

# 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

邢阳光<sup>1,2,3</sup>, 李林<sup>1\*</sup>, 彭吉龙<sup>2\*\*</sup>, 王姗姗<sup>1\*\*\*</sup>, 成一诺<sup>4</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

<sup>3</sup>可靠性与环境工程技术国家重点实验室, 北京 100094;

<sup>4</sup>清华大学精密仪器系, 北京 100091

**摘要** 基于传统罗兰圆结构的凹面光栅成像光谱仪, 尽管具有很好的轴上点成像特性, 但是存在较大的光栅离轴像差, 离轴性能显著降低, 不适用于大离轴视场、宽波段的空间和光谱成像。因此, 基于超环面变线距光栅工作在非罗兰圆结构下的像差校正理论, 设计了一款兼具大离轴视场和宽波段的太阳极紫外正入射成像光谱仪, 使用三个平场探测器, 可实现在极紫外波段对包括日冕和过渡区域在内的太阳上层大气的高空间和高光谱分辨观测。该仪器仅有两次反射表面, 同时使用周期性的 SiC/Al 多层镀膜最大化地减小了极紫外波段的光子通量损失, 提高了仪器的传输效率。该成像光谱仪的工作波段为 40~47 nm、53~60 nm 和 66~73 nm, 口径为 100 mm, 沿狭缝方向的离轴视场为 18', 系统的空间分辨率优于 0.55", 光谱分辨率优于  $30 \times 10^{-4}$  nm。

**关键词** 测量; 超环面变线距光栅; 离轴光栅像差; 非罗兰圆结构; 太阳极紫外; 成像光谱仪

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2312005

## Optical Design of Solar Extreme Ultraviolet Normal-Incidence Broadband Imaging Spectrometer with Non-Rowland Circle Mounting

Xing Yangguang<sup>1,2,3</sup>, Li Lin<sup>1\*</sup>, Peng Jilong<sup>2\*\*</sup>, Wang Shanshan<sup>1\*\*\*</sup>, Cheng Yinuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

<sup>3</sup> National Key Laboratory of Science and Technology on Reliability and Environment Engineering,  
Beijing 100094, China;

<sup>4</sup> Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100091, China

**Abstract** Concave grating imaging spectrometers operating at conventional Rowland circle mounting have excellent on-axis imaging performances. However, such spectrometers have been found to possess poor off-axis imaging performances as a result of the existence of large off-axis grating aberrations, which are not suitable for spatial and spectral imaging under a large off-axis field of view (FOV) and a broad band. Based on the aberration correction theory of toroidal varied line-space gratings operating at non-Rowland circle mounting, we designed a solar extreme ultraviolet (EUV) normal-incidence imaging spectrometer with a large off-axis FOV and a broad band. Specifically, this instrument can provide excellent imaging with high spatial and spectral resolutions for EUV spectroscopic observations of the solar corona and transition region. Besides, the instrument has only two reflective surfaces with periodic SiC/Al multilayer coating, which minimizes the loss of photon flux in the EUV band and improves the transmission efficiency of the instrument greatly. Finally, this unprecedented spectrometer, with an aperture of 100 mm and the operating bands of 40–47 nm, 53–60 nm, and 66–73 nm, achieves a spatial resolution and a spectral resolution better than 0.55" and  $30 \times 10^{-4}$  nm respectively, providing ultrahigh resolution imaging over the off-axis FOV of 18' along the slit.

**Key words** measurement; toroidal varied line-space grating; off-axis grating aberration; non-Rowland circle

收稿日期: 2020-07-07; 修回日期: 2020-07-22; 录用日期: 2020-08-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501300, 2016YFB0501304)

\* E-mail: bit421@bit.edu.cn; \*\* E-mail: JL\_Peng@hotmail.com; \*\*\* E-mail: wshan@bit.edu.cn

mounting; solar extreme ultraviolet; imaging spectrometer

OCIS codes 120.4570; 300.6190; 260.7200; 220.1000

## 1 引 言

一般认为,电磁波谱位于 15~120 nm 的部分称为极紫外(EUV)波段,在太阳上层大气中,日冕和过渡区域辐射出丰富的极紫外谱线<sup>[1]</sup>。极紫外波段的辐射线能够表征太阳外层大气中等离子体从  $10^4 \sim 10^7$  K 的温度特性<sup>[2]</sup>,通过拟合在极紫外观测波段的辐射谱线轮廓,来获得谱线强度、宽度和多普勒频移,成像光谱仪提供了对太阳等离子体特征的精确测量,包括等离子体的温度、流速、密度分布、元素丰度等。这些精确信息是用来研究发生在日冕及过渡区域中日冕加热<sup>[3]</sup>、磁重联<sup>[4]</sup>、日冕物质抛射<sup>[5]</sup>和爆发事件<sup>[6]</sup>等太阳活动机理的必要条件。早期的太阳观测表明<sup>[1]</sup>,太阳外层大气的结构特点在空间上具有很大的复杂性,从地球低轨道上观测,它们往往具有小于 1" 的宽度,而在长度上却有数个角分的扩展。对太阳活动及其外层大气在极紫外波段进行观测,成像光谱仪应具有高空间分辨、高光谱分辨、大视场(沿狭缝方向)、宽波段和高仪器传输效率。

但是实现这样的观测需求,面临严峻的挑战。由于反射式光学材料在极紫外波段具有极低的反射率以及透射式光学材料对极紫外光子的全部吸收,使得具有多个反射光学表面或者包含透射光学元件的传统消像散光谱成像方法无法被采用,例如,具有 Czerny-Turner 及其修正结构形式的成像光谱仪<sup>[7-8]</sup>、具有 Dyson 结构的成像光谱仪<sup>[9]</sup>、具有 Offner 结构的成像光谱仪<sup>[10-11]</sup>、具有曲面棱镜元件的成像光谱仪<sup>[12]</sup>、具有串联 Wadsworth 结构的成像光谱仪<sup>[13]</sup>等。尽管掠入射的成像光谱仪能够提高极紫外波段的反射率,但是相比于正入射结构具有先天性的缺陷,比如视场小、离轴像差大、点扩展函数低、系统有效入射面积小、加工成本高、装调困难等。在过去的 30 年中,随着多层膜技术和凹面光栅加工技术的发展,多层膜凹面光栅被应用到正入射的太阳极紫外成像光谱仪中<sup>[14]</sup>,由于凹面光栅兼具成像聚焦和光谱分光特性,因此使用单个凹面光栅就能实现光谱成像和色散的功能,极大地减少了反射或衍射表面,而多层镀膜又能提高极紫外波段的正入射反射效率。罗兰圆结构具有先天性的轴上点像散校正特性,通过优化凹面光栅的面型参数,

在光轴上可以获得很好的空间和光谱分辨成像,但是由于离轴光栅像差的存在,系统的离轴性能显著降低,因此凹面光栅工作在罗兰圆结构下,仅仅可以实现高空间分辨、高光谱分辨和高仪器传输效率的观测需求,无法同时满足大视场和宽波段的观测应用。

为了实现在大视场下的宽波段太阳极紫外观测, Poletto 等<sup>[15]</sup>首次提出了具有非罗兰圆结构的凹面光栅设计,实现了双波段的太阳极紫外探测,并成功应用在数个空间太阳极紫外探测的任务中。例如,2006 年日本发射的 Hinode 卫星上的仪器 EIS<sup>[16]</sup>, NASA 于 2013 年发射的探空火箭仪器 EUNIS-13<sup>[17]</sup>,以及 2020 年 2 月由欧洲航天局和 NASA 联合发射的太阳极区探测器 Solar Orbiter 上搭载的仪器 SPICE<sup>[18-19]</sup>等。本文利用修正的光程函数概念,基于非罗兰圆结构下的超环面变线距(TVLS)光栅像差校正理论,设计了可同时探测三波段太阳极紫外的具有高空间和高光谱分辨率的成像光谱仪。整个系统仅有两个光学反射表面,具有很高的仪器传输效率,光线追迹的结果表明,系统在较大的离轴视场下具有很好的空间和光谱成像性能。

## 2 非罗兰圆结构的概念

工作在罗兰圆结构下的凹面光栅具有单位的光谱放大率,狭缝必须位于罗兰圆圆周上,而平面探测器相交或相切于罗兰圆圆周,结构如图 1(a)所示。在这样的结构下,成像光谱仪的焦距取决于前置望远镜的焦距,为了实现高空间分辨,前置望远镜多采用共轴两镜系统,例如 1992 年, NASA 的大型探空火箭仪器 HiRES<sup>[20]</sup>就采用该结构,分光元件为超环面等线距(TULS)光栅。而非罗兰圆结构下的凹面光栅具有非单位(大于  $1\times$ )的光谱放大率,狭缝和探测器的位置不受罗兰圆圆周的限制,结构如图 1(b)所示,在这样的结构下,成像光谱仪的焦距取决于前置望远镜的焦距与光谱放大率的乘积,前置望远镜采用离轴单镜,在较大光谱放大率下就能实现很高的空间分辨。Hinode/EIS<sup>[16]</sup>和 Solar Orbiter/SPICE<sup>[18]</sup>仪器均采用图 1(b)的结构来实现双波段的太阳极紫外观测,分光元件分别为 TULS 和 TVLS 光栅,仪器的技术指标如表 1 所示。

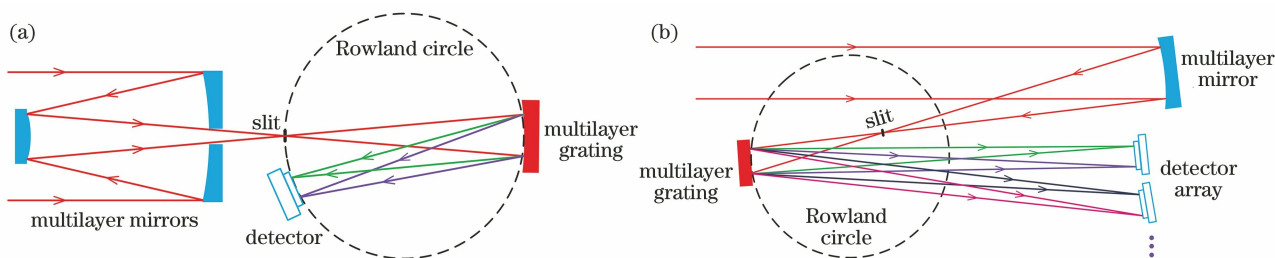


图 1 太阳极紫外正入射成像光谱仪的示意图。(a)罗兰圆结构;(b)非罗兰圆结构

Fig. 1 Schematic of solar EUV normal-incidence imaging spectrometer. (a) Rowland circle mounting; (b) non-Rowland circle mounting

表 1 太阳极紫外成像光谱仪的技术指标

Table 1 Technical indicators of solar EUV imaging spectrometers

Instrument	Wavelength /nm	Slit FOV /(')	Spectral resolution /( $10^{-4}$ nm)	Spatial resolution /(')	Gratings	Spectral magnification
HiRES	51-63	3	69	0.4	TULS	1.0×
Hinode /EIS	17-21 & 25-29	8.5	47&22	1.0	TULS	1.4×
SPICE	70.4-79 & 97.3-104.9	13	95&83	1.1	TVLS	5.5×
Proposed design	40-47 & 53-60 & 66-73	18	< 30	< 0.60	TVLS	4.0×

图 1(b)相比于图 1(a)的结构具有如下优势: 1)非罗兰圆结构能校正光栅离轴像差,实现沿狭缝方向的大视场观测,而罗兰圆结构不满足光栅离轴像差的校正条件;2)在同样的空间分辨率下,非罗兰圆结构具有更高的仪器传输效率;3)通过对光栅光谱放大率的自由设计,非罗兰圆结构能够最大程度地压缩系统体积,节约空间飞行器资源。

本文设计的成像光谱仪采用图 1(b)的结构,具有四倍光谱放大率且满足平像场光谱成像聚焦条件,不需要光栅的旋转和探测器的移动,利用由三个独立的平面 CCD 构成的探测器阵列,就能同时实现大视场下的三波段太阳极紫外高分辨率观测,仪器的技术指标如表 1 所示。

### 3 设计原理

图 2 为单个 TVLS 光栅的笛卡尔坐标系。原点  $O$  是光栅的顶点,  $X$  轴垂直光栅表面于  $O$  点,  $Y$  轴为垂直光栅刻线的方向,  $Z$  轴为平行光栅刻线的方向。狭缝长度的方向平行于  $Z$  轴,点  $A(x_a, y_a, z_a)$  是入射狭缝上的任意一点,  $A_0(x_a, y_a, 0)$  是点  $A$  在平面  $XOY$  上的投影,即  $A_0$  点为狭缝的中心。由点  $A$  发出的发散光束照明 TVLS 光栅,入射光线  $AP$  为发散光束中的任意一条光线,点  $P(x, y, z)$  为光栅表面上的任意一点。入射光线  $AP$  和  $AO$  经过 TVLS 光栅衍射后,成像于点

$B(x_b, y_b, z_b), B_0(x_b, y_b, 0)$  是点  $B$  在平面  $XOY$  上的投影。可知:轴上点  $A_0$  经过光栅顶点衍射后会成像在  $B_0$ ,光线  $A_0O$  与  $X$  轴的夹角  $i$  为入射角,  $|OA_0|=r_A$  为光栅的入射臂长;光线  $OB_0$  与  $X$  轴的夹角  $\theta$  为衍射角,  $|OB_0|=r_B$  为光栅的出射臂长。当  $i$  与  $\theta$  在  $X$  轴的同侧时,符号相同;当在  $X$  轴的异侧时,符号相反。

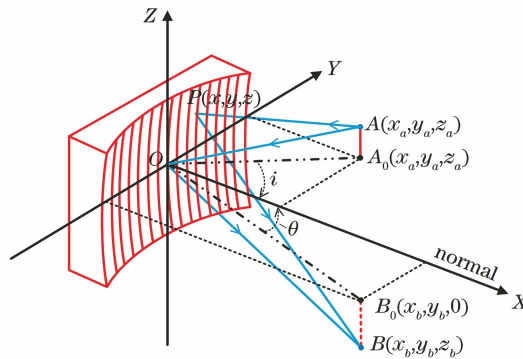


图 2 像差校正的 TVLS 光栅原理图

Fig. 2 Schematic of aberration-corrected TVLS grating

由于点  $P(x, y, z)$  在光栅表面上,因此满足如下超环面方程,

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

式中:  $R$  和  $\rho$  分别为色散方向和垂直色散方向的半径。将其展开成  $y$  和  $z$  的泰勒级数为

$$x = \frac{y^2}{2R} + \frac{z^2}{2\rho} + \frac{y^4}{8R^3} + \frac{z^4}{8\rho^3} + \frac{y^2 z^2}{4R^2 \rho} + \dots \quad (2)$$

对于变线距的凹面光栅,其刻线宽度沿  $Y$  轴变化,总刻线数满足如下多项式,

$$N(y) = (y + \frac{b_2}{R}y^2 + \frac{b_3}{R^2}y^3 + \frac{b_4}{R^3}y^4 + \dots)/d_0, \quad (3)$$

式中: $N(y)$ 为从坐标原点  $O$  累计到任意点  $P$  时的刻线总数; $d_0$  为原点  $O$  处的刻线间距; $b_2, b_3, b_4, \dots$  是刻线的空间变化参数。

费马原理被用于分析凹面光栅的像差<sup>[21]</sup>,光线  $APB$  的光程函数为

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

式中: $m$  为衍射级次; $\lambda$  为衍射波长。

进一步地,将各点坐标代入(4)式,则光程函数展开成  $y$  和  $z$  的泰勒级数,

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

式中: $j$  和  $k$  不同时为零; $F_{jk}$  对应于不同类型的光栅像差系数。

### 3.1 TVLS 的光栅像差系数

$F_{jk}$  的每一项对应 TVLS 的一个光栅像差,包括基本像差(像散和离轴离焦)和高阶像差(彗差和球差),其对应关系如表 2 所示。

表 2  $F_{jk}$  及其对应的像差

Table 2  $F_{jk}$  and its corresponding aberrations

Term	Aberration
$F_{10}$ and $F_{01}$	Basic grating equation
$F_{20}$	Tangential astigmatism
$F_{02}$	Sagittal astigmatism
$F_{11}$	Off-axis defocusing
$F_{30}$ and $F_{21}$	Coma
$F_{12}$	Slit curvature
$F_{40}, F_{22},$ and $F_{04}$	Spherical aberration

$M_{jk}$  项与光栅刻线的空间变化参数有关,其表达式为

$$M_{jk} = \begin{cases} 1, & j=1 \ \& \ k=0 \\ b_j/R^{j-1}, & j=2,3,4,\dots \ \& \ k=0. \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$C_{jk}$  项仅与光栅基底的面型参数有关,这里仅仅给出基本像差对应的项,即满足  $j+k \leq 2$  时的项, $j+k=1$  的两项为

$$\begin{cases} C_{01} = \frac{1}{2} \left( \frac{z_a}{r_A} + \frac{z_b}{r_B} \right) \left[ \left( \frac{z_a}{r_A} - \frac{z_b}{r_B} \right)^2 + \frac{z_a z_b}{r_A r_B} - 2 \right] \\ C_{10} = - \left( 1 - \frac{z_a^2}{2r_A^2} \right) \sin i - \left( 1 - \frac{z_b^2}{2r_B^2} \right) \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

$j+k=2$  的三项为

$$\begin{cases} C_{20} = \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2 i}{r_A} + \frac{\cos^2 \theta}{r_B} - \frac{\cos i + \cos \theta}{R} \right) + \frac{z_a^2}{2r_A^2} \left( \frac{\sin^2 i}{r_A} - \frac{\cos^2 i}{2r_A} + \frac{\cos i}{2R} \right) + \frac{z_b^2}{2r_B^2} \left( \frac{\sin^2 \theta}{r_B} - \frac{\cos^2 \theta}{2r_B} + \frac{\cos \theta}{2R} \right) \\ C_{02} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{\cos i + \cos \theta}{\rho} \right) - \frac{z_a^2}{4r_A^2} \left( \frac{3}{r_A} - \frac{\cos i}{\rho} \right) - \frac{z_b^2}{4r_B^2} \left( \frac{3}{r_B} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) \\ C_{11} = - \frac{z_a}{r_A^2} \sin i - \frac{z_b}{r_B^2} \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

根据费马原理,对位于 TVLS 光栅表面上的任意一点  $P$ ,光程函数  $F(y, z)$  都存在极值的充分条件是同时满足如下方程,

$$\partial F(y, z)/\partial y = 0, \quad \partial F(y, z)/\partial z = 0. \quad (9)$$

### 3.2 离轴光栅像差的校正

对于任意的  $j$  和  $k, F_{jk} = 0$  即所有光栅像差的系数都为零,可以满足(9)式成立,这是获取光谱理想成像的条件。但是实际中,由像差系数为零而构成的超越方程组,没有严格的解析解。为了解决这个问题,Huber 等<sup>[22]</sup> 和 Harada 等<sup>[23]</sup> 都做了一些简化的计算,令  $z_a = z_b = 0$ , 这样的设计结果,仅仅获

得了很好的轴上成像性能,而忽略了离轴光栅像差的校正,使得离轴的空间和光谱分辨性能显著下降。

为了校正离轴光栅像差, $F_{11}$  项必须为零,由于  $F_{11} = C_{11}$ ,则根据(8)式得到:

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

又由  $F_{01} = C_{01} = 0$ ,得到光栅的光谱放大率公式为

$$\beta = \frac{r_B}{r_A} = - \frac{z_b}{z_a}. \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式,得到校正光栅离轴像差的条件为



$$\frac{\sin \theta}{\sin i} = \frac{r_B}{r_A} = \beta > 1. \quad (12)$$

尽管该条件是从 TVLS 光栅中推导出来的,但是适用于工作在非单位光谱放大率且具有任意面型的凹面光栅光谱仪中。当 TULS 和 SVLS 光栅的衍射角和入射角满足(12)式条件来实现离轴像差的校正时,剩余的自由优化变量仅仅获得一个消像散波长点,无法实现具有两个消像散点的宽波段聚焦成像。另一方面,对于工作在罗兰圆结构下的任意凹面光栅光谱仪,由于具有单位的光谱放大率即 $\beta=1$ ,因此不满足(12)式,无法实现离轴像差的校正。因为当 $\beta=1$ 时, $\theta=i$ 即衍射角等于入射角,衍射光线会沿着入射光线相反的方向消像散会聚成像,使得狭缝与探测器的空间位置存在干涉。

### 3.3 系统初始解

$F_{20}=0$  和  $F_{02}=0$  可以校正子午像散和弧矢像散,得到光谱聚焦曲线和空间聚焦曲线,

$$\begin{cases} \frac{\cos^2 i}{r_A} + \frac{\cos^2 \theta}{r_B} - \frac{\cos i + \cos \theta}{R} + \frac{2m\lambda b_2}{Rd_0} = 0 \\ \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{\cos i + \cos \theta}{\rho} = 0 \end{cases}. \quad (13)$$

通过优化光栅的刻线空间变化参数,可以使光谱聚焦曲线和空间聚焦曲线相交于三个波长点,实现宽波段的消像散成像。

$F_{10}=0$  可以获得离轴条件下的基本光栅方程,

$$d_0(\sin i + \sin \theta)\left(1 - \frac{z_a^2}{2r_A^2}\right) = m\lambda. \quad (14)$$

成像光谱仪的前置望远镜采用离轴单镜系统,离轴单镜的曲率半径为  $R_T$ ,离轴量为  $\Delta$ ,光谱仪沿狭缝方向的离轴半视场为  $\omega$ ,则根据近轴光学原理可得,

$$z_a = f_T \tan \omega = 0.5 \times \sqrt{R_T^2 + 4\Delta^2} \tan \omega, \quad (15)$$

式中: $z_a$  为狭缝半长度; $f_T$  为前置望远镜的焦距。

为了获取成像光谱仪的初始结构参数,需要明确一些已知的量,包括入射臂  $r_A$ 、光栅放大率  $\beta$ 、消像散的波段观测范围  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、中心波长  $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ 、离轴半视场  $\omega$ 、光栅中心的刻线宽度  $d_0$ 、离轴望远镜曲率半径  $R_T$  和离轴量  $\Delta$ 。为了获得具有线性变化的 TVLS 光栅刻线密度分布,令  $b_k=0(k=3,4,5,\dots)$ , 联立(10)~(15)式得到系统初始解:

$$\begin{cases} i = \arcsin \left[ \frac{m\lambda_0}{d_0(1+\beta)} \right] \\ R = \beta r_A \times \frac{[\lambda_1(\cos i + \cos \theta_2) - \lambda_2(\cos i + \cos \theta_1)]}{\lambda_1(\beta \cos^2 i + \cos^2 \theta_2) - \lambda_2(\beta \cos^2 i + \cos^2 \theta_1)} \\ \rho = \frac{\beta}{\beta+1} r_A (\cos i + \cos \theta_0) \\ b_2 = \frac{(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)[R(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) - r_B]d_0}{2mr_B(\lambda_2 - \lambda_1)} \\ \theta_\xi = \arcsin \left[ \frac{8mr_A^2 \lambda_\xi}{d_0(8r_A^2 - (R_T^2 + 4\Delta^2)\tan^2 \omega)} - \sin i \right], \xi = 0, 1, 2 \end{cases}. \quad (16)$$

(16)式获得的初始解不是系统的最优解。初始参数能够实现离轴光栅像差和像散的校正,但高阶彗差和球差无法校正。为了解决这个问题,本文在初始解的基础上,利用光学设计软件 ZEMAX<sup>[24]</sup>,最小化各阶光栅像差,获得系统的最优解。

## 4 光线追迹和仪器性能

由于 TVLS 光栅工作在非罗兰圆结构下能够

实现对太阳极紫外的大视场宽波段观测,选择图 1(b)所示的结构,采用单元件的离轴反射镜作为前置望远系统,TVLS 光栅作为分光元件,平场探测器阵列作为接收器。由于在极紫外 40~75 nm 波段,含有丰富的用于光谱诊断的等离子体发射谱线,如表 3 所示,且覆盖从  $3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^6$  K 的宽温度范围,因此极具观测价值,边缘波长值取  $\lambda_1=40$  nm 和  $\lambda_2=73$  nm, $\lambda_0=56.5$  nm 为中心波长,仪器的总体设计指标参见表 1。

表 3 在观测光谱范围内诊断等离子体谱线的温度和密度示例

Table 3 Examples of temperature and density for diagnostic plasma line in the observed spectral region

Ion	Wavelength /nm	log $T_{\max}$ /K	log $N_e/\text{cm}^{-3}$
Mg VI	40.331	5.63	>10
Ne V	41.620	5.67	8-10
Mg VIII	43.047/43.662	4.52	8-10
O IV	55.451	5.24	7-8.5
Si IX	69.469	6.05	>11
Mg IX	70.604	5.99	9.2-10.5
Fe XX	72.155	6.92	>10

为了保证在 ZEMAX 光学设计软件中的优化结果的准确性和较快的收敛速度,利用(16)式计算 TVLS 光栅的初始结构参数,在 ZEMAX 中对初始结构参数进行全局优化设计。成像光谱仪系统在垂直狭缝方向的空间分辨率仅仅取决于前置望远镜的设计;光谱分辨率仅仅取决于光栅的设计;而平行狭缝方向的空间分辨率取决于前置望远镜和光栅的设计,为了保证系统的空间和光谱分辨率满足表 1 的要求,将分辨率作为边界条件来进一步限制系统的结构,表达式为

$$\begin{cases} d\lambda = \frac{d_0 \cos \theta \cos \psi}{mr_\Lambda} \times \max(s, e/\beta) \\ \delta = \frac{e}{\beta \sqrt{R_T^2 + 4\Delta^2}} \times \frac{12.96}{\pi} \times 10^5 \end{cases}, \quad (17)$$

式中: $d\lambda$  是光谱分辨率; $s$  是入射狭缝的宽度; $e$  是探测器的像素尺寸; $\psi$  是探测器的倾斜角度或光线在探测器上的入射角; $\delta$  是每像素的空间分辨率,以角秒为单位。

#### 4.1 仪器设计结果

在获得理想的光谱和空间聚焦性能的同时,

还要在轻量化、小体积、大口径等多种需求下进行权衡,以获得综合性能最优的系统。最终优化后的光学系统光路布局如图 3 所示。整个系统包含 6 个光学元件:离轴双曲面望远镜、入射狭缝、TVLS 光栅和三个独立的极紫外探测器。利用 ZEMAX 中的多重结构建立三个独立的探测器,通过对三个波段的空间和光谱成像优化,获得具有三个不同倾斜角度的最优探测器位置,每个探测器分别对应 40~47 nm、53~60 nm 和 66~73 nm 的消像散波段。观测波段内的太阳极紫外光线照明离轴双曲面镜,在望远镜的焦平面上形成太阳的一次实像,入射狭缝通过瞬时视场 (IFOV) 选择一次像的一部分,经过 TVLS 光栅色散并会聚形成二次像于探测器上。为了获取日面上二维光谱图像,狭缝的扫描视场设计为  $\pm 5'$ 。为了提高正入射下极紫外的反射率,离轴望远镜和 TVLS 光栅表面镀相同的极紫外多层膜(膜层设计见下文),膜层文件被添加到 ZEMAX 中,来进行成像质量和仪器效率的优化。整个系统的技术指标和元件参数如表 4 所示。

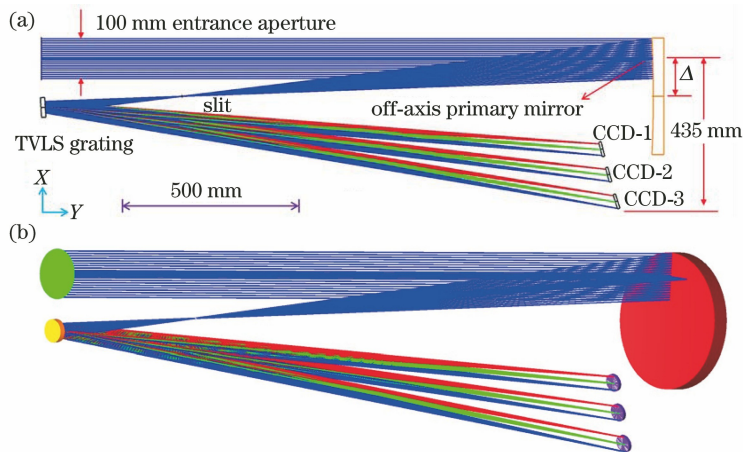


图 3 太阳极紫外宽波段成像光谱仪光路原理图。(a)二维光路图;(b)三维模型图

Fig. 3 Schematic of optical layout of solar EUV broadband imaging spectrometer. (a) Two-dimensional optical layout; (b) three-dimensional model diagram

表 4 成像光谱仪的技术指标和光学元件参数  
Table 4 Technical indicators and optical element parameters for imaging spectrometer

Specification		
Anastigmatic spectral range /nm	40-47 & 53-60 & 66-73	
IFOV/[(")×(')]	0.54×18	
Scanning FOV / (')	± 5	
Spectral resolution /( $10^{-4}$ nm)	24.9-26.9	
Spatial resolution /(")	0.54	
System focal length /mm	5200	
Detector / $\mu\text{m}$	13.5, 2048×3072	
Telescope design		
$R_T$ /mm	2664	
Conic	-1.33	
$\Delta$ /mm	95	
Spectral imaging system design		
Slit size /( $\mu\text{m}$ ×mm)	3.2×7	
$1/d_0$ / $\text{mm}^{-1}$	3000	
$m$	+1 order	
Grating parameter	Initial	Optimum
$\beta$	4×	3.986×
$i$ /(")	1.925	1.931
$r_A$ /mm	387.000	387.325
$R$ /mm	620.397	619.992
$\rho$ /mm	616.216	616.673
$b_2$	0.0658	0.0671
Groove density / (groove · $\text{mm}^{-1}$ )	3000±13	
Ruling area / $\text{mm}^2$	$\pi \times 20 \times 20$	
Three independent detectors design		
CCD	Wavelength /nm	$\psi$ /(")
CCD-1	40-47	22.16
CCD-2	53-60	26.18
CCD-3	66-73	29.42

在最终获得的结果中,TVLS 光栅的刻线区域直径为 40 mm,其刻线密度沿色散方向线性变化,如图 4 所示,光栅中心的刻线密度为 3000 groove/mm。

#### 4.2 成像质量评价

入射狭缝上的一个物点,在像面上所成的像点是一组弥散斑,每个弥散斑对应不同的波长。图 5(a)~(c)分别为不同离轴视场的空间和光谱方向上的弥散斑均方根(RMS)半径随波长变化的曲线,可以看出,在三个消像散波段和±9'的离轴视场内,空间和光谱方向上的点列图 RMS 半径均小于 6.2  $\mu\text{m}$ ,获得了良好的空间成像和光谱消像散性能。图 5(d)为不同波长下的 RMS 点列图半径随视

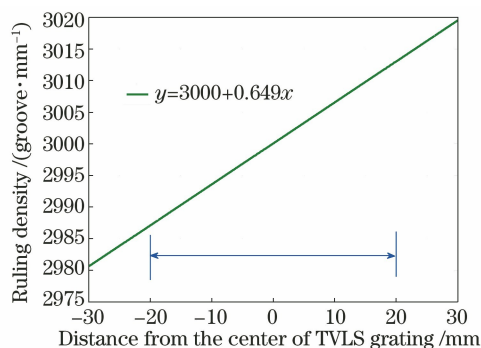


图 4 超环面变线距光栅的刻线密度分布曲线图  
Fig. 4 Curve of the ruling density distribution of TVLS grating

场的变化曲线图,+Y 为沿狭缝长度方向,在任意的同一波长下,随着离轴视场的增大,空间和光谱方向上的点列图 RMS 半径变化较为平稳,都小于 6.2  $\mu\text{m}$ ,获得了宽波段下的良好离轴性能。

图 6(a)~(d)分别为系统在波长 40、53、60、73 nm 处的调制传递函数(MTF)曲线,在奈奎斯特频率下均大于 0.4,MTF 接近衍射极限,光学系统具有良好的成像质量。

成像质量评价表明,成像光谱仪获得了良好的离轴成像性能。由于 TVLS 光栅的非球面面型以及非罗兰圆结构的使用,使得系统在具有高空间和光谱分辨率的同时,可以显著压缩系统的体积,相比于 Hinode/EIS<sup>[16]</sup> 仪器接近 3 m 的空间布局,系统的长度降低了 45%,适应于卫星平台的应用。

#### 4.3 光谱分辨率和空间分辨率

弥散斑 RMS 直径均小于像元尺寸 13.5  $\mu\text{m}$ ,系统的光谱分辨率受像元尺寸的限制。图 7 为利用(17)式理论计算得到的系统光谱分辨率随波长的变化曲线,光谱分辨率在  $24.9 \times 10^{-4} \sim 26.9 \times 10^{-4}$  nm 之间。为了验证系统在各个观测波段内具有理论计算的光谱分辨率数值,利用 ZEMAX 的非序列模式来进行对不同线对的光谱像模拟,进而得出探测器在不同波长线对下的光强分布。ZEMAX 序列模式下,有 TVLS 光栅的表面,但在非序列模式下,没有这个面型,为此,通过 ZEMAX 的扩展功能,利用 MATLAB 编程,将编码的 TVLS 光栅面型导入到非序列模式下,来实现光线追迹。用于不同光谱线对成像的光线追迹模型,如图 8 所示(以 CCD-2 为例)。光线追迹的光源采用双角光源,双角光源两个方向的半宽度对应系统的入射孔径大小;两个方向的半角度对应前置望远系统的视场;光源能量设置为 1 W;光线追迹的光线条数为 1 亿;双

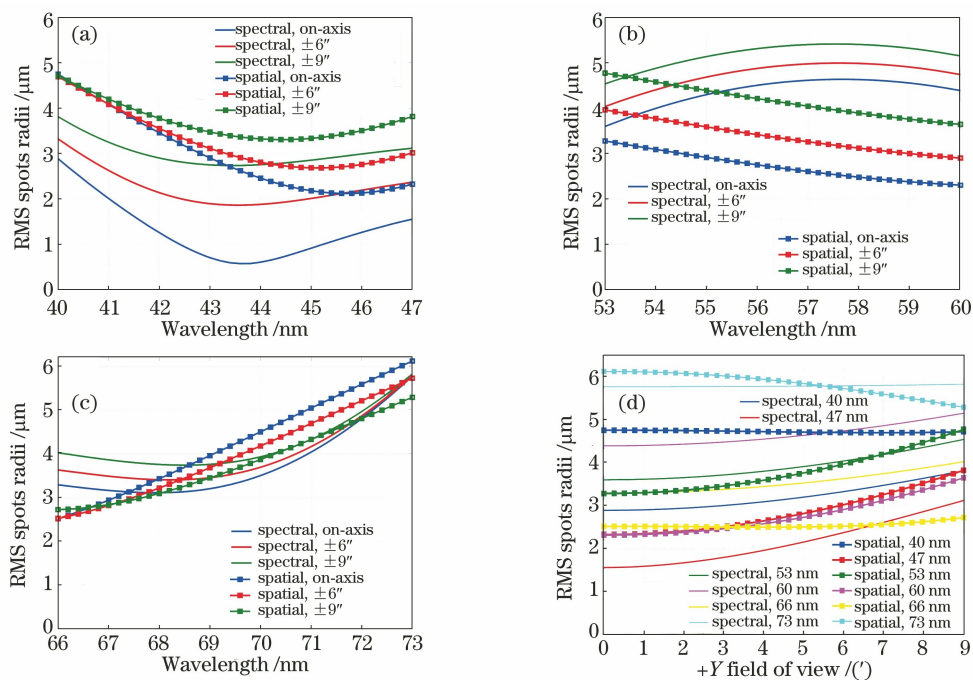


图 5 光线追迹结果。(a)~(c)不同离轴视场下的 RMS 点列图半径随波长的变化曲线图；  
(d)不同波长下的 RMS 点列图半径随视场的变化曲线图

Fig. 5 Ray tracing results. (a)-(c) RMS spots radii change with wavelengths under different off-axis FOV;  
(d) RMS spots radii versus FOV in the different wavelengths

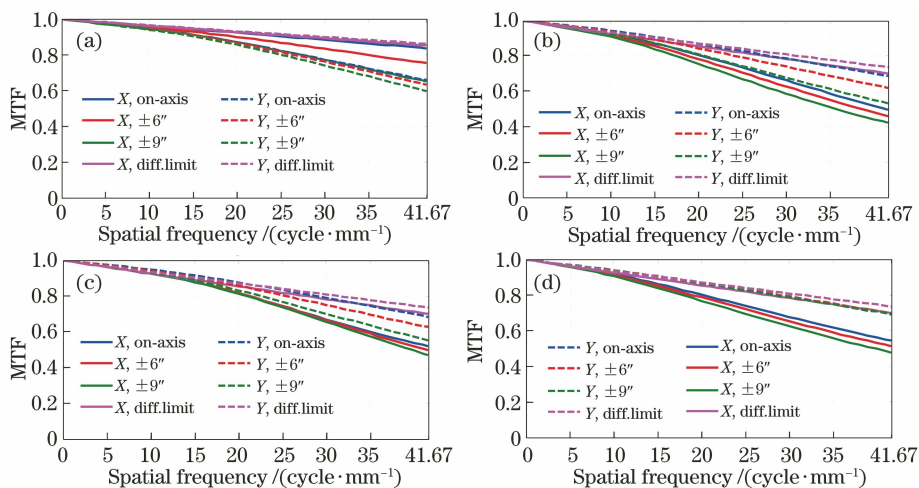


图 6 光学系统在不同波长处的调制传递函数。(a)  $\lambda=40$  nm; (b)  $\lambda=53$  nm; (c)  $\lambda=60$  nm; (d)  $\lambda=73$  nm  
Fig. 6 MTFs of optical system under different wavelengths. (a)  $\lambda=40$  nm; (b)  $\lambda=53$  nm;  
(c)  $\lambda=60$  nm; (d)  $\lambda=73$  nm

角光源的仿真光谱线对和探测器的仿真参数见表 5。狭缝采用两个矩形反射镜的组合来代替,如图 8 所示,两个宽度均为 7 mm 的矩形反射镜(对应狭缝的长度),并排放置,中间空气间隔为  $3.2 \mu\text{m}$  (对应狭缝的宽度),前置望远系统在其焦平面成像的光线仅仅通过  $3.2 \mu\text{m} \times 7 \text{ mm}$  的空气间隔,其他位置处的成像光线被矩形反射镜所拦截,进而实现

对狭缝成像的模拟。通过三次光线追迹的仿真,图 9 为得到的不同光谱线对在三个 CCD 上的成像(狭缝像),白色虚线框为中心狭缝像的放大图,白色矩形上的红色曲线为光谱线对的相对强度分布。根据瑞利判据可知:间隔为  $27 \times 10^{-4}$ 、 $26 \times 10^{-4}$ 、 $25 \times 10^{-4}$  nm 的光谱线对被明显分开了,系统在不同的观测波段具有相应的光谱分辨率。



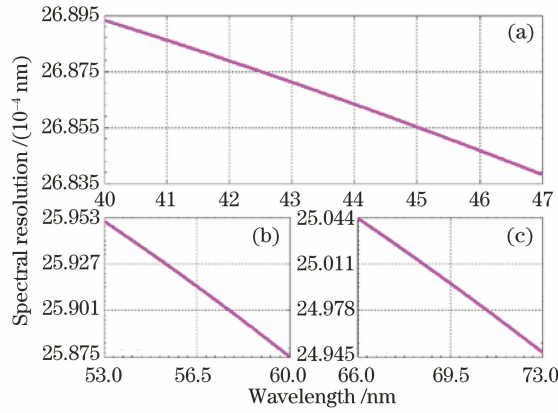


图 7 系统的光谱分辨率随波长的变化曲线。(a) 40~47 nm; (b) 53~60 nm; (c) 66~73 nm  
 Fig. 7 Spectral resolution of system change with wavelength. (a) 40~47 nm; (b) 53~60 nm; (c) 66~73 nm

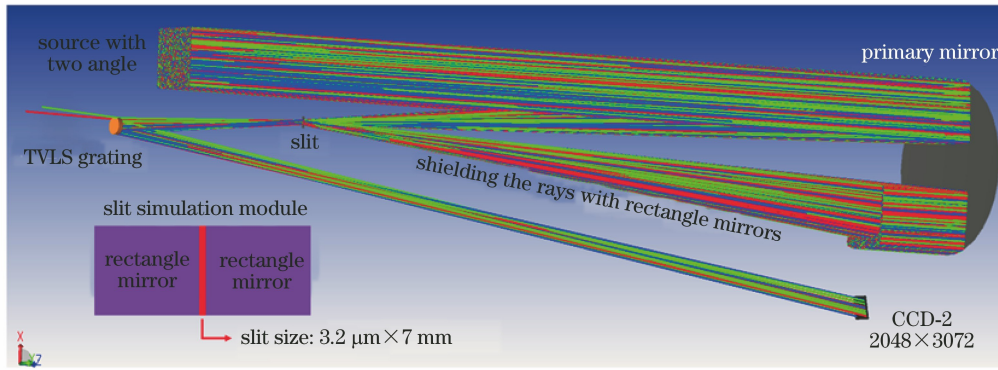


图 8 不同光谱线对成像的光线追迹模型  
 Fig. 8 Ray tracing module for different line-pairs spectral images

表 5 ZEMAX 非序列模式下的光线追迹模型仿真参数

Table 5 Simulation parameters for ray tracing module in ZEMAX non-sequential mode

Simulation parameters for source with two angles					
X half width /mm	Y half width /mm	X half angle / (°)	Y half angle / (°)	Power /W	Rays
50	50	0.15	0.15	1	10 <sup>9</sup>
Simulation spectral line-pairs for source with two angles					
CCD-1 /nm	40 & 40.0027	43.5 & 43.5027	47 & 47.0027		
CCD-2/nm	53 & 53.0026	56.5 & 56.5026	60 & 60.0026		
CCD-3/nm	66 & 66.0025	69.5 & 69.5025	73 & 73.0025		
Simulation parameters for CCDs					
Material	X half width/mm	Y half width/mm	X /pixel	Y /pixel	
Absorb	20.8	14	3072	2048	

理想的点源经过光学系统后,在像面上不再是一个点,而是弥散斑。如果一个圆能够将弥散斑 80% 的能量都包围其中,那么这个圆的直径对应的空间分辨率可以作为系统的空间分辨率。利用(17)式理论计算得到的系统像元空间分辨率为 0.54"。三个中心波长的包围圆能量曲线如图 10 所示,仿真结果表明:在整个离轴视场下,当 43.5、56.5、69.5 nm 波长的包围圆能量达到 80% 时,包围圆半径分别为 5.25、5.6、5.4 μm,其直径对应的空间分辨率分别为 0.42"、0.44"、0.43",在

包围圆直径为 13.5 μm 时,对应的包围圆能量接近 90%,因此系统的空间分辨率可以达到 0.54"。

#### 4.4 仪器传输效率分析

极紫外波段下的仪器有效面积越大,仪器效率越高。仪器在波长 λ 处的总效率为 E<sub>TOT</sub>(λ),有效面积为 A<sub>EFF</sub>(λ),计算表达式为

$$\begin{cases} E_{TOT}(\lambda) = R_{mir}(\lambda) \times \eta_{gr}(\lambda) \times Q_{Eccd}(\lambda) \\ A_{EFF}(\lambda) = A_{ape} \times E_{TOT}(\lambda) \end{cases}, \quad (18)$$

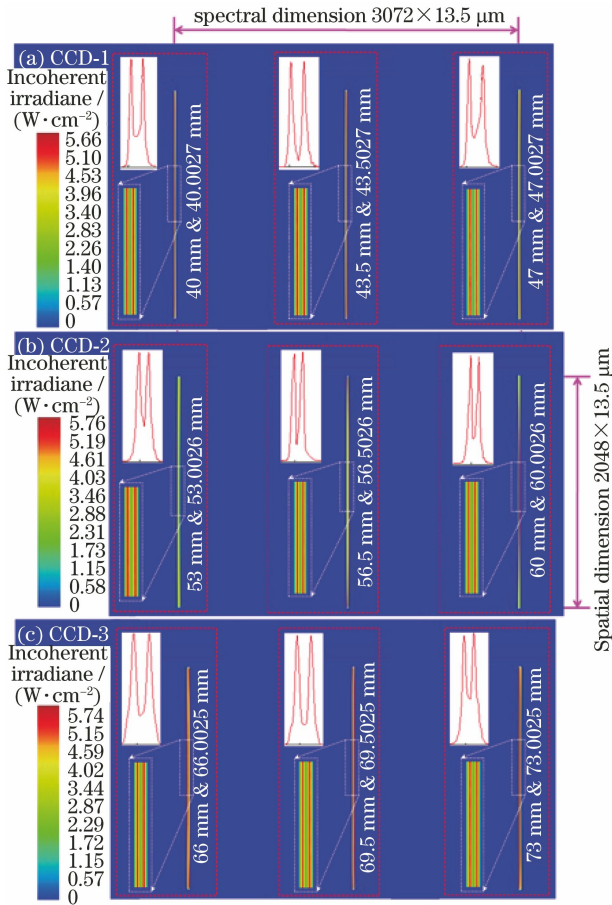


图 9 光谱线对在三个 CCD 上的成像。(a) CCD-1;  
(b) CCD-2; (c) CCD-3

Fig. 9 Spectrum of line pairs imaged on three CCDs.  
(a) CCD-1; (b) CCD-2; (c) CCD-3

式中： $R_{\text{mir}}(\lambda)$ 是离轴反射镜膜层的反射率； $\eta_{\text{gra}}(\lambda)$ 是 TVLS 光栅的绝对效率，包含光栅刻槽效率和多层膜反射率； $Q_{\text{Eccd}}(\lambda)$ 是探测器的量子效率； $A_{\text{ape}}$ 是入射孔径的面积。

为了提高仪器在观测波段内正入射下的极紫外反射率，周期性 SiC/Al 多层膜被应用在离轴反射镜和 TVLS 光栅上。利用 COMSOL 软件中的光学模块实现对 SiC/Al 多层膜的仿真，得到适用于 40~73 nm 最优的周期性 SiC/Al 多层膜的参数如表 6 所示，其中  $\gamma$  为正入射角度， $d$  为一个周期的膜厚度， $\tau$  为一个周期内 SiC 层的厚度占比， $N$  为膜层周期数， $\delta_{\text{SiC-Al}}$  为 SiC 层在 Al 层界面上的粗糙度， $\delta_{\text{Al-SiC}}$  为 Al 层在 SiC 层界面上的粗糙度。图 11 为多层膜反射率随波长的变化曲线。

表 6 周期性 SiC/Al 多层膜参数

Table 6 Periodic SiC/Al multilayer film parameters

$\gamma / (^{\circ})$	$d / \text{nm}$	$\tau$	$N$	$\delta_{\text{SiC-Al}} / \text{nm}$	$\delta_{\text{Al-SiC}} / \text{nm}$
88	26.4	0.31	30	2.1	0.9

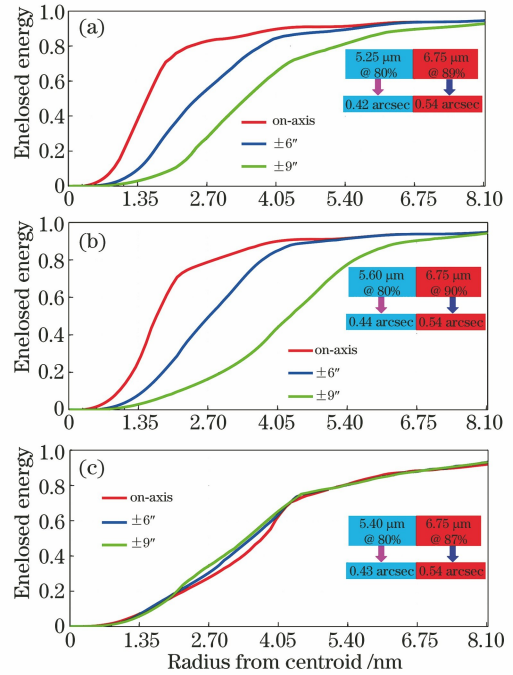


图 10 用于评估系统空间分辨率的衍射包围圆能量。

(a)  $\lambda = 43.5 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda = 56.5 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda = 69.5 \text{ nm}$

Fig. 10 Diffraction enclosed circle energy used to evaluate system's spatial resolution. (a)  $\lambda = 43.5 \text{ nm}$ ;  
(b)  $\lambda = 56.5 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda = 69.5 \text{ nm}$

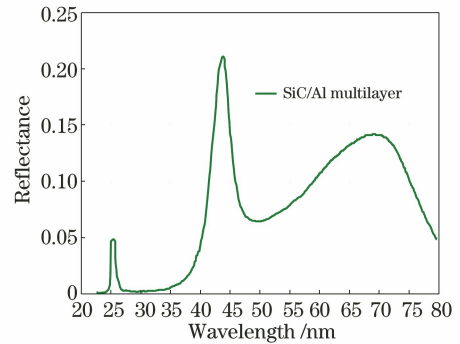


图 11 仿真获得的 SiC/Al 多层膜随波长变化的反射率曲线

Fig. 11 Reflectance curve of SiC/Al multilayer film obtained by simulation change with wavelength

TVLS 光栅的面型和刻槽轮廓以及表面沉积的 SiC/Al 多层膜在 COSMOL 软件中被建立，图 12(a)为仿真计算得到的在不同闪耀波长下的光栅绝对衍射效率曲线， $\eta_{\text{gra}}(\lambda)$  的最大值接近 0.15。图 12(b)为在仪器观测波段下的 CCD 量子效率 (QE) 曲线图<sup>[25]</sup>。图 13(a)为利用(18)式获得的在不同闪耀波长下的仪器有效面积变化曲线，表明在闪耀波长为 56.5 nm 时，在观测的三个波段内具有最佳的综合仪器有效面积。为了对比，图 13(b)为 Solar Orbiter/SPICE 仪器在其工作波段内(70.4~

79 nm & 97.3~104.9 nm)的有效面积曲线<sup>[18]</sup>。TVLS 光栅工作在 56.5 nm 的闪耀波长下,系统在整个观测波段范围内的有限面积是 SPICE 仪器的 3~7 倍,具有较高的仪器传输效率。

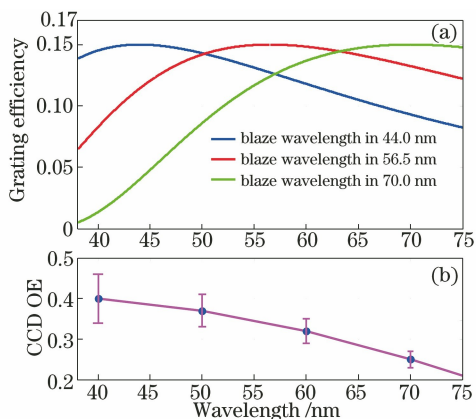


图 12 TVLS 光栅效率和 CCD 量子效率随波长的变化曲线。

(a) 光栅效率; (b) CCD 量子效率

Fig. 12 TVLS grating efficiency and CCD quantum efficiency change with wavelength. (a) Grating efficiency; (b) CCD quantum efficiency

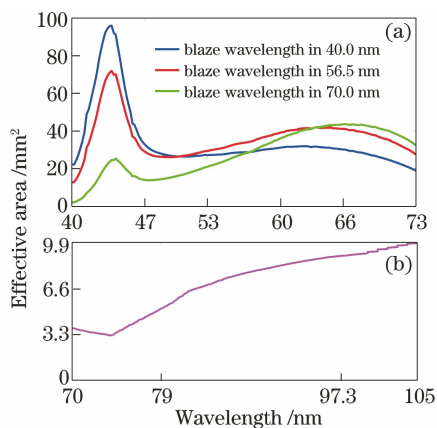


图 13 仪器有效面积随波长的变化曲线。

(a) 本文提出的仪器; (b) Solar Orbiter/SPICE

Fig. 13 Instrument effective area change with wavelength.

(a) Proposed instrument; (b) Solar Orbiter/SPICE

## 5 结 论

在过去发射的用于空间极紫外探测的同型号仪器中,由于 SVLS 和 TULS 光栅在理论上仅仅具有两个消像散点,因此最多可实现两个波段的极紫外探测,国内外至今还没有实现一台仪器同时探测三个极紫外波段。本文突破 SVLS 光栅和 TULS 光栅工作在罗兰圆结构下的限制,建立了 TVLS 光栅工作在非罗兰圆结构下的一般像差校正理论,获得了最小化光栅离轴像差的条件和 TVLS 光栅的初

始解。工作在非罗兰圆结构下的 TVLS 光栅成像光谱仪,不需要光栅的旋转和探测器的移动,使用三个平场探测器即可同时实现三波段太阳极紫外消像散成像,具有很好的空间和光谱成像性能。利用周期性多层镀膜,本文设计的 TVLS 光栅成像光谱仪可以实现对太阳极紫外的大视场、宽波段同时观测,仪器具有高空间分辨率、高光谱分辨率和高仪器传输效率。这样的仪器可作为下一代太阳探测仪器实现在极紫外波段的空间观测。

## 参 考 文 献

- [1] Dwivedi B N. EUV spectroscopy as a plasma diagnostic[J]. Space Science Reviews, 1993, 65(3/4): 289-316.
- [2] Wang T J, Thomas R J, Brosius J W, et al. Underflight calibration of SOHO/CDS and Hinode/EIS with EUNIS-07 [EB/OL]. (2011-09-29) [2020-07-07]. <https://arxiv.org/abs/1109.6598>.
- [3] Walsh R W. How is the solar corona heated [J]. Science, 2005, 307(5706): 51-53.
- [4] Priest E, Forbes T. Magnetic reconnection [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] Howard T. Coronal mass ejections: an introduction [J]. Space Science Reviews, 2013, 448(1): 915.
- [6] Rust T, Kankelborg C C. Quiet-Sun explosive events observed in He ii  $\lambda 304$  with MOSES-06 [J]. The Astrophysical Journal, 2019, 877(1): 59.
- [7] Lee K S, Thompson K P, Rolland J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 23378-23384.
- [8] Yu L, Chen J X, Xue H. Far ultraviolet imaging spectrometer for space-borne global ionosphere and atmospheric driver connection limb observation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1212003. 于磊, 陈结祥, 薛辉. 星载全球电离层与大气驱动力耦合临边观测远紫外成像光谱仪 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1212003.
- [9] Montero-Orille C, Prieto-Blanco X, González-Núñez H, et al. Two-wavelength anastigmatic Dyson imaging spectrometers [J]. Optics Letters, 2010, 35(14): 2379-2381.
- [10] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9156-9168.
- [11] Zhu Y J, Yin D Y, Chen Y H, et al. Design of hyperspectral resolution ultraviolet Offner imaging spectrometer system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0222001. 朱雨霁, 尹达一, 陈永和, 等. 高光谱分辨率紫外

- Offner 成像光谱仪系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0222001.
- [12] Feng L, Wei L D, Yang L, et al. Design of double-channel hyperspectral imaging system based on curved prism[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0511002.  
冯蕾, 魏立冬, 杨雷, 等. 双通道曲面棱镜高光谱成像系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0511002.
- [13] Yu L, Lin G Y, Wang S R. Tandem gratings spectrometer for spectroscopy broadband anastigmatic imaging[J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 351-354.
- [14] Windt D L. EUV multilayer coatings for solar imaging and spectroscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9604: 96040P.
- [15] Poletto L, Gasparotto A, Tondello G, et al. Design of the extreme-ultraviolet spectrometer for imaging spectroscopy on the Solar Orbiter mission [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5488: 898-909.
- [16] 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.
- [17] 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): 112-120.
- [18] Consortium T S, Anderson M, et al. The solar orbiter SPICE instrument: an extreme UV imaging spectrometer[EB/OL]. (2019-09-03) [2020-07-07]. <https://arxiv.org/abs/1909.01183>.
- [19] Caldwell M E, Morris N, Griffin D K, et al. The VUV instrument SPICE for Solar Orbiter: performance ground testing [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10397: 1039708.
- [20] Timothy J G, Berger T E, Morgan J S, et al. HIRES: a high-resolution stigmatic extreme ultraviolet spectroheliometer for studies of the fine-scale structure of the solar chromosphere, transition region, and corona[J]. Optical Engineering, 1991, 30(8): 1142-1149.
- [21] Beutler H G. The theory of the concave grating [J]. Journal of the Optical Society of America, 1945, 35(5): 311-350.
- [22] Huber M C, Tondello G. Stigmatic performance of an EUV spectrograph with a single toroidal grating [J]. Applied Optics, 1979, 18(23): 3948-3953.
- [23] Harada T, Takahashi K, Sakuma H, et al. Optimum design of a grazing-incidence flat-field spectrograph with a spherical varied-line-space grating[J]. Applied Optics, 1999, 38(13): 2743-2748.
- [24] ZEMAX is a trademark of Zemax development corporation[EB/OL]. [2020-07-07]. <https://www.zemax.com>.
- [25] Poletto L, Boscolo A, Tondello G. Characterization of a charge-coupled-device detector in the 1100-0.14-nm (1-eV to 9-keV) spectral region [J]. Applied Optics, 1999, 38(1): 29-36.