

文章编号 1004-924X(2015)05-1265-07

球面反射式日冕仪实验装置的 杂光分析和实验验证

李 达^{1,2}, 刘 鹏^{1,2}, 陈 斌^{1*}, 王晓光¹, 陈 波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:研究了拉曼阿尔法反射式日冕仪的成像与杂光分布水平,以期获得可靠的杂散光测量方法。根据日冕仪和反射式日冕仪的设计原理,设计并加工了一种新型球面反射式日冕仪实验装置,用于观测太阳在太阳半径(R_{\odot})为 $1.3 \sim 2.5R_{\odot}$ 时的拉曼阿尔法波段日冕的辐射。对该实验装置进行了成像分辨率测试,结果显示该实验装置的空间分辨率为 17.96 lp/mm ,与设计结果相吻合。使用 Trace pro 软件建立了日冕仪的仿真模型,在零度视场情况下对比了仿真模型和该实验装置获得的子午方向上的杂光分布,得到了该日冕仪实验装置的系统杂光点源透射率(PST)曲线,通过计算得相应的杂光系数为 0.278 。文中亦对该实验装置的杂散光来源进行了分析。

关键词:光学设计;反射日冕仪;Lyman-alpha 辐射;杂散分析;点源透射率

中图分类号:P111.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1265

Stray light analysis and experimental verification of spherical reflective coronagraph experimental devices

LI Da^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, CHEN Bin^{1*}, WANG Xiao-guang¹, CHEN Bo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

* Corresponding author, E-mail: adily1985@163.com

Abstract: This paper focuses on the imaging and stray light distribution levels of a Lyman alpha reflection coronagraph, and attempts to get a reliable stray light measurement method. A new sphere reflection coronagraph experimental device is designed and manufactured based on the design principles of coronagraphes to observe the corona radiation in Lyman alpha region when the sun is with a solar diameter (R_{\odot}) of $1.3 \sim 2.5R_{\odot}$. The imaging resolution of the experimental device is measured. The results show that the spatial resolution of the system is 17.96 lp/mm , and in agreement with the design results. A coronagraph simulation model is established by using the Trace pro software, and the stray light distributions in the meridian direction are compared with the simulation model and the experimental device at a 0° field. By comparison, a Point Source

收稿日期:2014-03-05;修订日期:2014-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10878004)

Transmittance(PST) curve of the coronagraph experimental device is obtained, and the corresponding stray light of the device is 0.278. Moreover, the main source of stray light is also analyzed.

Key words: optical design; reflective coronagraph; Lyman-alpha radiation; stray light analysis; point source transmittance

1 引言

太阳日冕成像是观测空间天气最重要的手段之一。其中拉曼阿尔法(Lyman-Alpha)辐射作为色球层光谱的主要成分,在太阳物理学和日冕物理学中占据了非常重要的地位。通过观测拉曼阿尔法光谱可以分析出色球层的主要结构^[1]。

日冕成像时,由于日冕的亮度相对太阳光球层和色球层来说极为微弱,因此日冕仪的设计需要考虑日面照射到仪器上所引起的人瞳边缘衍射和主镜面自身散射的问题,并在光学系统内部增加里奥光阑等结构进行屏蔽^[2-4]。

点源透射率(Point Source Transmittance, PST)函数是检测光学系统杂光抑制水平的一项重要指标。与直接测量杂光系数所采用的黑斑法相比,PST函数更容易实现;同时通过一定的函数关系能计算出比较直观的杂光系数。

本文从日冕仪的光学要求出发,设计了口径为 40 mm、焦距为 600 mm 的球面反射式日冕仪,加工集成出一台日冕仪实验装置,并利用 Trace pro 软件进行了仿真。与真实像面中子午方向上的杂光分布情况进行比较,说明了仿真模型的合理性。计算了仿真系统的 PST 曲线,通过杂光系数和 PST 函数关系式得到日冕仪实验装置的杂光系数为 0.278;最后就其主要的杂散光来源进行了分析。

2 反射式日冕仪的设计和装调

日冕仪用于对太阳日冕区域进行成像,但视场中太阳光球的存在对日冕成像非常不利,因此在设计日冕仪时需要同时满足日冕成像和遮挡中心光线的要求。为减小系统的几何尺寸,本文采用了反射式的设计结构。反射式日冕仪的主要杂光来源^[5-6]如下:

- (1) 太阳光球层照射进入瞳的光线引起的杂光;
- (2) 太阳光球层照射到入瞳边缘形成的衍射光线。

为抑制杂光,保证像面的成像,系统采用了 4

片反射镜。它们分别是:主物镜 M_1 ,用于将光球层的光线清晰地成像在 M_2 上,以减少日冕仪视场内侧的渐晕;次镜 M_2 用作场镜,选择所需成像的光线;成像镜 M_3 用于将 M_2 的反射光线成像在像面上,同时配合 M_1, M_2 将入瞳 A_0 成像在里奥光阑 A_1 上;平面镜 M_4 ,用于偏折 M_3 的出射光线,以减少日冕仪的几何尺寸。

为了降低加工和研制难度,在基本满足日冕成像的前提下,本文对日冕仪试验装置进行了杂光检测方法的计算和研究。设计时除 M_4 为平面镜以外,其余 3 片反射镜均为球面反射镜,日冕仪的结构示意图如图 1 所示,镜头数据如表 2 所示。通过 Zemax 软件分析结果如下:当光学系统的调制传递函数(MTF) ≥ 0.3 时, $f_v = 18$,如图 2 所示。

表 1 日冕仪的主要技术指标

Tab. 1 Main specification of coronagraph

指标	数值
焦距	600 mm
孔径	40 mm
视场	1.3R _☉ - 2.5R _☉
工作波长	121.6 nm

表 2 日冕仪结构参数表

Tab. 2 Structure parameters of coronagraph

Comment	Radius /mm	Thickness /mm	Decenter /mm	Tilt/(°)
<Entrance pupil>	—	500	0	0
M_1	900.00	-448.00	Y: -35.0	0
M_2	-500.00	511.30	Y: -10.0	0
M_3	-580.00	-552.56	Y: 18.05	0
M_4	Infinity	118.78	Y: 2.50	X: 45

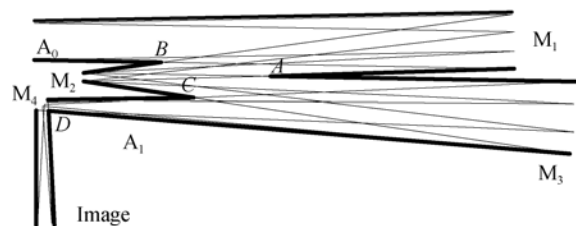


图 1 日冕仪系统设计示意图

Fig. 1 Layout of Lyman- α coronagraph

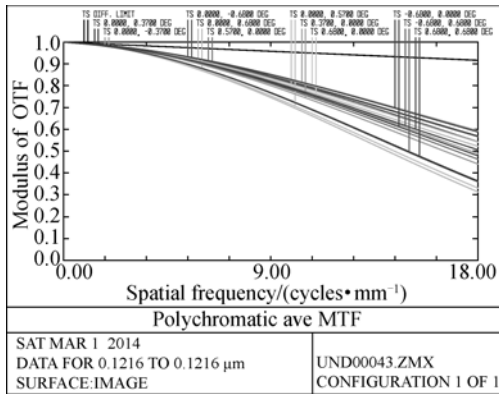


图 2 日冕仪光学系统的 MTF

Fig. 2 MTF of optical system of coronagraph

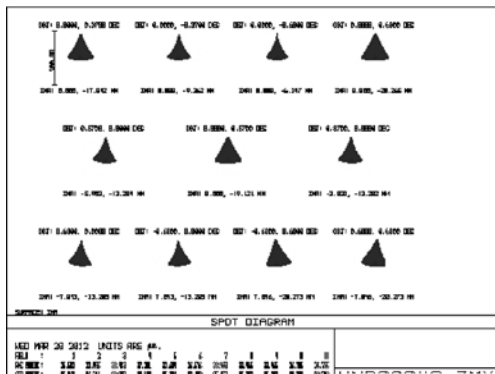
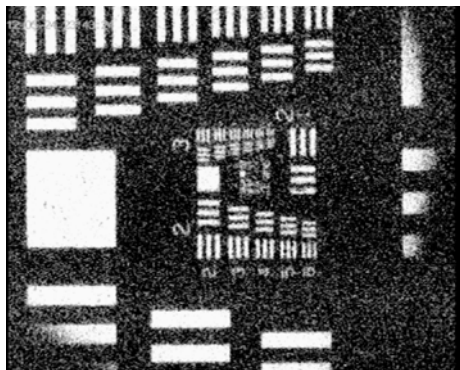


图 3 日冕仪光学系统的点列图

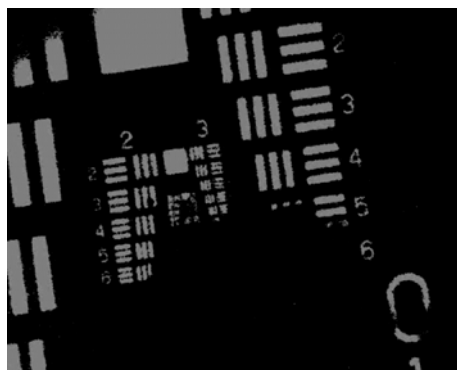
Fig. 3 Spot diagram of optical system of coronagraph

在这种设计下,入瞳光线 r 的走向如下:

(1)日冕光线经过主物镜 M_1 ,次镜 M_2 和成像镜 M_3 的反射后,穿过里奥光阑 A_1 在像面上成像;



(a) 视场边缘
(a)Edge of field of view



(b) 视场中心
(b)Center of field of view

图 4 分辨率板成像图

Fig. 4 Imaging resolution of field

(2)视场中央的光球层光线经过主物镜的反射后,在场镜 M_2 中心附近成像,通过计算, $1.3R_{\odot}$ 角度时成像点斑为 $r_0 = 67 \mu\text{m}$ 。为去除这一部分光线,对 M_2 中心开孔,开孔半径为 $r = 1.3 \frac{R_{\odot}}{d_{se}} \times f_{m1} + r_0$ [7];

(3)光球层光线照射到入瞳 A_0 上,会在其边缘产生衍射光线,经过 M_1, M_2 和 M_3 成像后,被里奥光阑所遮挡。

本系统为离轴系统,采用随机尝试的方法进行装调很难获得好的效果,因此这里从系统的结构特征出发,根据镜片之间的相对位置关系进行逐步装调。由于次镜 M_2 的中心处于主镜 M_1 的焦点位置上,所以在确定了入射光线的方向和主镜 M_1 的位置和方位后,即可确定次镜 M_2 的位置。此外,入瞳 A_0 和里奥光阑 A_1 关于 M_1, M_2, M_3 存在共轭关系。根据上述的相对位置关系,反复调整元件的位置和方位,然后在平行光管的辅助下找到最佳的像面位置。最后使用 USAF1951 分辨率板对日冕仪的装调结果进行检测,检测结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,日冕仪实验装置在视场中心位置上的成像分辨率较好,在视场边缘位置上较差,但是两处都能清晰分辨出第三组第二对条纹。通过计算可知实验装置的空间分辨率为 17.96 lp/mm ,分辨率板检测结果与设计基本一致。

3 系统仿真和杂散光分析

3.1 杂散光分析原理

光学系统的杂散光特性使用 PST 来描述^[8-10]。PST 定义为光学系统对于非轴上点源产生的杂光响应,为视场外离轴角度为 θ 的点源经过光学系统在像面上产生的辐射照度 $P_d(\theta)$ 与该点源位于轴上时产生的辐射照度 $P_d(0^\circ)$ 的比值,即 $PST(\theta) = \frac{P_d(\theta)}{P_d(0^\circ)}$,可以看出点源透射率与点源光强无关,仅与系统的杂散光抑制能力有关;其数值越小,系统的杂散光抑制水平越高。

获得 PST 有两种方法^[11]:一是通过实验直接测量,另一个是利用计算机软件仿真得到。本文采用了软件仿真法。为了使计算机能够建立起信息量足够的计算模型,需要详尽地描述光学系统的几何模型、镜面的反射光属性和非镜面元件的杂散光属性。

3.2 计算日冕仪系统的 PST 曲线和杂光系数

在选择镜面材料时,采用铝膜作为所有反射镜面的反射材料,同时考虑到金属铝的化学性质不稳定,选用氟化镁(MgF_2)材料进行保护^[12-14]。根据波长与能量的换算公式,拉曼阿尔法波段的能量为 10.2 eV。由金属铝表面的反射率与入射光能量的关系(见图 5)可知,工作波长上铝膜的反射率约为 0.85。

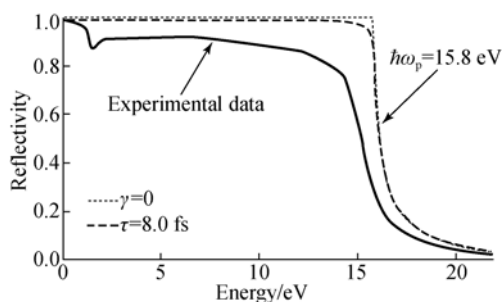


图 5 铝膜反射率曲线

Fig. 5 Reflectivity curve of aluminum film

镜面表面采用 ABg 散射模型^[15],其双向反

射分布函数(BRDF)为:

$$BRDF = \frac{A}{B + |\boldsymbol{\beta}_0 - \boldsymbol{\beta}|^2},$$

其中: $\boldsymbol{\beta}$ 和 $\boldsymbol{\beta}_0$ 的含义和 Harvey-shack 模型相同, $\boldsymbol{\beta}_0$ 是入射光线单位向量在分析表面上的投影, $\boldsymbol{\beta}$ 是对应散射光线单位向量的投影。通过测量某些散射方向的 BRDF^[16] 值可得到参数 A, B, g。根据该公式模拟整个散射半球空间的分布典型的 $B \leq 0.001$, g 取 1~3。其他系统表面均为磨砂氧化铝铝表面,取 $g=0$,即认为是朗伯面。

以入瞳中心为坐标原点,光线入射方向为 x 轴,建立直角正交坐标系,分别计算以 0.68° 和 -0.68° 入射的平行光线(分别称为正光线和负光线),则会在光路中得到 4 个关键点(见图 1 中 A, B, C, D 4 点)。其中, A 点是负光线光束经 M_1 反射后的下边缘与正光线经过 M_1, M_2 反射后的出射光束上边缘的交点,它确定了主物镜 M_1 的遮光罩的边缘位置。经过计算其坐标为 (242.00, -33.11); B 点是负光线光束的入射下边缘与正光线光束经 M_1 汇聚后光束上边缘的交点,它是 M_2 遮光罩的上边界,其坐标为 (138.80, -19.09); C 点是负光束经 M_2 后出射光束的下边缘与正光束经 M_3 后上边缘的交点,确定了 M_2 遮光罩的下边界和 M_4 遮光罩的上边界,其坐标为 (158.6, -54.82); D 点是正光束经 M_3 出射后的下边缘和负光束经 M_4 反射后的边缘交点,其坐标为 (17.39, -67.68)。

将 A, B, C, D 各点与对应的反射镜面边缘连接,确定了遮光罩的初步位置,同时在光学结构设计时考虑对日冕的成像光线和入瞳边缘衍射光线的遮挡,针对日冕光线太阳直射表面有物镜 M_1 , 其他的光学器件表面应进行散射光线吸收处理。关键面为 M_4 表面、 M_3 表面以及 M_4 周围的遮光罩内壁。

表 3 仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

部件	反射率	吸收率	散射率	A	B	g
镜面	0.6	0.25	0.15	0.141 734	0.005	1.8
其他	0.03	0.8	0.17	0.11	1	0

通过 Lambda Research 公司的 Trace pro 软件精确地建立了实验装置的三维模型。从光轴位置开始以 0.1° 的角度增幅对整个系统逐步进行光线追迹模拟。为了保证分析和仿真的准确性,按照实验使用的镜片座结构参数进行仿真和建模,同时入射光线条数设为 200 万条。通过分析可知,日冕仪实验系统主要受太阳日面区域光线照射到 M_1 上的散射光通过 M_2, M_3 反射进入像面产生的杂光影响。因此为了加快计算速度和保证仿真的准确性,取反射镜 M_1 ,入瞳到 M_1 之间遮光板内壁表面以及光学平板内壁作为关键面,即为计算时的重点采样面。由于在设计时采用了工作波长为 121.6 nm 的拉曼阿尔法波段,在工作视场以内的区域,日冕/日面光亮度比 $\leq 10^{-5}$;在仿真时设置光线追迹的停止阈值为 10^{-7} ,同时设置像面为光出射面。最后获得不同角度入射时,像面产生的辐照度。

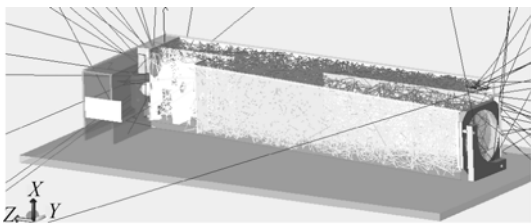


图6 仿真模型杂光分析示意图

Fig. 6 Stray light analysis of coronagraph model

由于系统结构的特殊性,平行光线以 0° 入射时并没有进入后面的光学系统,反而通过 M_2 中心的小孔射出系统。为防止射出光线对后面的成像和分析产生影响,在 M_2 后面设置了光阱,对这一部分光线进行吸收。零度视场的辐照度采用光阱中吸收的光线能量,近似为零度视场的辐照度。在以上仿真的基础上获得了反射式日冕仪系统在 $0\sim 2^\circ$ 的 PST 曲线图,如图 7 所示。为评价日冕仪实验装置的杂散光水平,一般采用杂光系数进行描述。PST 函数与杂光系数的转换关系为^[17]:

$$V = 8F^2 \int_{\alpha_0}^{\frac{\pi}{2}} \text{PST}(\theta) \sin \theta \cdot d\theta \quad (1)$$

由式(1)计算系统的杂光系数。其中积分下

限为日冕仪视场,即 2.5 个太阳半径,实际计算时积分上限分为 1.9° (仿真上限)和积积极限 90° 。而鉴于 1.9° 到积分上限区域的 PST 不应超过 10^{-4} ,故未知的 PST 取 10^{-4} 。最终计算得到的系统杂光系数为 0.278。

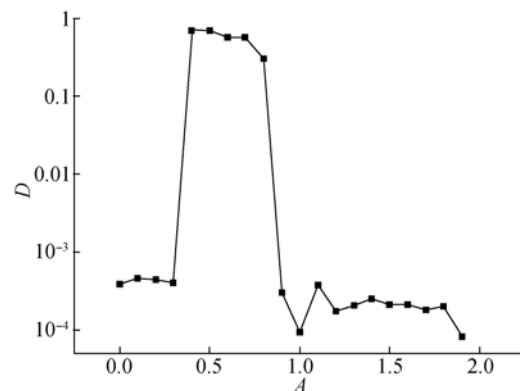


图7 系统的点源透射率曲线图

Fig. 7 PST curves of system

3.3 水平方向上杂光仿真结果与实验数据的对比

为了验证仿真模型的正确性,分别计算在零度视场水平方向上仿真模型像面照度曲线和实验中像面水平方向上杂光的分布曲线。仿真模型的材料设置如表 3 所示,得到像面上杂光辐照度的仿真图如图 8 所示。

通过仿真图像的分析结果可以得到,当入射光的角度为 0° ,总入射光线为 2×10^6 条时,设定每条光线的能量为 1 W,像面的整体能量为 2 446 W,整体的杂光抑制水平约为 10^{-4} 量级,与预期的 10^{-5} 量级存在一定的差距。

实验采用平行光入射到光学系统中,在像面附近使用直径为 0.1 mm 的圆孔,以 0.25 mm 作为步进尺度进行数据采集,最终获得像面在水平方向上的杂光分布曲线,如图 9 所示。对比仿真模型的照度曲线与实验测得的杂光分布曲线可知,两者显示的杂光分布曲线走势基本一致,峰值位置都出现在视场中心附近,并随着视场的增大迅速衰减,且具有一定的对称性,在视场中央的遮挡区域两者的杂光水平较底,但两者还存在差异。

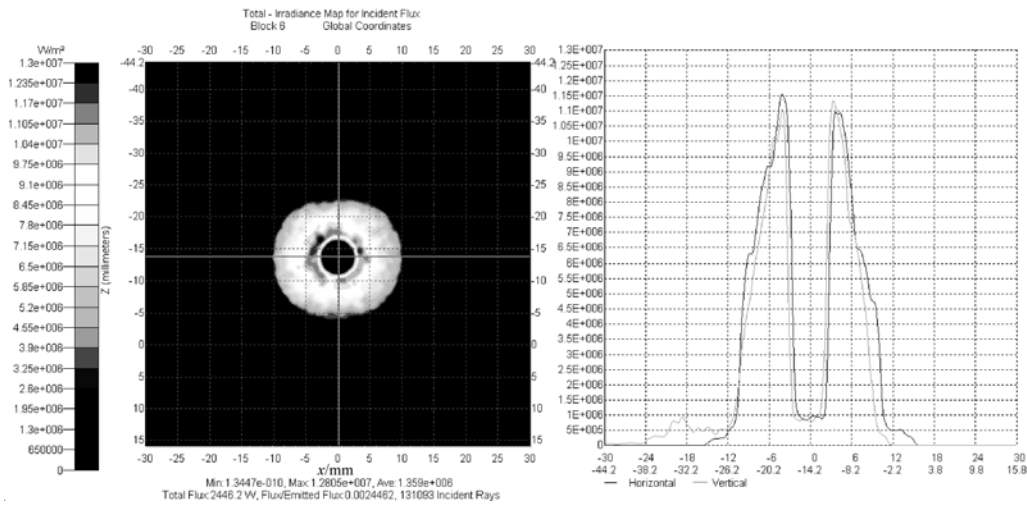


图 8 像面辐射照度仿真图

Fig. 8 Irradiance map at simulation image plane

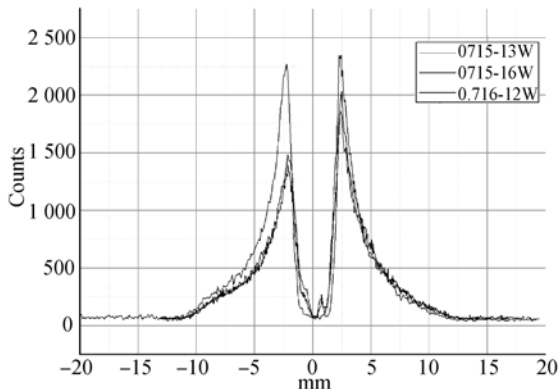


图 9 系统像面在子午方向上杂散光分布的实测结果

Fig. 9 Stray light distribution curve of system on image plane in meridional direction

仿真曲线与实验测得的杂散光分布曲线存在差异的原因在于:第一,仿真材料与实际材料的双向散射分布函数(BSDF)^[18]存在差异,不能完全模拟出真实材料的杂散光分布情况;第二,在实验测量系统像面的杂散光曲线分布时,为模拟平行光线,在平行光管的焦点位置上使用针孔进行光线的准直,但是由于针孔存在一定的几何尺寸,并非理想点,也会引起误差。最后,系统的 PST 曲线

数值较高,杂光系数较大,即系统抑制杂光的能力较弱,其主要原因是系统材料的散射率较高,同时主 \approx 镜面的散射水平过高不能很好地将所有日面光线汇聚到次镜 M_2 的中心圆孔内,被光阱吸收。由于内壁的散射率过高,不能很好地完成光线吸收的任务。

4 结 论

本文设计并装调了一套反射式日冕仪实验装置,建立了日冕仪的 Trace pro 仿真模型。采用 PST 曲线测量了此日冕仪的杂散光水平,通过对比真实像面上子午面的杂光分布曲线,得到了仿真模型和真实像面在子午方向上的杂光分布情况。根据杂光系数和 PST 函数关系式计算得到反射式日冕仪实验装置的杂光系数为 0.278。

未来的工作将关注主镜表面粗糙度和入瞳孔径边缘衍射^[19-20]对日冕成像的影响,并采用超光滑表面加工以减少散射光的产生,正确安装里奥光阑以减少入瞳衍射的影响,采用吸收率更高的材料作为系统内壁以保证杂散光的吸收。

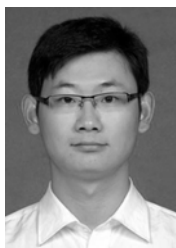
参考文献:

- [1] SCHWENNTCY, DONOVAN R, MARSCH E, *et al.*. Space weather explorer the KuaFu mission [J]. *Advances in Space Research*, 2008,41:190-209.
- [2] SMARTT R N, KOUTCHMY S L. *Advances in*

- ground-based and space-based reflecting coronagraph designs proceedings [J]. *SPIE*, 1998, 3352: 614-620.
- [3] TOUSEY R. Observations of the white light corona by rocket[J]. *Ann. Astrophys.*, 1965, 28:293-297.
- [4] KOMMEN M J, DETWILER C R, BRUECKNER G E, *et al.*. White light coronagraph in OSO-7[J].

- Appl. Opt.*, 1975, 14: 743-751.
- [5] 孙可,江厚满,程湘爱. 强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2):493-499.
SUN K, JIANG H M, CHEN X A. Distribution of in-field stray light due to surface scattering from primary mirror illuminated by intense light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):493-499. (in Chinese)
- [6] 李萍,卢振武,夏立东,等. 反射式内掩日冕仪的光学设计与杂散光分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(5):408-412.
LI P, LU ZH W, XIA L D, *et al.*. Stray light analysis of internally occulted mirror coronagraph [J]. *Chinese Journal of Optical and Applied Optics*, 2009, 2(5):408-412. (in Chinese)
- [7] 李达,孟艳丽,陈波. 反射式莱曼阿尔法日冕仪杂光分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8):0822006.
LI D, MENG Y L, CHEN B. Stray light analysis of reflective lyman-alpha coronagraph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8):0822006. (in Chinese)
- [8] STAUDER J, ZOLLINGER R E. Stray light analysis of the SABER telescope [J]. *SPIE*, 1995, 2553: 264-270.
- [9] 李辉. 光学系统杂光分析方法研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 1996.
LI H. *Research of method for stray light analysis of optical systems* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, 1996. (in Chinese)
- [10] BREAUULT R P. Stray light analysis of CRISTA the CR yougrnic infrared spectrometer and telescope of the atmosphere[J]. *SPIE*, 1990, 1331: 64-80.
- [11] 王一凡,李零印. 白天观测空间目标的恒星光电探测系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12):2854-2861.
WANG Y F, LI L Y. Stray light suppression of star photoelectric detection system for space target in daytime [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2854-2861. (in Chinese)
- [12] 刘颖,李福田. 紫外-真空紫外波段的 Al+MgF₂膜[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2):165-168.
LIU Y, LI F T. MgF₂-over coated aluminum films for ultraviolet and vacuum ultraviolet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2):165-168. (in Chinese)
- [13] 李福田,韩赋,陆颖,等. 真空紫外镜面反射率,光栅效率及薄膜光学常数的研究[J]. 光学精密工程, 1990(4):1-8.
LI F T, HAN F, LU Y, *et al.*. Research of vacuum ultraviolet specular reflectance, grating efficiency and optical constants of thin films [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1990(4):1-8. (in Chinese)
- [14] 刘颖,李志刚,李福田. 真空紫外铝_氟化镁膜偏振特性的研究[J]. 光谱学与光谱分, 2002, 22(5):724-727.
LIU Y, LI ZH G, LI F T. Polarization characteristic of Al+MgF₂ film at VUV [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(5):724-727. (in Chinese)
- [15] SCHRÖDER S, DUPARRÉ A, CORIAND L, *et al.*. Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10):9820-9835.
- [16] 钟兴,贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3):621-625.
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):621-625. (in Chinese)
- [17] 杨林,李达,崔天刚,等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1456-1463.
YANG L, LI D, CUI T G, *et al.*. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1456-1463. (in Chinese)
- [18] QI C, YANG C L, LI W J, *et al.*. Stray light suppression in BRDF measurement infrared optical system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(7):398-400.
- [19] MIYAMOTO K. Effect of boundary diffraction wave in coronagraph [J]. *JOSA*, 1964, 54(9):1105-1107.
- [20] ERIC C. Boundary diffraction wave integrals for diffraction modeling of external occulters [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14):15196-15208.

作者简介:



李 达(1985—),男,山东安丘人,博士研究生,主要从事日冕仪及杂散光方面的研究。E-mail: adily1985@163.com

导师简介:



陈 波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,2003年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软 x 射线极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)