

文章编号 1004-924X(2020)02-0303-12

Lyman α 与可见光双波段内掩式日冕仪

王蕴琦, 张 广, 何玲平, 郭权锋, 张宏吉, 王海峰, 王孝东, 陈 波*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 太阳是地球能量的主要来源, 太阳活动和变化对地球影响极大。为了满足天文学家对太阳观测和研究的需求, 设计一种新型 Lyman α 和可见光双波段内掩式日冕仪(SCI 日冕仪), 能够在 121.6 nm 和 700 nm 两个波段同时对日冕进行高分辨率成像观测。根据太阳在 121.6 nm 和 700 nm 日面与日冕的辐射特性确定仪器的参数, 给出了日冕仪的初始结构, 建立评价函数对初始结构进行优化。分析了日冕仪光学系统的成像性能和各个光学元件产生杂散光对成像性能的影响, 确定影响系统杂散光抑制水平的主要光学元件和机械结构, 提出了对光学元件表面粗糙度的要求, 给出了里奥光阑的位置和通光口径。还设计了日冕仪光学反射镜和光学分色镜的膜系结构, 实现了对内日冕在 121.6 nm 和 700 nm 两个波段的同時成像。实验结果表明: SCI 日冕仪视场覆盖 1.1~2.5 个太阳半径(R_s , 取 $1 R_s = 0.267^\circ$), 空间分辨率优于 $4.8''$, 杂散光抑制水平在 1.1 R_s 处优于 10^{-6} 量级, 在 2.5 R_s 处优于 10^{-8} 量级, 满足观测需求。

关键词: 光学仪器; 日冕仪; Lyman α ; 可见光; 双波段; 内掩式

中图分类号: P111.41; P182.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202802.0303

Solar coronagraph imager based on internal occulting in Lyman-alpha and visible bands

WANG Yun-qi, ZHANG Guang, HE Ling-ping, GUO Quan-feng, ZHANG Hong-ji,
WANG Hai-feng, WANG Xiao-dong, CHEN Bo**(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China)*** Corresponding author, E-mail: chenb@ciomp.ac.cn*

Abstract: The sun is the main source of Earth's energy. As such solar activity and changes have a great influence on the Earth. To meet the solar observation and research needs of astronomers, a new type of Lyman alpha and visible dual-band internal occulting coronagraph was designed to meet the needs of high-resolution imaging observation of the corona at 121.6 nm and 700 nm for space. Firstly, the parameters of the instrument were determined according to the radiation characteristics of the solar disc and corona in the 121.6 nm and 700 nm bands and the initial structure of the coronagraph was given. The initial structure was optimized by an evaluation function. The imaging performance of the coronagraph optics was calculated and the influence of various optical elements on stray light was analyzed. The main optical components and mechanical structure affecting stray light were determined and the position and surface treatment method of a Lyot stop were designed. The coating film structure of the optical components and optical chromoscope of the coronagraph were designed to achieve simultaneous

收稿日期: 2019-06-27; 修订日期: 2019-08-17.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA15320103)

imaging in the 121.6 nm and 700 nm bands. The design and analysis results show that the field of view (FOV) of the coronagraph covers a 1.1 ($R_s=0.267$ degrees) to 2.5 solar radius, the effective focal length of the system is 945 mm, the spot radius root mean square (RMS) of the entire field of view is less than 10 μm , and the angular resolution is better than 4.8 arcsec. The stray light suppression level of the system is better than 10^{-6} at 1.1 R_s and 10^{-8} at 2.5 R_s .

Key words: optical instrument; coronagraph; Lyman alpha; visible light; dual-band; internal occulting

1 引言

莱曼阿尔法(Lyman α)谱线由太阳中最丰富的元素——氢激发而成,是太阳物理学中的一条重要谱线。早在 1970 年科学家们就探测到了太阳日冕中的 Lyman α 辐射,从此科学家们通过对太阳 Lyman α 数据的分析获得了很多关于太阳色球层以及太阳内部氢原子与等离子体耦合的科学信息,并通过对 Lyman α 谱线随太阳半径距离的变化确定了太阳等离子的径向速度。对太阳 Lyman α 谱线的长期观测能够为研究太阳耀斑、日珥爆发,日冕抛射物的变化过程及它在内日冕中的动态演化和动力学特征提供实时的数据支撑,对科学研究和空间天气预报具有重要的意义。

迄今为止,比较有代表性的日冕观测设备主要有三台,分别是 SOHO 的 LASCO^[1],法国的 LOYT^[2-3]和意大利的 Solar Orbiter Metis^[4-7]。SOHO 的 LASCO 是最早的天基日冕仪,它由 C1,C2 和 C3 三台日冕仪组成,C1 采用折反混合的光学结构,C2 和 C3 采用透射式光学结构,LASCO 通过三台日冕仪的图像拼接,其观测范围能从 1.3 太阳半径到 30 太阳半径(R_s , $1R_s=0.267^\circ$),LASCO 对太阳内日冕的观测分辨率能达到 2.4"。法国的 LYOT 是中法合作项目,由法国的 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)实验室负责研制 Lyman α 波段日冕仪,该项目只进行到方案阶段。由意大利多家科研机构研制的 Solar Orbiter Metis 预计于 2020 年 2 月发射,Solar Orbiter Metis 采用了外掩式、同轴、折反混合的光学结构,主镜和次镜为环形球面反射镜,在主镜的中心处设计有拒热镜作为日冕仪的外掩体,Solar Orbiter Metis 日冕的观测范围从 1.5 R_s 到 17 R_s ,可见光波段分辨率为 10",紫外波段分辨率为 20"。

近年来,国内也有几家科研机构 and 大学开展了日冕仪研制工作^[8-11]。中国科学院长春光机所、山东大学和中国科学院国家天文台等研究所及高校,针对日冕仪研制所涉及的关键技术开展了一系列攻关工作。2018 年 10 月 22 日,山东大学、长春光机所和云南天文台三家单位联合,在丽江高美古观测站使用完全自主研发的地基日冕仪,获得了太阳 E 冕 Fe XIV 线的图像,观测效果与日本的 YOGIS 日冕仪水平相当。这是我国科学家首次获取地基太阳日冕图像。

本文提出了一种新型天基 Lyman α 和可见光双波段日冕仪设计方案(莱曼阿尔法太阳日冕成,SCI),分析了利用 Lyman α 和 700 nm 谱线对日冕进行观测的可行性,计算了系统的光学参数;介绍了日冕成像光学系统的结构、设计和优化过程。对日冕仪做杂散光分析,确定了影响日冕仪杂光抑制能力的主要因素,提出了对光学元件的要求;还设计了 SCI 光阱、里奥(LYOT)光阑和分色镜,实现了对 121.6 nm 和 700 nm 双波段日冕成像和杂散光抑制。

2 参数计算与结构选择

日冕是在太阳日面以外部分产生的辐射,在 Lyman α 波段,1.1 R_s 处日冕辐射强度比日面辐射强度小两个数量级。在可见光波段,1.1 R_s 处日冕辐射强度比日面辐射强度小 4 个数量级,具体见图 1 所示^[1]。日冕辐射亮度随着距离太阳中心位置距离增加而变弱,Lyman α 波段辐射在 2.5 R_s 处日冕的亮度 2.6×10^{11} ph/cm²/sr/s,700 nm 辐射在 2.5 R_s 处的辐射亮度为 7.6×10^{11} ph/cm²/sr/s。为了在强光照条件下对微弱的日冕辐射成像,需要抑制杂光,获得足够的能量,具有足够的空间分辨率,保证获得高质量日冕图像。

为此,根据对日冕科学目标的分辨率要求,结合现有的探测器像元尺寸和传递函数参数即可计算得到 SCI 日冕仪的焦距长度;同时,根据日冕科学目标对信噪比的要求,结合 SCI 日冕仪所用光学元件和探测器量子效率的特性,即可计算得到 SCI 日冕仪的入瞳面积,以便获得足够的能量。

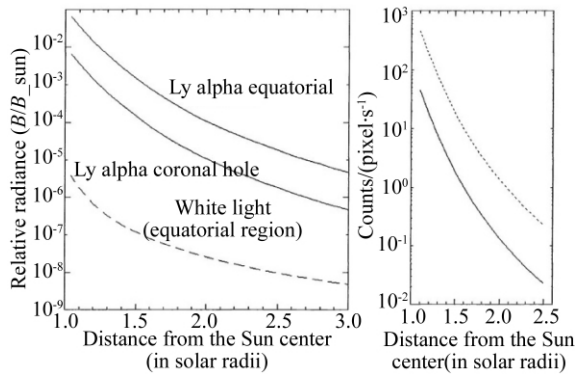


图 1 各太阳半径日冕与日面相对照度曲线
Fig. 1 Curves of coronal relative illumination

根据日冕仪对目标观测分辨率的要求,根据日冕仪使用的探测器像元尺寸即可求得光学系统的有效焦距最小值,计算公式如下:

$$\delta = f_e \cdot \tan \theta, \quad (1)$$

式中: δ 为探测器像元尺寸, f_e 为有效焦距, θ 为光学系统像元角分辨率。SCI 使用探测器像元尺寸为 $11 \mu\text{m}$,分辨率要求不低于 $2.4''$,根据式(1)计算得到日冕仪系统的有效焦距不小于 945.380 mm 。

为了保证 SCI 日冕仪双工作波长在奈奎斯特采样频率处均能够获得足够的传递函数,SCI 日冕仪需要拥有足够的入瞳直径。计算公式如下:

$$\theta = 1.22 \cdot \lambda/D, \quad (2)$$

式中: θ 为光学系统的极限角分辨率, λ 为工作波长, D 为系统的入瞳直径。根据式(2)计算得到 SCI 日冕仪的入瞳直径不得小于直径 36 mm 。

为保留充足的设计冗余,取 SCI 日冕仪的入瞳为 60 mm ,计算 SCI 日冕仪的信噪比,计算公式如下:

$$S_e = D \times \tau \times \epsilon \times \omega \times B_{\text{sun}}, \quad (3)$$

式中: S_e 为探测器上每个像元在单位时间产生的电子个数, D 为光学系统的入瞳面积, τ 为光学系统的光谱响应(透过率), ϵ 为探测器的量子效率, ω 为光学系统的像元角分辨率, B_{sun} 为目标亮度。

系统信噪比(Signal to Ratio,SNR)的计算公式如下:

$$\text{SNR} = 20 \times \log \left(\frac{S_e \times t_{\text{int}}}{\sigma_{\text{RMS}} + D_e \times t_{\text{int}}} \right), \quad (4)$$

式中: S_e 为探测器上每个像元在单位时间产生的电子个数, D_e 为探测器暗电流噪声电子数, σ_{RMS} 为探测器读出噪声电子数, t_{int} 为积分时间。根据式(3)和式(4)计算得到 SCI 日冕仪两个通道的信噪比,如表 1 所示。

根据前面的设计分析与理论计算,结合工程稳定性的要求,SCI 日冕仪的具体光学设计参数如表 2 所示。

表 1 SCI 日冕仪信噪比

Tab. 1 SNR parameters of solar coronagraph imager

参数	通道	
	121.6 nm	700 nm
入瞳面积 D/cm^2	30.18	30.18
像元角分辨率 ω/sr	1.28×10^{-10}	1.28×10^{-10}
光学系统光谱响应 τ	0.07	0.1
探测器量子效率 ϵ	0.30	0.70
目标亮度 $B_{\text{sun}}/(\text{ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	4.24×10^{10}	1.23×10^{11}
信号光电子数 $S_e/(\text{e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	3.44	33.26
暗电流噪声 $D_e/(\text{e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	优于 1	优于 1
芯片读出噪声 $\sigma_{\text{RMS}}/(\text{e}^- \cdot \text{pixel}^{-1})$	2.5	2.5
曝光时间 t_{int}/s	120	120
S_e/N_e	3.370	32.581
信噪比/dB	10.55	30.26

表 2 日冕仪光学系统指标要求

Tab. 2 Requirements of optical system for SCI

参数	值
焦距	973 mm
视场	$1.1R_s \sim 2.5R_s, R_s = 0.267^\circ$
探测器	像元尺寸 $11 \mu\text{m}$, 像元数 2 k, CMOS 探测器 传函优于 0.17
像元分辨率	优于 $2.4 (")/\text{pixel}$
入瞳直径	62 mm
杂光抑制水平	优于 1.0×10^{-6} @ 1.1Rs 优于 5.0×10^{-8} @ 2.5Rs
平均传递函数	不低于 0.3 @ 50 lp/mm

3 光学设计

3.1 日冕仪成像原理

日冕仪按掩体的形式可以分为两类,第一类为外掩式日冕仪,这类日冕仪的掩体处在系统的前端,掩体的形式多为边缘为锯齿形的圆盘。这类日冕仪的优点是能够把日面的强光挡在系统之外,使得日冕仪本身对杂散光抑制水平要求较低,缺点是系统的渐晕比较严重,无法实现对日面边缘日冕的观测,意大利的 Solar Orbiter Metis 就是外掩式的日冕仪。

按照光学结构形式,日冕仪可以分为透射式、反射式和折反混合式三类。其中,反射式日冕仪的主要优点是可以通过对反射镜镀膜的控制,实现全谱段的观测。SOHO/LASCO 由三台日冕仪组成,其中 C1 为折反混合式日冕仪,C2 和 C3 为透射式日冕仪,由于材料透过率的限制,LASCO 无法实现 Lyman α 波段的观测。

本文以 LASCO C1 为例,对日冕仪的工作原理进行分析。图 2 是 LASCO C1 日冕仪的光路示意图。LASCO C1 是一个经典的内掩式日冕仪,其中包括物镜 O1、内掩体 D1、场镜 O2、准直镜 O3、二次成像物镜 O4、里奥光阑 A1 六个主要部分。如图所示,物镜 O1 负责将太阳成像于内掩体上,内掩体 D1 为一个锥形圆孔,锥形圆孔的直径由物镜 O1 的焦距和太阳发散角决定。场镜 O2 和准直镜 O3 负责将入瞳 A0 的像成在 LYOT

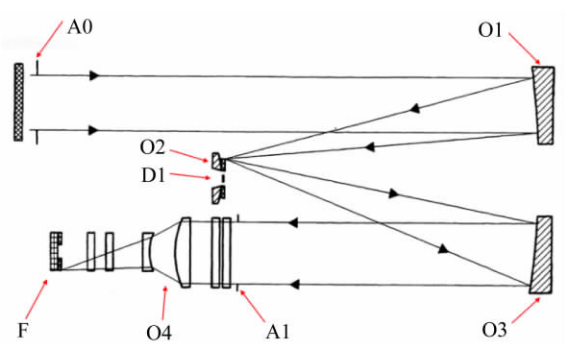


图 2 经典的 LYOT 日冕仪原理图

Fig. 2 Structure diagram of classical LYOT corona imager

光阑(A1)处,LYOT 光阑能够阻挡 A0 产生的衍射杂光。O4 是二次成像镜组,负责将日冕成像在像面 F 上。

LASCO C1 采用折反混合的结构形式,同时继承了透射日冕仪和反射式日冕仪的优点。LASCO C1 的准直系统为反射系统,系统中反射镜均为超光滑反射镜,能够很好地抑制来自散射的杂光,二次成像镜组为透射镜组,工艺性好,杂光抑制效果好。但是,由于透射系统的存在,LASCO C1 无法满足对极紫外及 Lyman α 波段的成像要求。

SCI 为了解决 LASCO C1 存在的问题,实现对太阳内日冕在 Lyman α 波段的观测,选用了内掩式、全反射光学结构。为了提高系统对杂散光的抑制水平,SCI 主镜的粗糙度优于 0.3 nm (RMS 值),次镜粗糙度优于 0.3 nm (RMS 值),其余光学元件的粗糙度优于 0.6 nm (RMS 值)。

3.2 SCI 初始结构设计

SCI 初始结构利用了二次曲面的性质,主镜为离轴抛物面,次镜为球面,三镜为离轴椭球面。主镜抛物面的焦点位于次镜上,且与三镜抛物面的一个焦点重合。SCI 的三镜为离轴椭球面,能够将一个焦点发出的光线自然地汇聚到另一个焦点处。

SCI 初始结构中,内掩体圆孔的直径由主镜焦距决定,内掩体锥角由主镜离轴角度和光线发散角决定。LYOT 光阑的位置受次镜曲率半径控制,优化时可以通过控制次镜出射光线的发散角度来约束 LYOT 光阑的位置。初始结构中主镜和次镜将入瞳成像于 LYOT 的位置上,次镜和

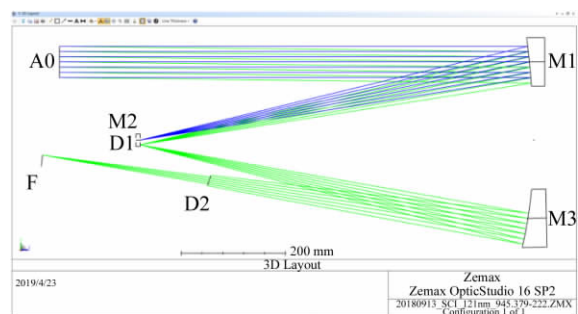


图 3 SCI 初始结构光路

Fig. 3 Optical path of initial structure for SCI

三镜将日冕成像于最终像面处。SCI 初始结构光路图如图 3 所示。

图 3 所示为 SCI 的初始结构,它由 M1, M2 和 M3 三块反射镜组成, M1 作为系统的物镜,将日面成像于 M2, M2 中心设计有内掩体,内掩体形式上是锥形圆孔,能够将日面光漏出系统。同时 M2 的环形镜面作为场镜能够控制光线发散角,在配合 M3 将入瞳 A0 成像于 LYOT 光阑 (D2) 处的同时,将日冕成像于像面 F。

SCI 的这种初始结构充分利用了二次曲面的性质,系统能够在轴上获得完美的像点,以保证后续优化。与经典的日冕仪(图 2)结构相比,SCI 结构利用椭球面的性质将场镜与二次成像镜组紧密连接在一起,简化了系统的复杂程度,提升了系统的能量利用率,适用于紫外和 Lyman α 波段的光学系统。

3.3 SCI 优化设计

在初始结构(图 3)的基础上,利用光学优化设计软件中建立基于“子午方向和弧矢方向弥散斑半径(RMS 值)”的评价函数,进一步优化系统,得到了 SCI 最终的光学结构。SCI 光学 3D 模型如图 4 所示。

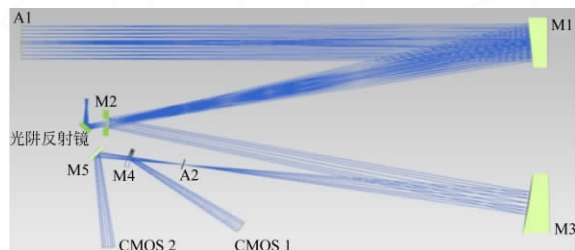


图 4 SCI 光学 3D 模型

Fig. 4 Optical three-dimensional layout of SCI

如图 4 所示,最终的 SCI 光学结构为了实现 Lyman α 和可见光 700 nm 的双波段设计,在 LYOT 光阑(A2)的后面增加了分光镜(M4),并在分光镜后设计了一块平面反射镜(M5)来压缩光路的长度以适应 ASO-S 卫星平台的要求。详细的 SCI 光学元件组成如表 2 所示。

SCI 入瞳直径为 60 mm,入瞳到主镜距离 930 mm,主镜通光口径为 83 mm,主镜为离轴抛物面;次镜为凸环形球面反射镜,中心圆形锥孔直

径与日面经过主镜所成像尺寸匹配,锥孔角度与主镜 F 数和离轴角度匹配,次镜中心锥孔的直径为 7.8 mm,角度为 $\pm 15^\circ$;三镜通光口径为 106 mm;LYOT 光阑直径为 20.8 mm;分光镜与折叠镜的通光口径均为 36.8 mm。成像仪的入瞳直径为 62 mm,有效焦距为 973 mm。

表 2 SCI 的结构组成

Tab. 2 Optical composition of SCI

组成部分	光学元件
物镜 M1	离轴抛物面
内掩体,准直镜 M2	凸球面
二次成像镜组 M3	离轴椭球面
分光镜 M4	平面
折叠镜 M5	平面

3.4 性能分析

SCI 的视场(Field Of View, FOV)从 1.1Rs 延伸到 2.5Rs。内部视场受限于内部掩体处的一次像面的成像质量和 ASO-S 卫星平台的指向精度,而外部视场受限于 Lyman α 和 700 nm 临边昏暗效应产生的渐晕以及 CMOS 探测器的像面尺寸。

利用光学优化设计软件光线追迹得到 SCI 成像仪 121.6 nm 通道和 700 nm 通道全有效视场的点列图(图 5)和传递函数曲线(图 6)。如图所示,SCI 双通道全视场弥散斑优于 $10 \mu\text{m}$, 121.6 nm 通道传递函数在 50 lp/mm 处优于 0.4, 700 nm 通道传递函数在 50 lp/mm 处优于 0.3。

为了达到设计指标,对不同的半径公差、面形误差和不同光学元件间的尺寸公差进行了仿真分析。分析结果表明:反射镜的半径公差要求不大于 $\pm 0.5 \text{ mm}$;主次镜表面粗糙度不大于 0.3 nm;主镜、次镜和三镜的空间位置公差不大于 $\pm 0.05 \text{ mm}$,其他反射镜不大于 $\pm 0.20 \text{ mm}$;主镜和三镜的角度公差不大于 $\pm 3'$,其他反射镜不大于 $\pm 6'$ 。SCI 系统将后截距和探测器的空间角度作为公差补偿量,在 ZEMAX 软件中对系统的公差性能进行分析,得到 SCI 系统在加入公差

后 121.6 nm 通道的 MTF 曲线和弥散斑点列图,如图 7 所示。同时,得到了 SCI 系统在加入

公差后 700 nm 通道的 MTF 曲线图和弥散斑点列图如图 8 所示。

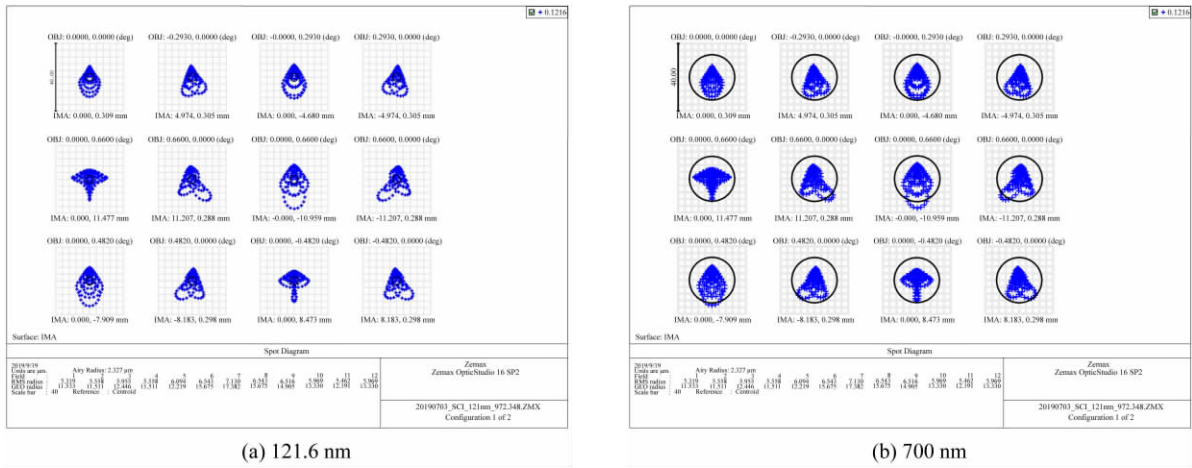


图 5 SCI 全有效视场弥散斑点列图
Fig. 5 Spot diagrams of SCI in full effective FOV

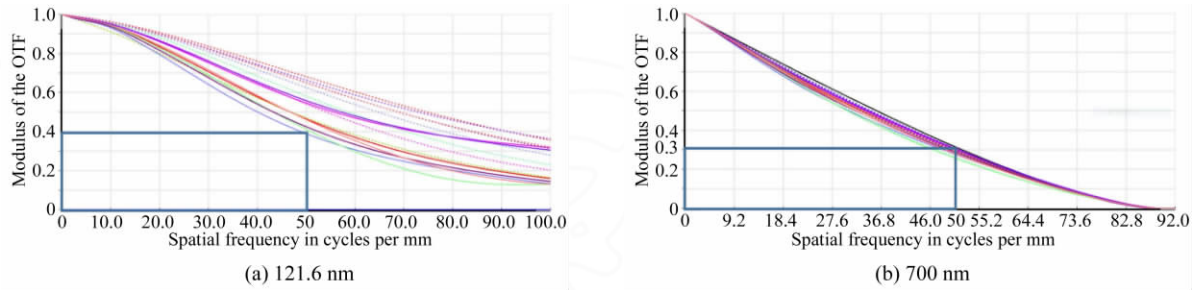


图 6 SCI 全有效视场传递函数曲线
Fig. 6 MTF curves of SCI in full effective FOV

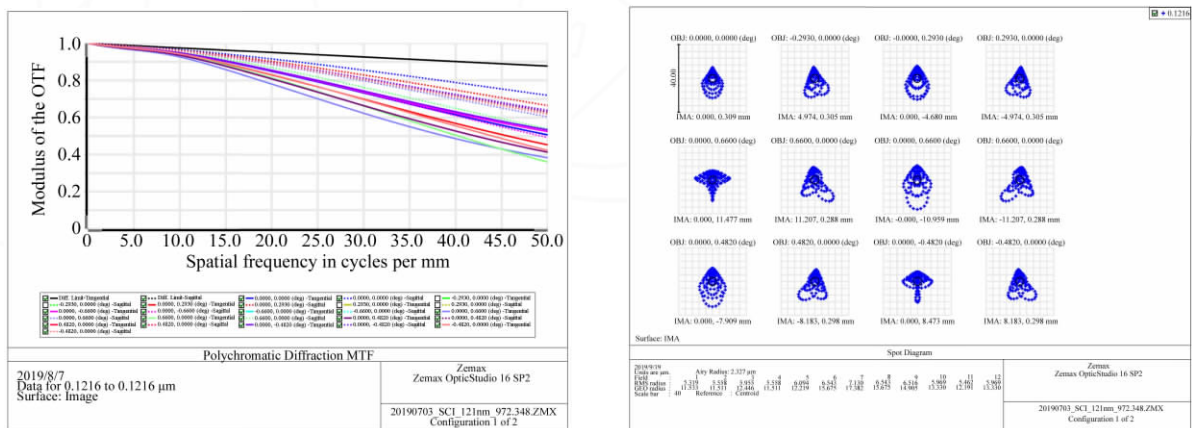


图 7 SCI 121.6 nm 通道公差性能分析
Fig. 7 Tolerance analysis of SCI at 121.6 nm

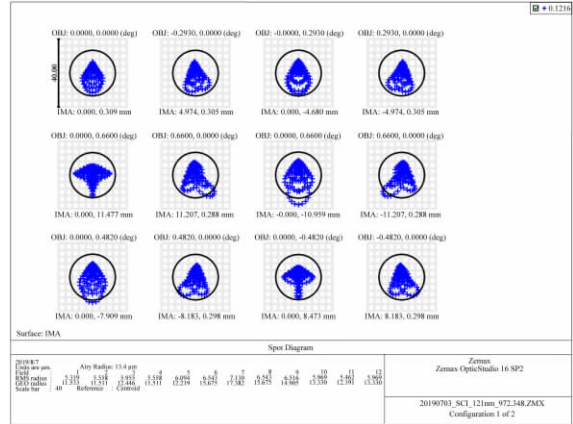
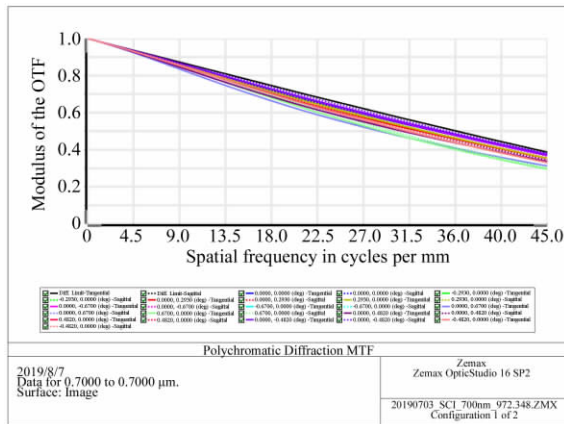


图 8 SCI 700 nm 通道公差性能分析
Fig. 8 Tolerance analysis of SCI at 700 nm

4 工作波段设计

在完成了 SCI 光学设计后,为了实现 SCI 在 121.6 nm 和 700 nm 两个波段同时成像,并且能有效抑制带外辐射对两个波段的影响,光学系统的元件要具有良好的光谱响应。为此,SCI 采用双波段多层反射膜和窄带滤光片配合使用的技术路线提高系统对带外辐射的抑制水平,提高信噪比,实现两个波段的的同时成像。

SCI 的主镜承受了进入系统中的全部太阳辐射,其表面散射对杂散光影响最大,次镜作为物面会通过三镜与日冕共同成像于最终像面。为了降低光学元件表面散射产生的杂散光,SCI 主镜和次镜应具有极低的粗糙度,以确保系统的杂散光抑制水平和信噪比。经分析计算,主镜和次镜需要满足表面粗糙度 RMS 值优于 0.3 nm,且同时满足在 121.6 nm 波段反射率不低于 50%,在 700 nm 波段反射率不低于 80%。

太阳辐射经过 SCI 主镜和次镜后,日冕辐射经过次镜中间锥孔(内掩体)进入到光阱中。到达三镜的辐射只有日冕辐射部分,微弱的日冕辐射不会引发强烈的散射杂散光,因此 SCI 对反射面粗糙度的要求低于主镜、次镜,SCI 三镜的表面粗糙度只需要优于 0.6 nm(RMS 值)即可满足成像和杂光抑制的要求。同时,三镜在工作波长内还应具有较高的反射率。通过在超光滑表面基底上镀制在 121.6 nm 和 700.0 nm 波段均具有较高反射率多层膜,保证三镜具有足够多的能量到达 SCI 像面。

SCI 的四镜是分光镜,其作用是反射 121.6 nm 的辐射,成像到探测器感光面上;同时透过 700.0 nm 的辐射,进入到后面的成像和探测系统,因此,四镜采用 LaF₃/MgF₂ 多层膜^[12-14],实现 121.6 nm 窄带范围内的高反射率及 700 nm 波段的高透过率。

五镜是为了减小 SCI 光学系统的结构尺寸,反射 700 nm 辐射到达相应的 CMOS 探测器。五镜采用平面反射镜,表面镀有 700 nm 高反多层膜,以保证有足够多的能量到达像面并实现良好的带外抑制。

此外,在 SCI 的 121.6 nm 探测器前布置一块 121.6 nm 滤光片,滤掉带外辐射,实现对 121.1 nm 日冕成像。在 SCI 的 700.0 nm 探测器前面布置一块 700 nm 窄带滤光片,滤掉带外辐射,实现对 700 nm 成像。SCI 所使用滤光片参数如表 3 所示。

表 3 SCI 滤光片参数

Tab. 3 Parameter of filters in SCI

波段	波长精度	带宽	峰值透过率	带外透过率
/nm	/nm	/nm	%	
121.6	±4.0	15	21	平均低于 3%
700	±8.0	80	75	平均低于 0.01%

SCI 系统在单一波长的透过率由各元件在这个波长的反射率和透过率乘积求得。计算 SCI 系统在各个波长的透过率即可得到 SCI 系统的光谱响应曲线,即:

$$\begin{bmatrix} E_{\lambda_1} \\ E_{\lambda_2} \\ E_{\lambda_3} \\ \vdots \\ E_{\lambda_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1\lambda_1} \\ T_{1\lambda_2} \\ T_{1\lambda_3} \\ \vdots \\ T_{1\lambda_k} \end{bmatrix} \times \cdots \times \begin{bmatrix} T_{m\lambda_1} \\ T_{m\lambda_2} \\ T_{m\lambda_3} \\ \vdots \\ T_{m\lambda_k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_{1\lambda_1} \\ R_{1\lambda_2} \\ R_{1\lambda_3} \\ \vdots \\ R_{1\lambda_k} \end{bmatrix} \times \cdots \times \begin{bmatrix} R_{n\lambda_1} \\ R_{n\lambda_2} \\ R_{n\lambda_3} \\ \vdots \\ R_{n\lambda_k} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中： $E_{\lambda k}$ 代表 SCI 系统在波长 λk 处的透过率响

应， $T_{m\lambda k}$ 代表 SCI 系统中第 m 个反射镜在波长 λk 处的透过率， $R_{n\lambda k}$ 代表 SCI 系统中第 n 个反射镜在波长 λk 处的反射率。

SCI 系统中 700 nm 通道共经历主镜、次镜、三镜、分色镜(透过)、平面反射镜和窄带滤光片 6 个光学元件，121.6 nm 通道共经历主镜、次镜、三镜、分色镜(反射)和窄带滤光片 5 个光学元件。根据式(1)计算 SCI 中各个元件的光谱响应曲线，得到 SCI 光学系统的光谱响应曲线，如图 9 所示。

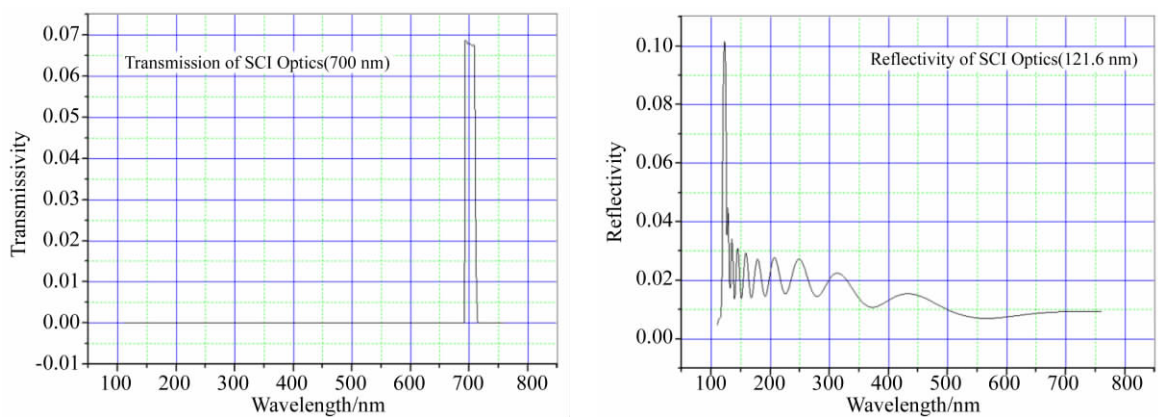


图 9 SCI 光谱响应分布

Fig. 9 Spectral response curves of SCI optical system

从图 9 中可以看出，SCI 系统在 121.6 nm 处的光谱响应数值为 0.1，700 nm 处光谱响应数值为 0.07，能够获得太阳 121.6 nm 和 700 nm 双波段辐射图像，达到对两个波段成像的目的。

5 分光镜与光阑设计

5.1 分色镜设计

SCI 采用共口径光学设计，系统由两部分组成：LYOT 光阑之前为双波段公用的离轴三反光学系统；LYOT 之后为 121.6 nm 和 700.0 nm 的两个通道的光学元件，主要包括分色镜、700 nm 折转镜、波长选择滤光片和 CMOS 探测器。

SCI 系统利用平行平板分色镜实现对 Lyman α 波段与可见光 700.0 nm 波段的分离。平行平板分光镜采用熔石英基底，双面抛光，其面形精度优于 $\lambda/50$ ，粗糙度优于 0.6 nm。分色镜正面镀有多层高反膜，只对 Lyman α 波段有反射

率，能够反射 Lyman α 波段的同时自然透过 700.0 nm，分色镜采用平行平板结构，在光路中倾斜 20° ，避免鬼像进入光路干扰成像。分色镜在 Lyman α 波段的反射率不低于 66%，在 700.0 nm 的透过率不低于 80%。图 10 为分色镜在 700.0 nm 波段和 Lyman α 波段的透射和反射特性曲线。

5.2 光阑设计

工作时，SCI 对强目标边缘的弱目标进行成像观测，为了提高像面图像的对比度，需要在系统中的位置设立挡光环。为了避免太阳日面的强光入射到系统的主镜引起散射，挡光环可以有效阻止背景光及太阳日面光线照射在入瞳边缘时引起的各种角度散射光到达像面。

SCI 系统采用非等高、非等距离分布的挡光环设计，设定 Φ 为光学镜筒的内壁直径， δ 为镜筒内壁半径的预留误差， Φ_0 为通光孔径(直径)， θ 为系统的半视场角， $\Delta\theta$ 为半视场角预留误差， L 为

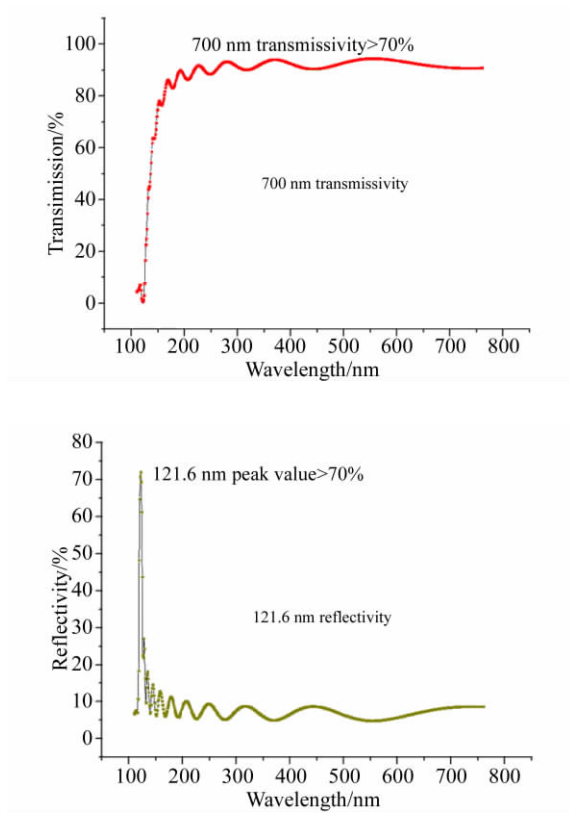


图 10 分色镜的透过率和反射率曲线

Fig. 10 Transmission and reflection curves of dichroic mirror

主镜筒总长(从入瞳开始计算到主镜前端挡光环的距离)。则除了第一个挡光环(入瞳)和最后一个挡光环(主镜压圈)外,其余挡光环的位置 D_i 和高度 H_i 如下:

$$D_i = \frac{B(e - A \tan \theta - a) + (c + \tan \theta - e)H_{i-1}}{c - a - (B - H_{i-1}) \tan \theta}, \quad (1)$$

$$d_i = e + (D_i - A) \tan \theta, \quad (2)$$

$$H_i = \frac{(g - a)D_i - A(d_i - a)}{g - d_i}, \quad (3)$$

其中:

$$A = 0, \quad (4)$$

$$B = L, \quad (5)$$

$$a = -\Phi/2, \quad (6)$$

$$c = -(\Phi_0 + 2\delta)/2, \quad (7)$$

$$g = -(\Phi_0 + 2\delta)/2 + L \tan(\theta + \Delta\theta), \quad (8)$$

$$e = -(\Phi_0 + 2\delta)/2 - L \tan(\theta + \Delta\theta). \quad (9)$$

SCI 系统的入瞳直径为 60 mm,挡光环内径单边预留误差为 0.3 mm,半视场角预留误差为

0.03°,系统的点透过率函数值(Point Transmittance Function, PTF)优于 1×10^{-6} 。由此计算得到 SCI 主镜筒挡光环的最终参数,如表 3 所示。

表 3 主镜筒挡光环参数

Tab. 3 Parameters of system main baffles

编号	位置 D_i /mm	高度 H_i /mm	PTF/ 10^{-6}
1	0	9	—
2	95	10	1.482 957
3	180	12	1.432 180
4	165	14	1.180 407
5	150	16	0.795 701
6	103	17	7.109 139
7	60	18	1.908 318
8	50	19	0.182 434
9	37	20	1.283 098

表中编号 1~9 的位置依次从入瞳到主镜,其中后面三个挡光环由于离轴光束的影响,在通光的地方开有相应的缺口。图 11 为主镜筒挡光环结构。

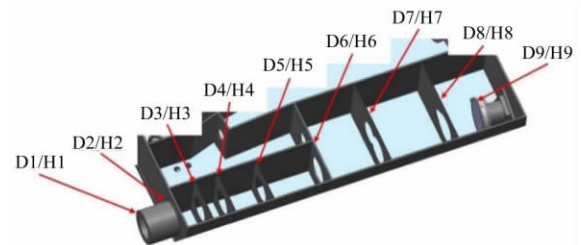
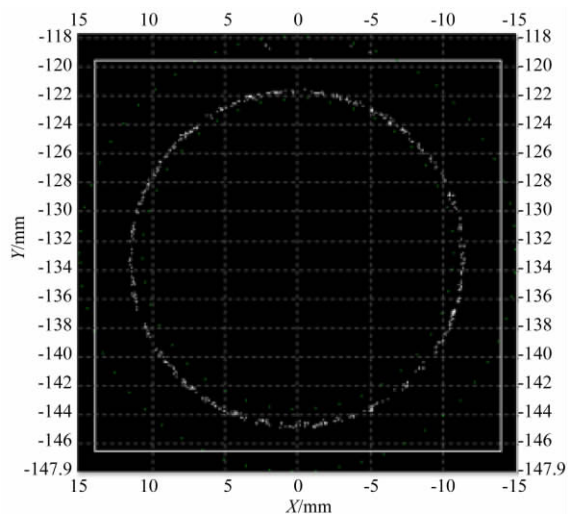


图 11 SCI 主镜筒挡光环分布

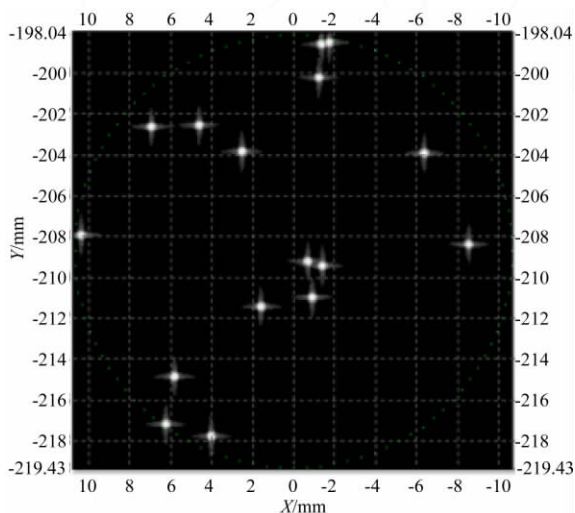
Fig. 11 Distribution of system main baffles for SCI

除主镜筒挡光环外,为了阻挡 SCI 入瞳处的衍射杂散光,在系统中入瞳像面处设计了 LYOT 光阑,利用杂散光分析软件对 SCI 入瞳处的衍射杂散光进行分析,分析结果能够显示出衍射杂散光的比重,进而可以得到 LYOT 光阑的通光尺寸,结果如图 12 所示。

图 12(a)为 LYOT 光阑面上衍射环的分布,图 12(b)为衍射杂光到达像面后的分布。可以看出,衍射杂散光到达像面后完全是随机分布,只能在 LYOT 光阑处设立光阑进行遮挡。根据分析



(a) 衍射环在像面的光线分布
(a) Distribution of diffraction stray light on LYOT plane



(b) 入瞳衍射环到达像面的光线分布
(b) Distribution of diffraction stray light on SCI imaging plane

图 12 衍射杂散光 Tracepro 软件分析结果

Fig. 12 Tracepro analysis of stray light caused by diffraction

结果,入瞳处的衍射杂散光能量约占到达像面的光线总能量的 4%,因此,LYOT 光阑的内径尺寸应为该处光线尺寸的 96%为宜,这样既能够完全阻挡衍射杂光,又能保持系统的成像性能。此外,为了将金属表面的散射杂散光影响降至最低,SCI 系统中所有光阑的内径都采用了刀口设计,防止散射的发生。

如前所述,SCI 的主镜和次镜的粗糙度 RMS 值优于 0.3 nm,其它光学元件粗糙度 RMS 值优于 0.6 nm,光路中机械元件表面做涂黑处理,光

阑片边缘做刀口处理,以提高系统的杂散光抑制水平。在杂散光分析软件中建立 SCI 光机结构模型进行杂散光分析,结果如图 13 所示。

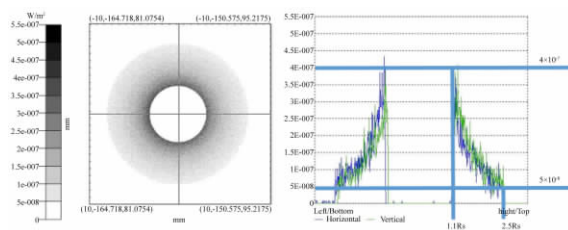


图 13 SCI 光机模型杂散光分析结果

Fig. 13 Analysis results of stray light for SCI model

如图 13 所示,SCI 杂散光抑制水平在 1.1Rs 处优于 5×10^{-7} ,在 2.5Rs 处满足 3×10^{-8} ,系统的杂散光抑制水平优于 1.1Rs 到 2.5Rs 处的日冕亮度,能够保证观测到太阳 1.1Rs~2.5Rs 的日冕图像。

6 光机结构布局

根据 SCI 日冕仪光学结构及仪器本身对杂散光抑制性能的要求,对 SCI 日冕仪光机结构布局进行了初步设计。SCI 日冕仪结构主要由主镜、次镜、三镜、反射镜、滤光片组件、偏振组件、快门组件、光阑、挡光板和探测器组件等构成,与上盖板组成光学箱体,其余组件安装在光学箱体内部和外壁上,布局如图 14 所示。

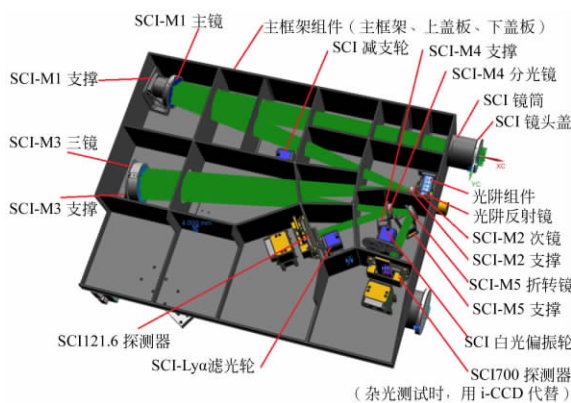


图 14 SCI 日冕仪光机结构布局

Fig. 14 Structure diagram of SCI

为满足天基日冕仪对稳定性和轻量化的要求,SCI 日冕仪对框架支撑结构与挡光环进行了

一体化设计,同时满足了SCI日冕仪作为航天载荷对刚度、强度以及轻量化要求。为满足对杂散光抑制性能的要求,SCI日冕仪采用分腔结构,腔室内壁进行了消光处理,腔室内部的结构简单,空间分配合理,尤其是主镜框架部分。分腔形式的结构布局在隔离光路的同时降低了强光照射下结构内壁二次散射光对光路的影响,提高了系统的杂散光抑制水平。

7 结 论

本文设计了一种双波段内掩式日冕仪,系统采用双波段共口径设计,LYOT之前为双波段共

用的离轴三反光学系统,LYOT光阑之后设计有光学分色镜,将121.6 nm和700 nm两个波段分开,分开后的光束再经由各自的后置滤光片滤光,分别成像到各自的CMOS探测器上。分色镜只对121.6 nm波段辐射有反射,对700 nm波段透过。SCI日冕成像仪的有效视场为 $0.294^\circ \sim 0.668^\circ$ 的环形视场,成像覆盖1.1Rs~2.5Rs的全部日冕目标,SCI光学系统的有效视场弥散斑优于 $10 \mu\text{m}$ 。SCI日冕仪整机双通道角分辨率均优于 $4.8''$,杂光抑制水平在1.1Rs处优于 10^{-6} 量级,2.5Rs处优于 10^{-8} 量级,可以在121.6 nm和700 nm两个波段对日冕进行成像。SCI日冕仪系统结构紧凑、性能优异,适合空间应用。

参考文献:

- [1] SOCKER D G, BRUECKNER G E, KORENDYKE C M, *et al.*. Spectrometric and spectropolarimetric observation of the solar corona with the LASCO/SOHO Lyot coronagraph[C]. *SPIE's 1994 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. Proc SPIE 2283, X-Ray and Ultraviolet Spectroscopy and Polarimetry, San Diego, CA, USA, 1994*: 53-57.
- [2] VIVES S, LAMY P L, VIAL J C. Optical design of the Lyman alpha coronagraph for the LYOT microsatellite [C]. *Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting. Proc SPIE 5171, Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics, San Diego, California, USA, 2004*: 298-306.
- [3] VIAL J C, SONG X Y, LEMAIRE P, *et al.*. The solar high-resolution imager: coronagraph LYOT mission [C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4853, Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics, Waikoloa, Hawai'i, USA, 2003*: 479-489.
- [4] ENRICO V, DEPPO V D, GIAMPIERO N, *et al.*. Preliminary internal straylight analysis of the METIS instrument for the solar orbiter ESA mission [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 8442, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, Amsterdam, Netherlands, 2012*: 84424N.
- [5] POLITO V, CORSO A, ZUPPELLA P, *et al.*. Analysis of optical efficiency of METIS coronagraph telescope on board of the Solar Orbiter mission [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, Amsterdam, Netherlands, 2012*: 84433G.
- [6] FINESCHI S, ANTONUCCI E, GIAMPIERO N, *et al.*. METIS: a novel coronagraph design for the Solar Orbiter mission [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, Amsterdam, Netherlands, 2012*: 84433H.
- [7] PANCRACCI M, FOCARDI M, USLENGHI M, *et al.*. On board processing procedures for the Solar Orbiter METIS coronagraph [C]. *SPIE Remote Sensing. Proc SPIE 8892, Image and Signal Processing for Remote Sensing XIX, Dresden, Germany, 2013*: 889218.
- [8] 张红鑫, 卢振武, 夏利东, 等. 白光日冕仪光学系统的杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2371-2376.
ZHANG H X, LU ZH W, XIA L D, *et al.*. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2371-2376. (in Chinese)
- [9] 卜和阳, 卢振武, 张红鑫, 等. 内掩式透射地基日冕仪中杂光鬼像的消除[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 231-236.
BU H Y, LU ZH W, ZHANG H X, *et al.*. Suppression of stray light ghost image in internally occulting refractive ground-based coronagraph [J].

- Chinese Optics*, 2013, 6(2): 231-236. (in Chinese)
- [10] 卜和阳, 张红鑫, 卢振武, 等. 内掩式透射日冕仪中 Lyot 光阑参数分析[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 147-152.
- BU H Y, ZHANG H X, LU ZH W, *et al.*. Analysis on the parameter of Lyot Stop in internally occulting refractive coronagraph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 147-152. (in Chinese)
- [11] 李达, 刘鹏, 陈斌, 等. 球面反射式日冕仪实验装置的杂光分析和实验验证[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1265-1271.
- LI D, LIU P, CHEN B, *et al.*. Stray light analysis and experimental verification of spherical reflective coronagraph experimental devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1265-1271. (in Chinese)
- [12] WANG X D, CHEN B, HUO T L, *et al.*. Design of second-order 121.6-nm narrowband minus filters using asymmetrically apodized thickness modulation[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(7): 139.
- [13] WANG X Dang, Bo CHEN B, HUO T L, *et al.*. Design of first-order 121.6 nm minus filters[J]. *Applied Spectroscopy*, 2018, 72(10): 1498-1502.

作者简介:



王蕴琦(1990—),男,吉林长春人,助理研究员,2018年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计与光学检测技术方面的研究。E-mail: wangyunqi0808@163.com

通讯作者:



陈波(1961—),男,吉林长春人,研究员,主要从事 X 射线-紫外波段的光学研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn