研究方向。

尽管目前国内尚无一款实际在轨运行的太阳极紫外成像光谱仪载荷, 但近几年国内提出的一些空间太阳探测计划中都有相应的极紫外计划载荷。本文关于具有亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪设计的研究, 可为我国未来实施自主空间太阳探测以及开展首台极紫外光谱探测设备研制提供理论层面的技术支撑, 对未来我国空间太阳探测计划 (包括“环日全景探测任务”^[24]、太阳爆发抵近探测^[25]、“太阳立体观测”^[26,27]、“太阳极轨天文台”^[28]等) 中的极紫外载荷遴选也具有重要的参考和潜在应用价值。

6 结 论

本文提出并设计了一款具有亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪, 系统实现了 62—80 nm 和 92—110 nm 波段的消像散光谱成像, 狭缝方向和扫描方向视场均为 $\pm 2.4'$ 。性能评价结果表明, 本文设计的系统能够提供对太阳爆发活动的高空间分辨率 (优于 $0.8''$)、高光谱分辨率 (优于 0.007 nm) 的近似全年无间断连续观测, 光谱畸变和空间畸变均得到良好控制, 且具有合理的公差容限, 对我国未来极紫外成像光谱仪型号研制具有借鉴意义。

参考文献

- [1] Yang M F, Dai S W, Wang Y, Zhu C L, Yang S B, Zhang Y C 2022 *Chin. Space Sci. Technol.* **42** 1 (in Chinese) [杨孟飞, 代树武, 王颖, 朱成林, 杨尚斌, 张也驰 2022 中国空间科学技术 **42** 1]
- [2] Yan Y H, Deng Y Y, Gan W Q, Ding M D, Tian H, Zhu X S 2023 *Chin. J. Space Sci.* **43** 199 (in Chinese) [颜毅华, 邓元勇, 甘为群, 丁明德, 田晖, 朱小帅 2023 空间科学学报 **43** 199]
- [3] Chen P F 2021 *Sci. Sin. -Phys. Mech. Astron.* **51** 119632 (in Chinese) [陈鹏飞 2021 中国科学: 物理学 力学 天文学 **51** 119632]
- [4] Bai X Y, Tian H, Deng Y Y, Chen Y J, Hou Z Y, Yang Z H, Zhang Z Y, Duan W, Li W X, Guo S F 2023 *Chin. J. Space Sci.* **43** 406 (in Chinese) [白先勇, 田晖, 邓元勇, 陈亚杰, 侯振永, 杨子浩, 张志勇, 段帷, 李文显, 郭思璠 2023 空间科学学报 **43** 406]
- [5] Domingo V, Fleck B, Poland A I 1995 *Sol. Phys.* **162** 1
- [6] Wilhelm K, Axford W I, Curdt W, Gabriel A H, Grewing M, Huber M C E, Jordan S D, Kuehne M, Lemaire P, Marsch E 1995 *Sol. Phys.* **162** 189
- [7] Harrison R A, Sawyer E C, Carter M K, et al. 1995 *Sol. Phys.* **162** 233
- [8] Kosugi T, Matsuzaki K, Sakao T, et al. 2007 *Sol. Phys.* **243** 3
- [9] Culhane J L, Harra L K, James A M, et al. 2007 *Sol. Phys.* **243** 19
- [10] Brosius J W, Daw A N, Rabin D M 2014 *Astrophys. J.* **790** 1
- [11] Müller D, St Cyr O C, Zouganelis I, et al. 2020 *Astron. Astrophys.* **642** A1
- [12] Anderson M, Appourchaux T, Auchère F, et al. 2020 *Astron. Astrophys.* **642** A14
- [13] Marirrodriga C G, Pacros A, Strandmoe S, et al. 2021 *Astron. Astrophys.* **646** A121
- [14] Li C, Fang C, Li Z, et al. 2022 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **65** 289602
- [15] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. 2019 *Res. Astron. Astrophys.* **19** 156
- [16] Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, Zhu A J, Lin M Y, Sun L, Chen L, Xu N 2022 *Adv. Atmos. Sci.* **39** 1
- [17] Chen B, Zhang X X, He L P, et al. 2022 *Light-Sci. Appl.* **11** 329
- [18] Bai X Y, Tian H, Deng Y Y, et al. 2023 *Res. Astron. Astrophys.* **23** 065014
- [19] Tian H 2017 *Res. Astron. Astrophys.* **17** 3
- [20] Poletto L, Thomas R J 2004 *Appl. Opt.* **43** 2029
- [21] Poletto L, Gasparotto A, Tondello G, Thomas R J 2004 *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems* Glasgow, United Kingdom, June 21–25, 2004 p898
- [22] Larruquert J I, Keski-Kuha R A M 2000 *Appl. Opt.* **39** 1537
- [23] Wang L H, He L P, Wang X K, Ni Q L, Chen B 2008 *Opt. Precis. Eng.* **16** 42 (in Chinese) [王丽辉, 何玲平, 王孝坤, 尼启良, 陈波 2008 光学精密工程 **16** 42]
- [24] Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. 2020 *Sci. Sin. Technol.* **50** 1243 (in Chinese) [汪毓明, 季海生, 王亚敏, 等 2020 中国科学: 技术科学 **50** 1243]
- [25] Liu J, Huang S J, Li Y, et al. 2021 *Chin. J. Space Sci.* **41** 183 (in Chinese) [林隽, 黄善杰, 李燕, 等 2021 空间科学学报 **41** 183]
- [26] Ji H S, Wang Y M, Wang J X 2019 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **49** 059605 (in Chinese) [季海生, 汪毓明, 汪景琇 2019 中国科学: 物理学 力学 天文学 **49** 059605]
- [27] Yang M F, Wang J X, Wang C, et al. 2023 *Chin. Sci. Bull.* **68** 859 (in Chinese) [杨孟飞, 汪景琇, 王赤, 等 2023 科学通报 **68** 859]
- [28] Deng Y Y, Zhou G P, Dai S W, et al. 2023 *Chin. Sci. Bull.* **68** 298 (in Chinese) [邓元勇, 周桂萍, 代树武, 等 2023 科学通报 **68** 298]

Optical design of sub-angular second spatially resolved solar extreme ultraviolet broadband imaging spectrometer*

Huang Yi-Fan¹⁾ Xing Yang-Guang^{1)†} Shen Wen-Jie¹⁾ Peng Ji-Long²⁾
Dai Shu-Wu³⁾ Wang Ying³⁾ Duan Zi-Wen¹⁾ Yan Lei⁴⁾
Liu Yue¹⁾ Li Lin¹⁾

1) (*School of Optics&Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China*)

3) (*Beijing Institute of Spacecraft Systems Engineering, Beijing 100094, China*)

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

(Received 13 September 2023; revised manuscript received 21 October 2023)

Abstract

The slit imaging spectrometer is one of the important tools for solar extreme ultraviolet (EUV) spectral imaging detection. However, at present, there is no such instrument load in China. The research of solar physics and space weather in the field of EUV spectral diagnosis mainly depends on foreign instrument data, which seriously restricts the development of related disciplines. The spectral imaging instruments that have been launched internationally have only a spatial resolution of $2''$, and it is difficult to observe the core characteristics of the plasma related to the coronal heating mechanism predicted by the theoretical model. In order to better understand the coupling process between different layers of the sun's atmosphere, solar physics research requires the observed data with wider spectral coverage. In light of this, we propose and design a sub-angular second spatially resolved solar extreme ultraviolet broadband imaging spectrometer operating in a band range of 62–80 nm and 92–110 nm. Compared with the existing instruments, the system can achieve high spatial resolution and spectral resolution, and wide spectral range coverage. Performance evaluation results indicate that the imaging spectrometer's spatial resolutions in both bands are better than $0.4''$, and their spectral resolutions are both better than 0.007 nm, with spectral imaging quality approaching the diffraction limit. The system designed in this work holds significant reference value for developing the first Chinese space-based solar EUV spectroscopic instrument in the future.

Keywords: solar extreme ultraviolet, optical design, imaging spectrometer, toroidal varied line-space grating

PACS: 95.85.Mt, 42.15.Eq, 07.60.Rd, 42.79.Dj

DOI: [10.7498/aps.73.20231481](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231481)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62205027, 42274208) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA15018300).

† Corresponding author. E-mail: xyg@bit.edu.cn



亚角秒空间分辨的太阳极紫外宽波段成像光谱仪光学设计

黄一帆 邢阳光 沈文杰 彭吉龙 代树武 王颖 段紫雯 闫雷 刘越 李林

Optical design of sub-angular second spatially resolved solar extreme ultraviolet broadband imaging spectrometer

Huang Yi-Fan Xing Yang-Guang Shen Wen-Jie Peng Ji-Long Dai Shu-Wu Wang Ying Duan Zi-Wen Yan Lei Liu Yue Li Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 039501 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231481

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231481>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太阳极紫外He II 30.4 nm谱线层析成像及其光谱数据反演

Tomographic imaging for solar extreme ultraviolet He II 30.4 nm and spectral data inversion

物理学报. 2022, 71(15): 159501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220084>

光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统设计与实验

Design and experiment of light field shaping system for three-dimensional extended light source used in photoacoustic spectrometer

物理学报. 2021, 70(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210691>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory

物理学报. 2019, 68(13): 134201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190299>

集成化导光板下表面微棱镜二维分布设计

Two-dimensional distribution design of micro-prism for partial integrated light guide plate

物理学报. 2019, 68(3): 038502 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181684>

基于双随机相位编码的局部混合光学加密系统

Local hybrid optical encryption system based on double random phase encoding

物理学报. 2020, 69(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200478>