

引用格式: WEI Fei, ZHANG Xuanyi, PENG Songwu, et al. Solar FUV/UV Spectrometer Onboard High Altitude Balloon Flight in the Near Space[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1222002

韦飞, 张轩谊, 彭松武, 等. 临近空间太阳远紫外-紫外光谱仪设计[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1222002

临近空间太阳远紫外-紫外光谱仪设计

韦飞^{1,2,3,4}, 张轩谊^{1,2,3,4}, 彭松武^{1,3,4}, 李文¹, 李春⁵, 冷双^{1,3,4}, 冯鹏远^{1,3,4}

(1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190)

(4 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190)

(5 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 设计了利用高空气球平台搭载到达临近空间底部区域的太阳远紫外-紫外光谱仪, 对 170~400 nm 波段的太阳远紫外-紫外辐射进行高分辨光谱探测, 在该区域获得波长小于 280 nm 的远紫外光谱数据。该远紫外-紫外光谱仪采用改进的罗兰圆光路设计实现紧凑、轻量化、宽波段和高光谱分辨率, 并通过 Zemax 仿真软件对光路设计进行了光谱分辨率、波段覆盖性和杂散光抑制等关键指标的仿真分析, 验证设计的可实现性及其对科学研究需求的满足度。

关键词: 临近空间; 太阳; 高分辨率; 远紫外; 紫外; 光谱仪

中图分类号: P35

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215012.1222002

Solar FUV/UV Spectrometer Onboard High Altitude Balloon Flight in the Near Space

WEI Fei^{1,2,3,4}, ZHANG Xuanyi^{1,2,3,4}, PENG Songwu^{1,3,4}, LI Wen¹, LI Chun⁵, LENG Shuang^{1,3,4}, FENG Pengyuan^{1,3,4}

(1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China)

(4 Key Laboratory of Science and Technology on Space Environment Situational Awareness, CAS, Beijing 100190, China)

(5 Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A high spectral-resolution solar Far-Ultraviolet/Ultraviolet (FUV/UV) spectrometer carried by high-altitude balloons to the bottom region of the near space was designed, which will historically fill the data gap in wavelength shorter than 280 nm that deposits energy in this region. The solar FUV/UV spectrometer is based on improved Roland circle optics. In order to adapt to the requirements of high-altitude balloon platforms, it has a compact design for the optics to reduce the dimensions of the instrument, to suppress the spherical aberration of the optical system, and to improve the quality of the spectrum. The optical performance was simulated by the Zemax software to analyze the spectral resolution, wavelength coverage, and stray light suppression.

Key words: Near space; Sun; High spectral resolution; Far-ultraviolet; Ultraviolet; Spectrometer

OCIS Codes: 220.4830; 120.4570; 120.4640

基金项目: 中国科学院战略先导科学专项(No. XDA17010201), 北京市科技委培育项目(No. Z201100003520005)

第一作者(通讯作者): 韦飞(1977—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为太阳 X 射线和极紫外辐射探测技术。Email: qoyjcn@126.com

收稿日期: 2021-06-31; 录用日期: 2021-08-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

临近空间通常是指从对流层顶部到人造卫星低轨道高度之间的空间区域,其高度范围约从 20 km 到 200 km。临近空间从平流层顶外延到热层、电离层部分区域,是日地系统之间能量与物质耦合的重要构成环节。从 X 射线到极紫外的太阳高能电磁辐射在穿越地球上层大气的过程中,在距离地表 80 km 以上的区域已几乎被完全吸收,远紫外、紫外至可见光波段的太阳光谱成分,则从完全被吸收逐渐过渡到可到达地表。来自太阳的远紫外-紫外(Far-Ultraviolet/Ultraviolet, FUV/UV)辐射是维持临近空间温度、热力学动态平衡的最主要能量来源之一,也是对上层大气产生电离、促进光化学反应的最主要能量来源。

临近空间是空天飞行器飞越、再入的必经之路,其底部区域(20~30 km)也是地表生态系统与外空环境之间的重要过渡区域。临近空间的温度在昼夜、垂直高度之间差异巨大,大气密度和成分是如何变化,在太阳耀斑爆发时是否由于受到猛烈的冲击而导致环境出现显著的短期响应,临近空间如何受到人类活动的影响等这些问题都是近年来受到深度关注的科学热点,要解开这些重要的科学问题,必须在临近空间区域从顶部至底部开展多层次的太阳远紫外-紫外辐射光谱探测,揭示其能量输入的变化情况,以掌握其基本知识、规律并提高预报能力。

探测波段的选择是临近空间太阳远紫外-紫外测量必须着重考虑的因素,以准确了解在该区域沉积的太阳能量。历史上极度缺乏连续、高实时性的太阳极短波长电磁辐射的探测数据,TOBISKA W K 构建了一个覆盖软 X 射线、极紫外、紫外至红外波段的太阳辐射模型,并分析了上层大气对太阳辐射的吸收效应,初步建立了太阳高能电磁辐射光谱与其在地球上层大气能量沉积的高度对应关系^[1]。MEIER R R 基于物理模型分析了 120~310 nm 波段的太阳高能电磁辐射在临近空间区域的光谱-吸收高度关系,预测了该波段范围的太阳电磁辐射可到达的大气高度^[2]。根据 MEIER R 的估算,在 170~280 nm 波段有少量谱线可透过上层大气吸收窗口到达临近空间底部区域,而 280~320 nm 的紫外辐射在该区域将被显著吸收。从 320 nm 外延到 400 nm,可对比临近空间太阳紫外光谱与地表探测数据的差异,以及探索夜间或背阳条件下是否存在一些敏感的氮氧化物激发的光谱信息。

为了研制适用于高空气球的太阳远紫外-紫外光谱仪,必须对星载仪器进行小型化、轻量化设计,目标重量小于 8 kg,仪器尺寸小于 280 mm(宽)×380 mm(高)×400 mm(长),同时具有 170~400 nm 宽波段覆盖能力和 0.1 nm 高光谱分辨能力。通过高空气球在距离地面 10 km 至 50 km 高度的飞行试验,太阳远紫外-紫外光谱仪可探测临近空间不同高度的光谱吸收情况,探索太阳耀斑爆发时远紫外-紫外辐射在临近空间区域的光谱特性,结合临近空间环境大气成分、密度、风速等原位探测数据,深度刻画临近空间天气,发现其在太阳风暴冲击下的响应特性。

1 科学目标与仪器设计

1.1 科学目标

为了研究临近空间对太阳风暴的响应,太阳远紫外-紫外光谱仪的科学目标主要是

1) 探测 170~400 nm 太阳远紫外-紫外光谱,获取其时变特性和垂直高度光谱特性,研究太阳辐射在临近空间沉积的能量;

2) 探测 170~280 nm 太阳远紫外辐射光谱的时间变化,探索在临近空间感知太阳耀斑活动的可行性,检验相关物理模型准确性。

通过探索太阳活动第 24~25 周临近空间环境太阳远紫外-紫外辐射水平和大气参数的短期变化特征,为临近空间科学研究和开发应用提供第一手观测资料。

1.2 仪器特点与技术指标

国际上对太阳远紫外-紫外辐射的探测活动以卫星探测为主,地面探测设备无法测量到波长短于 300 nm 的太阳紫外光谱。有别于高空气球有限的负载能力,卫星平台允许载荷具有较大的重量、尺寸,一些国外卫星搭载的太阳远紫外-紫外光谱仪的探测波段、光谱分辨率、重量资源情况见表 1^[3~7]。

太阳远紫外-紫外光谱仪具有高光谱分辨率和高灵敏度响应能力,光谱仪的主要性能指标如表 2 所示。

表1 国际主要星载/球载太阳远紫外-紫外光谱仪性能参数对比
Table 1 The specifications of the solar FUV-UV spectrometers flight before

Instrument/Satellite	Luanche date	Wavelength/nm	Wavelength resolution/nm	Weight/kg
V2Rocket-SUVS	1946	300~	/	/
SOLSPEC	1983	160~365	1	8
UARS-SUSIM	1991.9	120~400	0.1~5	135
SORCE:SOLSTICEII	2003.1	115~320	0.1~1	36

表2 太阳远紫外-紫外光谱仪性能参数
Table 2 The performance requirements for the solar FUV-UV spectrometer onboard a near-space balloon

Parameter	Value
Wavelength band/nm	170~400
FUV/UV flux	$20\sim 2\times 10^5$ Photons/(pixel \cdot s $^{-1}$)
Field of view	$\pm 1^\circ$
Spectral resolution/nm	0.1
Cadence/s	1

太阳远紫外-紫外光谱仪主要由光路系统和探测器组成,光路系统基于罗兰圆光路设计,实现光谱分光。罗兰圆光路的特点是不同入射角的光线通过狭缝后能够保持光谱位置的稳定,适用于运动和姿态变化的高空气球平台;同时在指向偏离太阳的区域时,视场角内的大气散射、激发的光谱稳定在固定位置,有利于对大气散射、激发光谱进行识别和分析,因此优先采用基于罗兰圆光路的光学设计。

1.3 光路设计

太阳远紫外-紫外光谱仪的探测波段宽,光谱分辨率高,如果使用简单的罗兰圆光路,可预见170~400 nm的光谱将分布在非常大的空间尺度里,探测器的尺寸和仪器体积将非常庞大。为了使得仪器设计更为紧凑,太阳远紫外-紫外光谱仪对基本罗兰圆光路进行了改进和创新性尝试,入射臂光路进行反射折叠,出射臂光路在反射折叠的基础上进行光谱聚焦,降低对探测器尺寸的要求。太阳远紫外-紫外光谱仪的光路系统设计如图1所示。

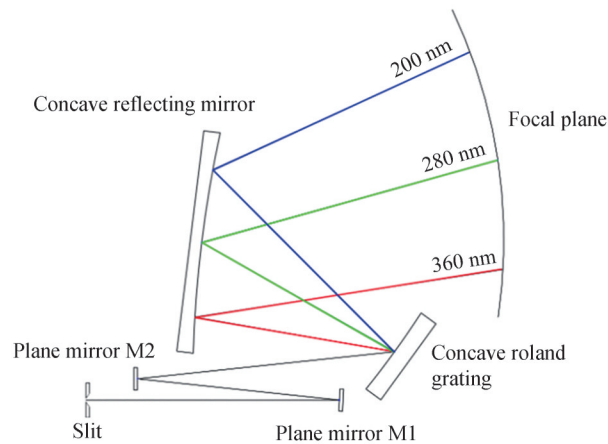


图1 光谱仪光学系统结构图
Fig. 1 The optics designed for the solar FUV-UV spectrometer

图1的S为入射狭缝;M1、M2为平面反射镜;G为线密度为2 700 lp/mm的凹面光栅;C为凹面反射镜;P为光谱接收像面。罗兰圆凹面光栅选择HORIBA公司的I型全息凹面光栅,基底材料为微晶玻璃,反射面镀铝,具有良好的温度稳定性和反射效率。光路系统的参数设计如表3所示。

远紫外-紫外光谱接收传感器由6片1×2 048像元的硅半导体传感器沿光谱接收像面拼接而成,考虑到170~400 nm太阳远紫外-紫外辐射在波段范围内的强度具有2个数量级以上的差异,以及硅半导体传

表3 光路系统主要参数

Table 3 The parameters designed for the optic components

Parameter	Value
Slit	60 μm \times 10 mm
Incidence optic length	381.50 mm
Concave roland grating	Aperture: 50.8 mm \times 50.8 mm
	Concave radius: R498.1 mm
	Line density: 2 700 lp/mm
Reflecting mirror	Aperture: 160 mm \times 60 mm
	Concave radius: R650 mm
Detectors	Number of pixels: 1 \times 2 048
	Pixel size: 500 μm \times 14 μm
	Full-well capacity: 200ke ⁻
	Noise rate: <20e ⁻ /pixel/s (-40 $^{\circ}$ C)
Detectors	Power for cooler: 6W (Maxim)
	Number of pixels: 1 \times 2 048
	Pixel size: 200 μm \times 14 μm
	Full-well capacity: 80 ke ⁻
Detectors	Noise rate: <80e ⁻ /pixel/s (+25 $^{\circ}$ C)

感器在该波段内光谱效率的不均匀性,对 170~210 nm 波段的远紫外光谱接收传感器采用 2 片热电制冷型的背照式线阵 CCD,对 210~400 nm 波段的远紫外-紫外光谱采用 4 片线阵 CMOS 传感器;CCD 和 CMOS 传感器均由日本滨松公司研制。由于硅半导体传感器边沿存在支撑结构等非探测灵敏区,为了实现连续光谱探测,使用两套完全相同的光路,每个光路在光谱接收像面处设置 3 个线阵探测器,2 套光路对应的探测器沿光谱分布方向交错放置,实现 170~400 nm 波段光谱完整覆盖。CCD 和 CMOS 传感器在低温状态下工作可降低噪声水平,太阳远紫外-紫外光谱仪在临近空间底部区域工作,环境温度约 -70 $^{\circ}$ C,光谱仪背阳面作为 CCD 和 CMOS 传感器的辐冷面,CMOS 传感器的工作温度可达到约 -20 $^{\circ}$ C 的低温状态;CCD 传感器在被动辐冷的基础上结合自身的热电制冷模块,可达到约 -40 $^{\circ}$ C 的低温状态。

1.4 光谱响应与分辨率设计

光谱仪的入射狭缝调节光谱强度,同时对光谱分辨率的设计也具有重要影响。太阳辐射光谱强度分布可根据 Solar2000 模型计算,太阳远紫外-紫外辐射透过上层大气后,可能会伴随光路附近的一部分臭氧、氮氧化物等成分光化学反应产生的激发谱,共同入射到光谱仪窗口,仪器的光谱响应曲线根据表 3 所述光学元件的狭缝宽度、反射效率和探测器量子效率进行初步估算,如图 2 所示,实线为根据 Solar2000 模型计算 1997 年太阳平均 FUV/UV 光谱,虚线为仪器光谱响应评估结果,即太阳辐射光谱与设想的部分大气激发光谱叠加效果,可以看出不同波长的光谱强度变化达到 4 个数量级左右。

光谱仪的基础色辨能力 $\Delta\lambda_{gr}$ 取决于入射光束在光栅表面照亮的栅格条纹数目 N

$$\Delta\lambda_{gr} = \frac{\lambda}{N} \quad (1)$$

在这里太阳光线并不是作为一个穿过狭缝的平行光来进行考虑,而是在视场内的一个有限面积的面光源。太阳远紫外-紫外光线来自全日面,在临近空间对全日面的探测张角约为 0.53 $^{\circ}$ 。以张角 θ 入射的光线经狭缝后照射到凹面光栅上,照亮的光栅栅格数 N 为

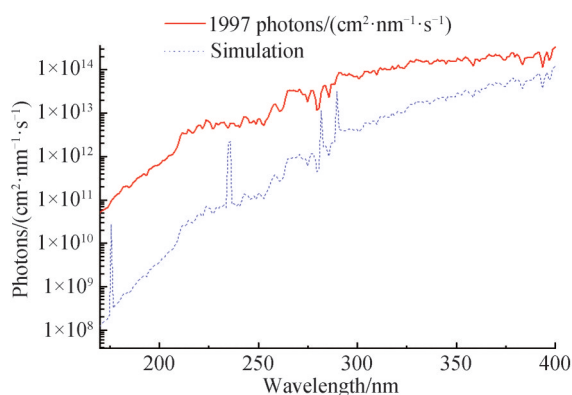


图2 太阳远紫外-紫外光谱强度估算

Fig. 2 The spectrum estimated by the physical models

$$N \approx M \times \frac{2L_1 \tan(\theta/2)}{\cos \alpha} \quad (2)$$

式中, M 为光栅线密度, α 为罗兰圆光路中的光线入射角。当 $M=2\ 700$ lp/mm, L_1 、 α 参数值由表2设计值给出, 由式(2)可知 $N=12\ 821$; 结合式(1)可知, 光谱仪的基础分辨率本领在探测波段范围内满足 0.1 nm 光谱分辨率的要求, 最终的分辨率本领受到狭缝宽度、谱斑尺寸和像元尺寸的关系、焦面偏差、安装偏差等因素影响, 可通过 ZEMAX 软件建模进行仿真分析和评估, 给出偏差容许范围。

2 主要性能仿真验证

2.1 光路仿真分析

探测波段的覆盖性、光谱波长的空间位置和光谱分辨能力是光谱仪的重要性能指标。根据光路原理和表3确定的设计参数, 利用 ZEMAX 软件建立光路模型, 对光路系统进行仿真。通过 ZEMAX 仿真对探测波长的覆盖性和光谱位置的确定关系如图3所示, 图3中, 入射光线覆盖全日面, 在临近空间探测张角约为 $\pm 0.5^\circ$, 所示波长由上到下依次为 170 nm、220 nm、280 nm、340 nm、400 nm, 170~400 nm 的光谱在接收像面分布的尺度小于 172 mm, 即 6 个 2 048 像元传感器灵敏区拼接的长度。

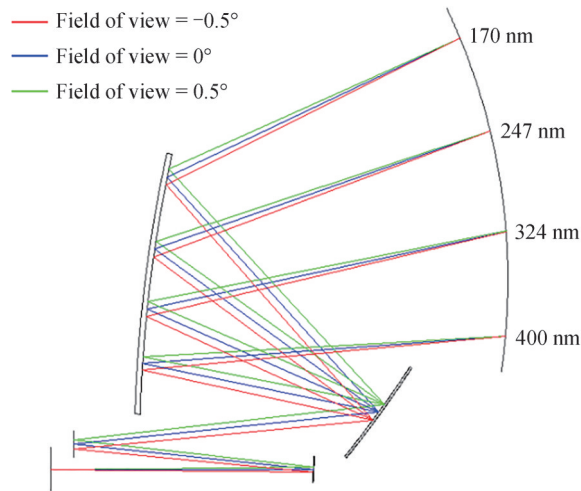


图3 光学系统仿真光路图
Fig. 3 The simulation model of the optics by ZEMAX

在宽波段光谱仪中, 由于谱面分布的尺寸很大, 单一探测器无法覆盖全部光谱, 而且在实际仪器中, 探测器为平面器件, 与光谱面的面形差异大, 因此, 使用多片一维阵列硅半导体探测器沿球面拼接成接收面。光路系统固有像差和平面探测器带来的偏差可通过 ZEMAX 仿真模型进行评估。图4为利用 ZEMAX 软件

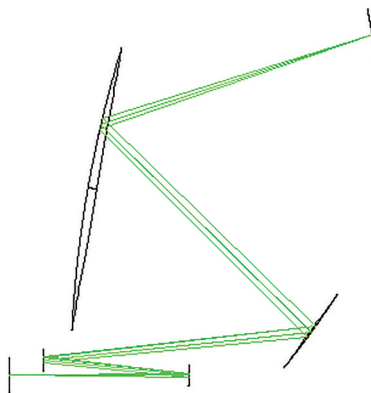


图4 在 ZEMAX 仿真模型中用 2.8 cm 实际尺寸的平面探测器放置于谱面接收位置, 图示探测器为实际的 1/6 单元
Fig. 4 A plane detector is placed for the simulation purpose, the detector in this figure shows 1/6 of the sensors for the full wavelength range

建立的光路模型,光学元件参数与表3设计值一致,光谱接收面与实际探测器一致,即 $500\ \mu\text{m}\times 2.8\ \text{cm}$ 平面,基于该模型进行光路性能仿真分析。

要区分两个相近波长的光谱成分,像元的采样周期应大于光谱的空间周期2倍以上,即2个可分辨波长的极大值所占像元数应大于3个,即谱线中心距离大于 $42\ \mu\text{m}$ 。图5所示为通过ZEMAX仿真波长分别为289.8 nm和289.9 nm的双色光束经光路系统后在接收像面获得的点列图。在本文设计的光路系统中,满足中心波长间隔大于 $42\ \mu\text{m}$ 条件的分辨率率为0.08 nm。

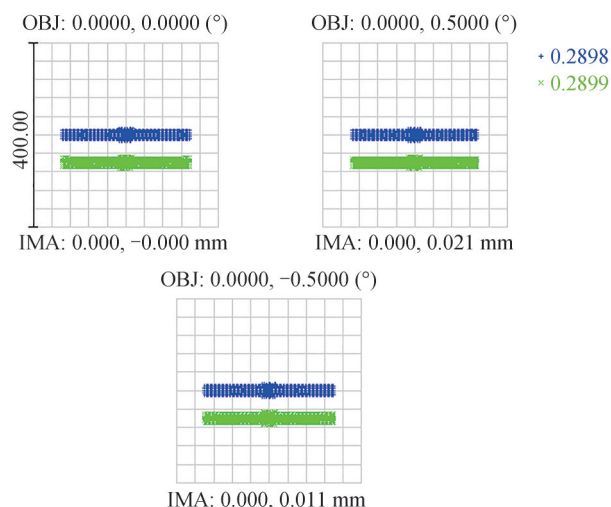


图5 点列图

Fig. 5 Spot diagram

光路系统中加入凹面反射镜可折叠出射光路,减小仪器尺寸,同时可以改善I型全息凹面光栅带来的较大球差,减小弧矢像面的离焦量。图6和图7分别为未加入凹面反射镜时罗兰圆像面处的波前图及加入凹面反射镜后像面处的波前图。波前的改善有利于抑制光谱沿狭缝方向的色散,这种改善对于长线度的一维阵列的平面探测器而言是必要的。

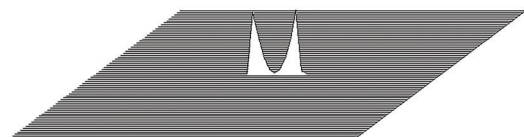


图6 未加入凹面反射镜的波前图
Fig. 6 The wave-front of the optics without spectrum focusing mirror

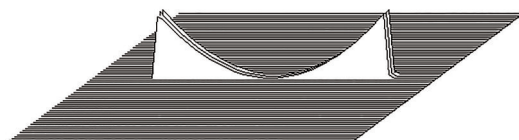


图7 加入凹面反射镜后的波前图
Fig. 7 The wave-front of the optics with spectrum focusing mirror

2.2 杂散光抑制

为了防止高空气球反光以及大气散射光进入光学系统,在入射狭缝前设置一体化多个光阑。本文所述太阳紫外光谱仪探测视场角设计为 $\pm 1^\circ$,并配置了二维对日指向转台,指向精度优于 0.5° ,稳定精度优于 $0.1^\circ/\text{s}$,跟瞄角速度优于 $20^\circ/\text{s}$;一体化光阑内设置杂散光吸收反射片,保证视场范围外的光线在经过光阑后90%以上被滤除,一体化光阑的设计如图8所示。

入射光经一体化光阑和滤光片后,光学系统内杂散光已得到部分抑制,此外还需对零级衍射光进行吸收处理。为此在光栅的零级衍射方向设置光线吸收阱,吸收阱入口的底部设置偏转反射镜,避免部分光线未经充分吸收从入口逃逸;吸收阱内部设置多层反射吸收栅网,以增强吸收效果。

为适应宽波段工作需要,太阳远紫外紫外光谱仪采用大倾角入射和-1级光谱采样设计,+1级光谱的最大波长受到光栅衍射公式 $d\sin\theta=k\lambda$ ($k=1, d=1\times 10^6/2700, \theta=42^\circ$)的制约,最大波长为247.8 nm。波长小于247.8 nm的太阳辐射在普通材料表面很难发生反射,可通过光栅基座上延的挡板吸收,避免直接入射到探测器。

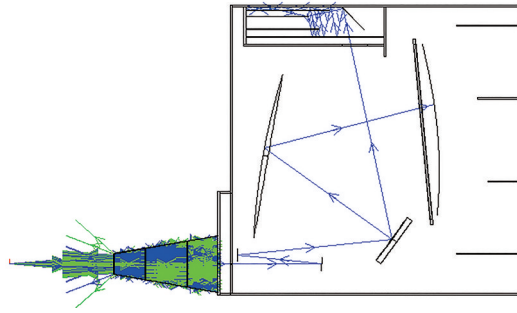


图8 杂散光抑制及零级光斑吸收阱设计

Fig. 8 The simulation of stray-light suppress and the trap for 0-order spot

2.3 高次谐波抑制

根据光栅衍射公式,170~200 nm 较短波长的2级极大值与340~400 nm 成分的1级极大值具有相同的衍射角,如图9所示。340~400 nm 波段探测数据存在来自短波成分的干扰。为了解决高次谐波干扰,在此波段的探测器入射窗口前设置滤光片,型号选用Thorlabs公司的增透膜FGS900-A带通滤光片,其可透过波段为310 nm~700 nm。图10为滤光片透过率曲线。

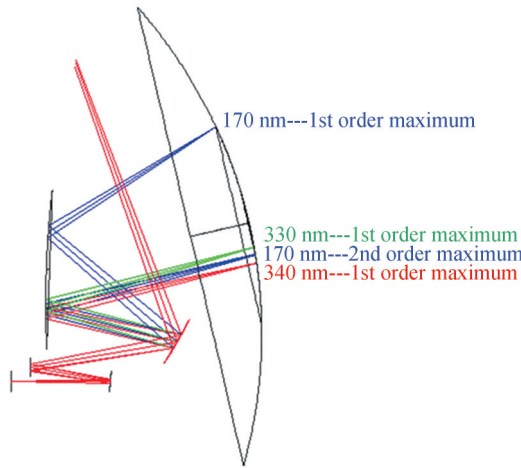


图9 高次谐波污染仿真分析

Fig. 9 The higher-order diffraction of shorter-wavelength spectrum overlapped with the first-order of the longer-wavelength spectrum

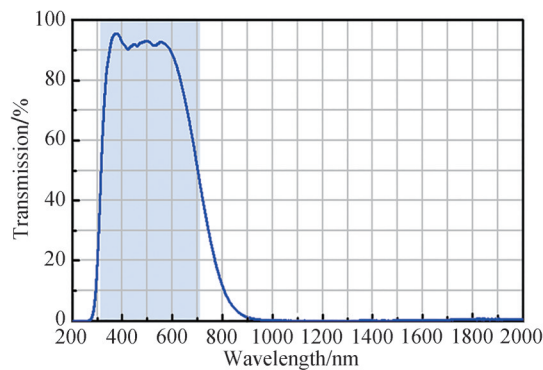


图10 滤光片透过率曲线

Fig. 10 The transmission efficiency of a band-pass wavelength filter provided

3 结论

本文设计了一款结构紧凑、具有宽波段覆盖能力和高光谱分辨率的太阳远紫外-紫外光谱仪,根据光路

系统设计及其关键参数,给出了杂散光抑制、高次谐波抑制设计方法。计算和仿真分析了光谱响应、波段覆盖性、光谱分辨率本领等关键技术指标,实现 170~400 nm 波段的太阳远紫外-紫外光谱探测,光谱分辨率优于 0.1 nm。

参考文献

- [1] TOBISKA W K. Second generation space environment forecasting for satellite and ground system operations [C]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno Nevada, 2004.
- [2] MEIER R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere [J]. *Space Science Reviews*, 1991, 58: 1-185.
- [3] TOBISKA W K. Measurement and modeling of solar EUV/UV radiation [J]. *Physics and Chemistry of The Earth*, 2000, 25(5-6): 371-374.
- [4] MARKERT T. H. Solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus G [J]. *Optical Engineering*, 1975, 14(4): 323-331.
- [5] THUILLIER G, HARDER J W, SHAPIRO A, et al. The infrared solar spectrum measured by the SOLSPEC spectrometer onboard the international space station [J]. *Solar Physics*, Springer Verlag, 2015, 290 (6): 1581-1600.
- [6] BRUECKNER, EDLOW K L. The solar ultraviolet spectral irradiance monitor (SUSIM) experiment on board the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D6): 10695-10711.
- [7] ROTTMAN G J, WOODS T N, SPARN T P. Solar stellar irradiance comparison experiment I: 1. instrument design and operation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 10667-10677.
- [8] BABAYAN V K, BOSTANJYAN N, CHILINGARIAN A A, et al. Alert service for extreme radiation storms [C]. Proc 27th ICRC, Hamburg, 2001, 9: 3541-3544
- [9] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. At. Data Nucl. Data Tables [M]. 1993: 181.
- [10] GARCIA H A. Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements [J]. *Solar Physics*, 1994, 154(2): 275-308.
- [11] KETEK G. 2012: VITUS Silicon Drift Detector [EB/OL]. www.ketek.net, Rev. 3.
- [12] LIN H A, WANG S J. The characteristics of solar X-ray emission for proton flares and proton event warning [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1993, 13(2): 122-128.
- [13] KORDE R, CANFIELD L R. Silicon photodiodes with stable near theoretical quantum efficiency in the soft X-ray region [C]. SPIE, 1989, 1140: 126.
- [14] SMITH R K, BRICKHOUSE N S, LIEDAHL D A, et al. Collisional plasma models with APEC/APED: emission-line diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions [J]. *Astrophysical Journal*, 2001, 556(2): L91-L95.
- [15] BAILEY S M, WOODS T N, BARTH C A, et al. Measurements of the solar soft X-ray irradiance from the student nitric oxide explorer: first analysis and underflight calibrations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 27179-27193.
- [16] WOODS T N, EPARVIER F G, BAILEY S M, et al. The solar EUV experiment (SEE): mission overview and first results [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: A01312.
- [17] WOODS T N, ROTTMAN G, VEST R. Photometer system (XPS)XUV: overview and calibrations [J]. *Solar Physics*, 2005, 230: 345-374.
- [18] WEI Fei, WANG Shijin, LIANG Jimbao, et al. Next generation space environment monitor (SEM) for FY-2 satellite series [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1): 1-11.
- [19] ZHU Guangwu, LI Baoquan. The space environment monitor aboard FY-2 satellite [J]. *Science in China, Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2004, 34(3): 354-360.