

文章编号 1004-924X(2011)12-2854-08

白天观测空间目标的恒星光电探测系统的杂散光抑制

王一凡¹, 李零印^{1,2*}

(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 100039)

摘要:从恒星光电探测系统的杂散光光源入手,分析了杂散光的产生和传输特性,建立了杂散光对恒星光电探测系统影响的评价指标,然后提出了合理抑制杂散光的方案,用于指导光机系统的结构设计。通过遮光罩、挡光环以及表面涂层处理技术来削弱杂散光对光机系统的影响,利用软件对该光机系统结构进行杂散光模拟分析。对比模拟工况下消除杂散光前后的点源透射率(PST)曲线,结果表明光机系统探测像面 PST 下降了两个数量级,达到 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ 。场外星等探测得到的现场数据进一步证明,该设计方案可以有效地抑制杂散光对光电探测系统的影响,从空间背景中提取出五星探测图,得到了清晰的探测图像。

关键词:望远镜;杂散光;光电探测;遮光罩;挡光环;点源透射率

中图分类号:TH743;TH703 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111912.2854

Stray light suppression of star photoelectric detection system for space target in daytime

WANG Yi-fan¹, LI Ling-yin^{1,2*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: lilingyin_Q2@163.com*

Abstract: In consideration of stray light sources of a star photoelectric-detection system, this paper analyzes the generation of the stray light and its transmission characteristics, and proposes how to evaluate the effects of stray light on the photoelectric-detection system. A reasonable suppression scheme for the stray light is provided for guiding the design of opto-mechanical structure of the system. Then the main baffle, baffle vane and the coating technology are used to eliminate the effect of stray light on the opto-mechanical structure. The opto-mechanical structure of the system is simulated by a software and the results show that their Point Source Transmittances (PSTs) before and after eliminating the stray light have been reduced by two orders of magnitude between 10^{-8} and 10^{-10} . Meanwhile, the obtained detection data in experimental field demonstrate that the scheme can extract a detection im-

收稿日期:2010-10-27;修订日期:2011-02-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2008AA0049, 2008AA7034320B)

age with 5 star magnitudes, and the stray light has been suppressed effectively.

Key words: telescope; stray light; photoelectric detection; main baffle; baffle vane; Point Source Transmission(PST)

1 引言

杂散光分析被列为光学软件 7 个发展方向之一,是评价空间光学仪器的重要组成部分。美国在深空探索望远镜 SNAP 研制过程中对杂散光做了深入的研究;欧洲、日本和印度也正在加大杂散光分析的工作力度。伴随空间遥感技术的发展,杂散光问题的研究在我国也逐渐得到重视,尤其是在一些空间探测仪器中,杂散光分析已经成为专门的学科^[1-2]。国内对光学遥感仪器的杂散光研究主要集中在望远镜系统,早在 80 年代就开始对杂散光进行研究,开发了多种杂散光计算软件,并提出经典的“黑体法”用于测量望远镜的杂散光^[3]。近年来,国内一些科研工作者又对杂散光做了定量分析和数值模拟^[4]。参考国内外的一些杂散光分析方法和分析步骤,本文针对白天观测空间目标的恒星光电探测系统进行了杂散光分析,以使其能够全天时探测五等星。

恒星光电探测系统的杂散光主要来自望远镜观测视场外的光源,通过窗口进入望远镜系统,在各个光学元件与内部结构之间散射、反射、折射,最终到达像面。杂散光是影响光电探测系统成像质量的重要因素^[5],恒星光电探测系统工作在系统视场外有强烈辐射源或者太阳光照射等恶劣环境下,这些杂散光的辐射强度常常比所探测目标的辐射强度高几个数量级^[6],若不对其进行有效的分析和抑制,探测目标源很可能被杂散光湮没,因此,本文对观测空间目标的恒星光电探测系统进行了杂散光分析和计算,通过设计遮光系统,选择材料表面涂层以及定量测试系统杂散光

点源透射率(PST)等一系列措施^[7]来综合抑制探测系统杂散光。对比消除杂散光前后的分析结果可见,光学系统信噪比大大降低;场外探测图像表明,杂散光分析结果满足探测系统指标。

2 光学系统

恒星光电探测系统(对光电经纬仪设备光学系统改造而成,可完成对恒星的全天时光电探测)的主光学系统采用原电影经纬仪主光学系统,对上述保留部分的光学元件重新镀膜与检测,在此基础上增加一档焦距为 3 500 mm 的望远光学系统,望远系统参数如表 1。

表 1 望远系统参数表

Tab. 1 Parameters of telescope

望远镜	参数
焦 距	3 500 mm
口 径	625 mm
相对孔径	1/5.6
视 场	20' × 20'
光谱波段	650~900 nm
中性滤光片	100%, 50%, 25%, 10%
探测能力	太阳夹角 40°时,观测 5 等星

光电探测系统光机结构如图 1 所示,探测光线从探测系统下方通过反射镜进入望远系统,考虑探测设备实际需要,在不改变光学系统成像的前提下,利用反射光路来改变光机结构总长,使光机系统结构更加紧凑。

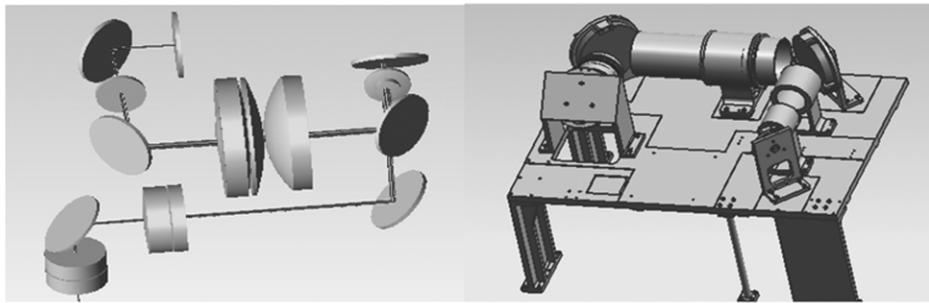


图 1 光机系统结构图

Fig. 1 Structure of opto-mechanical system

3 杂散光分析与模拟仿真

光电探测系统噪声源主要来自各种空间辐射与太阳光,因而对空间光学系统进行杂散光分析是空间光学系统设计中必不可少的步骤。常采用的杂散光分析方法有蒙特卡罗法、区域法和光线迹法,但近年来,越来越多的学者采用计算机仿真的方法对光学系统的杂散光进行分析与计算。本文针对大口径的光学系统,采用结构设计与软件仿真相结合的方法进行杂散光模拟分析,既可在一定程度上解决杂散光测试实验成本过于昂贵、实验系统过于繁琐等问题,又可以有效地分析杂散光。在杂散光分析中,结合光机系统设计,利用光学软件的分析功能和信息转换能力,将简化的三维机械模型与光学系统紧紧结合起来,对主望远系统进行杂散光分析与遮光系统设计^[8],模拟杂散光分析的一般步骤如图 2 所示。本文利用软件接口技术,通过 UG 导入机械结构数据,ZEMAX 导入光学系统数据,然后在 TracePro 中设置杂散辐射条件和修改光机系统特性,通过反复模拟光学系统各个工况,同时修改光机系统结构参数,直到得到满意的输出结果为止。

3.1 杂散光计算与分析

光学望远镜在成像焦面上接收到的杂散光能量可以简化用下式来描述:

$$\Phi_{\text{collector}} = \Phi_{\text{source}} \times BRDF_{\text{surface}} \times GCF_{\text{system}}, \quad (1)$$

式中: $\Phi_{\text{collector}}$ 为像面上收到的杂散光能量; Φ_{source} 为杂散光源的贡献; $BRDF_{\text{surface}}$ 为接收到杂散光的表面的双向散射分布函数; GCF_{system} 为光学系统的几何结构因子。

由公式(1)分析知,影响光学系统杂散光能量

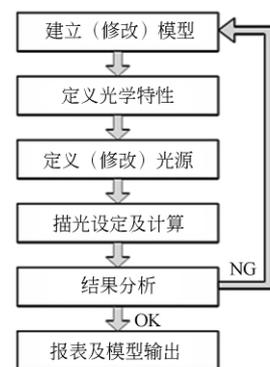


图 2 杂散光分析步骤

Fig. 2 Steps of stray light analysis

传递的主要有 3 个要素^[9-10],即:入射杂散光的强度;材料表面的散射特性 BRDF 和几何构成因子 GCF,它仅仅取决于系统结构形式和尺寸等因素(包括中心遮拦等)。为了抑制杂散光,通常采用减小入射杂散光强度、采用特殊的涂层技术、减小杂散光的逐级传递的几何构成因子^[11]等方法。

光电探测系统杂散光的来源^[12]有 3 大类,首先,非成像光束在像平面产生杂散光,这主要是由于机械系统缝隙的漏光以及视场外光线没有进行有效遮拦,导致杂散光到达探测器造成的,这部分杂散光可以通过设计遮光罩和各级镜筒的结构来抑制;其次,光学系统因为散射、衍射、反射产生的自由杂散光,这部分杂散光包括透射光学表面的多次反射和镜筒内壁等非光学表面的多次反射,以及由于光学表面质量问题产生的散射光,它们可以针对光路分级设计内遮光罩与挡光环来消除,或在结构内部采用高吸收率的黑色涂层来吸收(通常在光管内壁和光阑面都涂有吸收率大于 93%的吸收涂层);再者,光学系统内在辐射源,比如内部电子器件与电机都会成为小功率辐射场,

产生杂散光,由于光学系统的精确定位与控制必须依靠电力驱动与转换来实现,所以这部分杂散光的产生不可避免,由于这部分杂散光强度不是很大,通常采用在电机内罩涂吸收率较高的材料来抑制。

3.2 遮光罩设计

外遮光罩主要用来减小大角度关键杂散辐射源引起的杂散光^[13-15],根据系统外可能存在的杂散光源的位置设计满足要求的遮光罩,消除一级杂散光,因此外遮光罩的几何尺寸由大入射角度杂散辐射源的临界入射角决定,要求主遮光罩有足够的长度,同时主遮光罩受系统总长的约束,系统视场外杂散光源的个数以及每个杂散光源的限制角 θ_j (与 α 相等)和系统口径 D_j 大小决定了主遮光罩的长度 L_{mb} 。

$$L_{mb} = D/\theta_j. \quad (2)$$

这样照射在系统主镜的杂散光辐射至少经过了一次或一次以上的反射衰减。外遮光罩最终设计如图 3,当光线大于 40° 入射时,光线会被挡光环反射,例如光线 a ,在遮光罩内经过多次反射才能进入光学系统,小于这一角度的光线(例如光线 b)可不经过一级削弱直接进入光学系统,同时由于各个表面涂层对杂散光的逐级削弱,降低了杂散光线的强度。

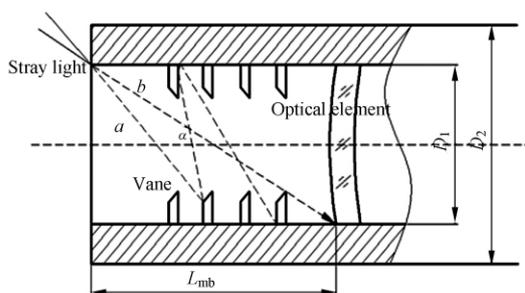


图 3 遮光罩结构

Fig. 3 Structure of main baffle

图中遮光罩尺寸为 $\Phi 650 \text{ mm} \times 1\ 200 \text{ mm}$ 。内遮光罩起多次反射、吸收、降低杂光辐射强度的作用,经过表面处理的内遮光罩可以有效地增加杂散光的吸收。内遮光罩的设计原则是:

(1)次镜内遮光罩不能遮挡从入瞳边缘入射的边缘视场光线;

(2)主镜内遮光罩不能遮挡从入瞳边缘入射的边缘视场光线;且不能遮挡从次镜内遮光罩外边缘入射的边缘视场光线;

(3)尽量减小系统的中心遮拦。

同时,在遮光罩内部设置挡光环结构,大镜筒挡光环结构如图 4,由此来增加杂散光在系统内部的反射次数。另外,在中间像面处设置视场光阑,在出瞳处设置光阑来限制进入系统的杂散光能量;同时在以后各级光路中采用逐级遮光罩设计,尽量增加杂散光衰减次数,降低杂散光能量。

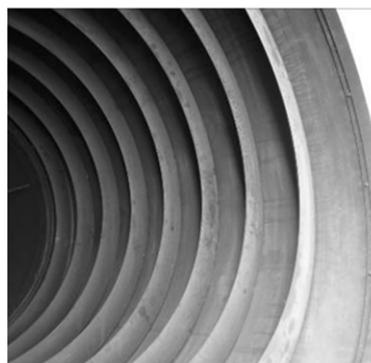


图 4 挡光环结构

Fig. 4 Structure of baffle vane

3.3 滤光片设计

由于大气烟雾(大气灰尘受太阳光照射所产生的发光体)降低了影像反差,因此,设计了颜色和中性滤光片组件用于白天测量恒星时提高目标的对比度,选择合适的滤光片可改变光源的光谱成份和能量,调节被摄景物的色调,提高景物的反差,突出探测目标特征。

中性滤光片设计指标调光有 $1, 1/2, 1/4, 1/10$ 等 4 档,颜色滤光片有 $650 \sim 1\ 000 \text{ nm}$ 、 $750 \sim 1\ 000 \text{ nm}$ 、 $850 \sim 1\ 000 \text{ nm}$ 等 3 档,它在光路中采用转动切换的方式,见图 5。驱动采用步进电机加齿轮箱驱动,定位采用电位计反馈值定位,切换灵活,现场调试中取得了比较满意的效果。

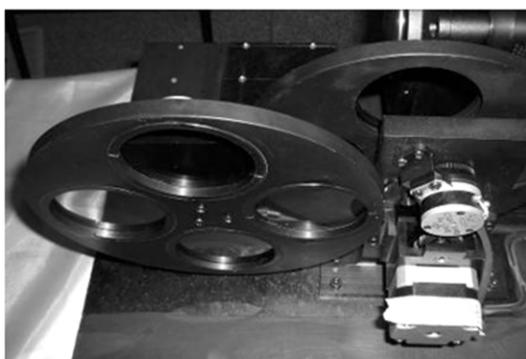


图 5 中性滤光片组件

Fig. 5 Neutral filter components

3.4 模型设计与仿真

蒙特卡洛法应用于光线传播,是 TracePro 杂散光软件模拟技术的核心思想,可以作为数值积分方法来描述,用于解决传统数值积分方法不能解决的问题。光源采用随机分布、离散波段、杂散辐射比均匀、400~1 000 nm 点源透过率的束状圆形平行光线,追迹光线数为 19 886,各透镜参数与材质^[16]以及表面处理按照光学设计严格赋值。上述杂散光源,利用随机场模拟镜头外部入射光线,以便弱化辐射源通过天空背景或者大气扰动对光学系统的影响。同时对外遮光罩、内遮光罩、挡光环赋予材料属性。在光管内壁和光栏表面都涂有吸收率为 93% 以上的涂层^[17-19],透镜表面镀膜处理,使得各片透镜透过率不小于 99.3%。

添加上述光机结构数据,在杂散光分析软件中建模(为了表达光线传递关系,遮隐了光学系统机械结构),主镜筒内光线追迹结果如图 6 所示。杂散光通过窗口进入主光学系统,在遮光罩发生逐级的折射、反射与吸收,这样杂散光经过“窗口—{遮光罩—挡光环—各级透镜……遮光罩—挡光环—各级透镜}—成像表面”传播与削弱。当离轴角为 40° 时,只有 0.005% 左右的杂散光线进入像平面。

在杂散光分析软件中,追踪杂散光线,得到杂散光源在 CCD 成像表面消杂前后辐照度图像(离轴角为 50°)如图 7,8 所示,在 CCD 像面上只有远离成像区的局部位置有微弱的杂散光影响,图中斑点的亮度表示杂散光的影响强度,提取这些数据的最大值和均值对比可知,辐射照度最大值强度从 2.518 9 W/m² 降低到 0.143 91 W/m²,辐

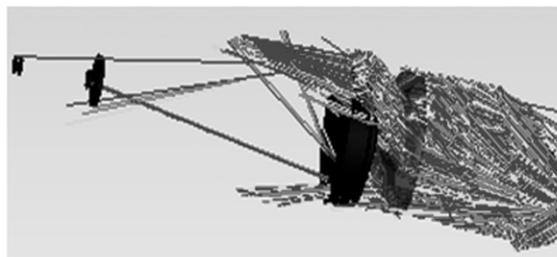


图 6 杂散光分析模型

Fig. 6 Model for stray light analysis

射平均值从 0.0011 05 W/m² 降低到 3.538 × 10⁻⁶ W/m²,杂散光消除效果明显。从像面辐照度图中发现,采取降低杂散光措施后,杂光对成像系统的影响很小(PST 数量级达 10⁻⁶ 以下)。

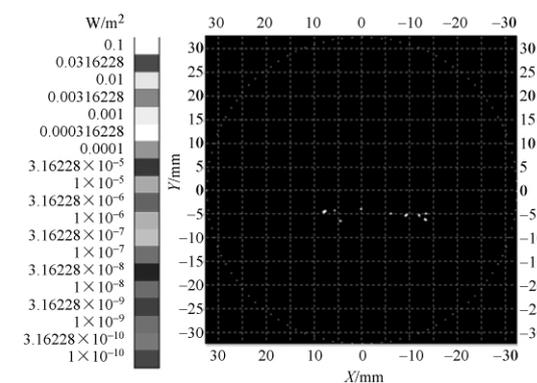


图 7 优化前杂散光对像质的影响

Fig. 7 Effect of stray light on image quality before optimization

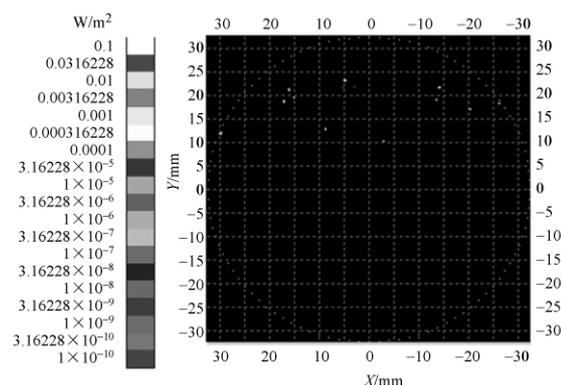


图 8 优化后杂散光对像质的影响

Fig. 8 Effect of stray light on image quality after optimization

由图 8 分析可知,只有像面边缘处有杂散光干扰,像面中心无杂散光干扰,平均像面照度为 3.538 × 10⁻⁶ W/m²,在仿真情况下,调整杂散光

光源入射角度,可测量不同探测角 θ 时的系统 PST(θ)理论曲线。图 9 表明,当入射角小于 20° 时,光学系统受杂散光影响明显,随着角度减小,杂散光影响显著;当入射角大于 30° 时,杂散光抑制效果明显,主要原因是这一入射角为光学系统一级衰减临界角,PST 曲线也可说明抑制一级杂散光的重要性。由光学系统探测参数知,工作角度大于 40° 时,PST(下降到 10^{-8} 数量级)满足探测要求。

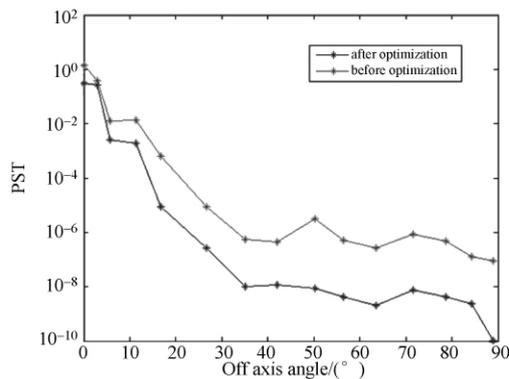


图 9 PST 对比曲线

Fig. 9 PST curves

4 实验结果与讨论

本文用白天空间目标观测的恒星光电探测系统在所内完成了设备的初步调试,电子学系统的配线和初步测试,然后完成了设备的外场安装、调试和恒星标定,达到了与太阳夹角 40° 时,全天时探测五等星。在南京天文台对五等星进行追踪与探测,探测图像和数据如图 10 所示,初始状态为天空背景,采用逐级目标搜索,得到五等星信息,继续调解光学系统参数,捕捉其中一颗,进行目标定位,可以从背景目标中逐级提取出清晰的五等星图像。外场恒星探测结果表明,经过遮光罩、挡光环、滤光片、与涂层技术处理后,很大程度上抑制了杂散光,信噪比提高到 5 642.717,在模拟环

参考文献:

- [1] 郝云彩,肖淑琴,王丽霞. 星载光学遥感器消杂光技术现状与发展[J]. 中国空间科学技术, 1995, 6(3): 40-50.

境与工程实际中都有很好的效果;但是杂散光对成像系统仍有略微的影响,这些影响不可能完全消除,但可以通过后续的滤波与图像处理技术来解决,使图像光电探测图像更加真实有效。



图 10 探测图像

Fig. 10 Graph of detection

5 结 论

本文以恒星光电探测系统为例,结合光机结构和计算机软件,对其设计遮光罩、挡光环,然后进行涂层处理,最后对整个光机系统进行杂散光分析与仿真,反复修改其光机系统结构参数,最后在 TracePro 中得到可靠的分析结果。仿真结果表明,光机系统 PST 下降到 10^{-8} 数量级。由南京天文台实测数据知,信噪比提高到 5 642.717,光机系统杂散光满足天文台使用需求,初步得到了可靠的杂散光分析结果,这种分析方法可作为空间仪器消除杂光的参考方法。在后续工作中,计划对本文的分析方法进行更详细的分析,为消除杂散光提供更充分的依据。

HAO Y C, XIAO SH Q, WANG L X. Status and development of stray light elimination technology for space-borne optical sensors[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1995, 6(3): 40-50. (in Chinese)

- [2] 邹刚毅,樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂散分析[J]. 光子学报. 2009,38(3):605-609.
ZOU G Y, FAN X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 605-609. (in Chinese)
- [3] 张军强,吴清文,颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光检测技术[J]. 中国光学与应用光学. 2010,3(4):337-342.
Zhang J Q, WU Q W, YAN CH X. Stray light measurement technologies for space-borne imaging spectrometer [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 337-342. (in Chinese)
- [4] 李淳,孙强,刘英,等. 眼底相机的均匀照明及消杂光干扰设计[J]. 中国光学与应用光学. 2010,3(4):363-368.
LI CH, SUN Q, LIU Y, *et al.*. Design of uniform illumination system of fundus camera and its stray light shield [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*. 2010, 3(4): 363-368. (in Chinese)
- [5] 邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析[J]. 红外与激光工程. 2010,39(4):715-720.
DENG CH. Analysis on stray light elimination for space solar telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 715-720. (in Chinese)
- [6] DU B L, LI L, HUANG Y F. Stray light analysis of an on-axis three-reflection space [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(6): 569-572.
- [7] 杜述松,王咏梅,杜国军,等. 干涉成像光谱仪的杂散光分析 [J]. 应用光学. 2009,30(2):246-251.
DU SH S, WANG Y M, DU G J, *et al.*. Stray light analysis of Fabry-Perot interference imaging spectrometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 246-251. (in Chinese)
- [8] 杨开宇,王飞宇,金宁,等. 利用 OptisWorks 对红外热像仪进行内部杂散光分析[J]. 红外技术. 2010,32(8):443-448.
YANG K Y, WANG F Y, JIN N, *et al.*. Analysis of interior stray light for infrared thermal imager by OptisWorks [J]. *Infrared & Technology*, 2010, 32(8): 443-448. (in Chinese)
- [9] 魏祥泉,李金宗,李冬冬. 交会对接杂散光分析及反杂散光干扰措施设计[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 21-26.
WEI X Q, LI J Z, LI, D D. Effects of miscellaneous lights in space rendezvous and docking and the design of measures to suppress the interference of miscellaneous lights [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006, 33(5): 21-26. (in Chinese)
- [10] 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 space borne camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 621-625. (in Chinese)
- [11] 史光辉. 消除卡塞格林系统杂散光的措施[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(5): 10-16.
SHI G H. Methods preventing stray light emerged in Cassegrain systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(5): 10-16. (in Chinese)
- [12] 钟兴. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外与激光工程. 2008, 37(2): 316-318.
ZHONG X. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
- [13] 赵飞,王森,邓超,等. 兴隆 1 m 光学望远镜消杂散光系统 [J]. 光学 精密工程. 2010, 18(3): 513-520.
ZHAO F, WANG SH, DENG CH, *et al.*. Stray light control lens for Xing Long 1-meter optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 513-520. (in Chinese)
- [14] 李欣耀,原育凯,裴云天,等. 风云二号扫描辐射计可见杂光分析与抑制[J]. 科学技术与工程. 2006, 6(12): 1605-1608.
LI X Y, YUAN Y K, PEI Y T, *et al.*. Analyzing and suppressing visible stray light of scanning radiometer for FY-2 meteorological satellite [J]. *Sci. Technol. and Eng.*, 2006, 6(12): 1605-1608. (in Chinese)
- [15] 原育凯. 光学系统杂散光消除方法[J]. 大气与环境光学学报. 2007, 2(1): 6-10.
YUAN Y K. Stray light suppressing measure of optical system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*. 2007, 2(1): 6-10. (in Chinese)
- [16] GOFORTH M A. General algorithm for stray light

- measurements of remote sensing imagery [J]. *SPIE*, 2006, 6291: y1-y8.
- [17] 李婷, 杨剑锋, 阮萍, 等. 月基光学天文望远镜 (LOT) 的杂散光分析 [J]. *光子学报*. 2007, 36: 137-142.
- LI T, YANG J F, RUAN P, *et al.*. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*. , 2007, 36: 137-142. (in Chinese)
- [18] HAO J, ZHANG M. The influence of the stray-light component in determining coronal temperature structures [J]. *Sci. China Ser G-Phys Mech. Astron.*, 2009, 52(11): 1728-1736.
- [19] 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 Z 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)

作者简介:



王一凡(1958—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,主要从事光机电总体设计方面的研究。E-mail: wangyifan1958@163.com.



李零印(1988—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要从事变焦距系统的研究。E-mail: lilingyin_02@163.com

●下期预告

光纤激光诱导背面干法刻蚀制备二元衍射光学元件

陈继民,何超,周伟平,申雪飞
(北京工业大学 激光工程研究院,北京 100124)

为了降低激光辐照在透明介电材料样品表面加工的粗糙度和激光能量密度刻蚀阈值,提高微光学元件的产出率,介绍了一种在固体介质作吸收层的辅助下,激光直接作用于透明光学材料上进行微纳加工的激光诱导背面干法刻蚀工艺。首先,基于 95 氧化铝陶瓷作为固体材料辅助吸收层,在 3.2 mm 厚的熔融石英玻璃表面,应用中心波长为 1 064 nm 掺镱光纤激光器刻蚀了亚微米尺度的二维周期性光栅结构。然后对刻蚀参数进行拟合并探讨了激光能量密度对其的影响。最后观察该二元光学元件的衍射花样图,并讨论了其衍射特性。实验制备了槽深为 4.2 μm ,槽底均方根粗糙度小于 40 nm,光栅常数为 25 μm 的二维微透射光栅,刻蚀阈值低于 7.66 J/cm²。应用背面干法刻蚀工艺制备了二维透射光栅,降低了激光刻蚀透明材料密度阈值及加工结构表面粗糙度。