

# 星载遥感仪器太阳漫透射板紫外辐照特性

李 博

(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** 空间遥感仪器的漫透射板受太阳真空紫外辐照而导致的半球透射率变化将影响仪器在轨辐射定标结果。分析了太阳紫外辐射光谱特点及漫透射板在轨工作的紫外辐照剂量,利用标准氘灯作为光源模拟太阳115~200 nm的紫外光谱,在特定距离下对紫外熔石英漫透射板进行了辐照实验。太阳等效紫外辐照48 h后,熔石英漫透射板半球透射率在250~1000 nm波段产生了不同程度的衰减,其中,紫外波段半球透射率衰减程度略高,250 nm处衰减约为3%,近红外波段衰减程度略低,1000 nm处衰减约为1%,对漫透射板进行清洗后,半球透射率基本恢复到最初状态。实验结果初步表明,漫透射板表层污染是引起半球透射率衰减的主要因素,该结果将对空间遥感仪器太阳漫透射板防护、在轨定标与衰减修正具有重要意义。

**关键词** 紫外遥感;太阳漫透射板;紫外辐照;半球透射率

中图分类号 TP73 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0912002

## Vacuum Ultraviolet Radiation Characteristics of Diffuser in Spaceborne Remote Sensing Instruments

Li Bo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** The hemisphere transmittance of transmission diffusers in space remote sensing instruments changes because of the solar vacuum ultraviolet radiation, which will affect the on orbit calibration result of instruments. The characteristics of solar ultraviolet radiation spectra and the UV irradiation dose are analyzed when diffusers are on orbit, a standard deuterium lamp is used as the light source for solar ultraviolet spectrum simulation at 115~200 nm, the fused quartz diffuser is irradiated at a specific distance. After 48 h solar ultraviolet irradiation, the fused silica diffuser's hemisphere transmittance in 250~1000 nm decrease, the degradation at 250 nm is about 3%, in the change near-infrared wavelength is less than that in ultraviolet, and the degradation at 1000 nm is about 1%, after the diffuser is washed, the hemisphere transmittance returns to the original value. The test results show contamination that on the diffuser is a major factor for the hemisphere transmittance degradation, the result is very important for transmittance diffuser protection, on-orbit calibration and degradation correction.

**Key words** UV remote sensing; solar diffuser; UV radiation; hemisphere transmittance

**OCIS codes** 120.0280; 120.5630; 120.7000

## 1 引 言

漫透射板是星载光学遥感仪器在轨辐射定标及探测中的重要手段,在紫外、可见和近红外空间遥感仪器中应用特别广泛。漫透射板在空间环境下的稳定性会直接影响遥感仪器的轨辐射定标结果,从而影响仪器的探测结果及数据反演结果<sup>[1-3]</sup>。

根据国外 MODIS、SBUV、OMPS、OMI 等在轨仪器漫透射板在轨工作状态分析,真空紫外辐照是影响太阳漫透射板稳定性的重要因素之一<sup>[4]</sup>。国际上的空间遥感仪器研制机构对真空紫外辐照对漫透射板稳定性的影响非常重视,美国戈达德空间飞行中心与欧洲太空局分别进行了针对各种光学材料的

收稿日期: 2014-02-20; 收到修改稿日期: 2014-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(41074126)

作者简介: 李 博(1981—),男,博士,副研究员,主要从事紫外-真空紫外光谱技术方面的研究。

E-mail: libo0008429@163.com

真空紫外辐照特性研究,获得了大量宝贵结果,为遥感仪器在轨定标及仪器性能分析提供了主要基础<sup>[5-7]</sup>。

近年来,国内研究的光学遥感仪器数量增多,真空紫外辐照对紫外遥感仪器漫透射板稳定性的影响已成为制约仪器性能的不确定因素之一<sup>[8-10]</sup>。目前,国内已经进行了铝制漫反射板的真空紫外辐照特性研究<sup>[11-14]</sup>,基于漫透射板的真空紫外辐照研究尚未开展。

本文基于遥感仪器空间紫外辐照环境,构建了漫透射板真空紫外辐照特性研究装置,并利用该装置对空间紫外遥感仪器漫透射板在真空紫外辐照下的稳定性进行了研究,对漫透射板紫外辐照衰减原因进行了初步分析。

## 2 太阳漫透射板

### 2.1 太阳漫透射板原理

空间遥感仪器太阳漫透射板用于在轨绝对辐射定标,能够提供全视场、全孔径的光谱相应标定。图1(a)为漫透射板观测太阳获取定标信号 $L_{cal}$ 的模式,图2(a)为漫透射板观测地球大气获得测量信号 $L_{earth}$ 的模式, $L$ 与双向散射分布函数(BSDF)、太阳

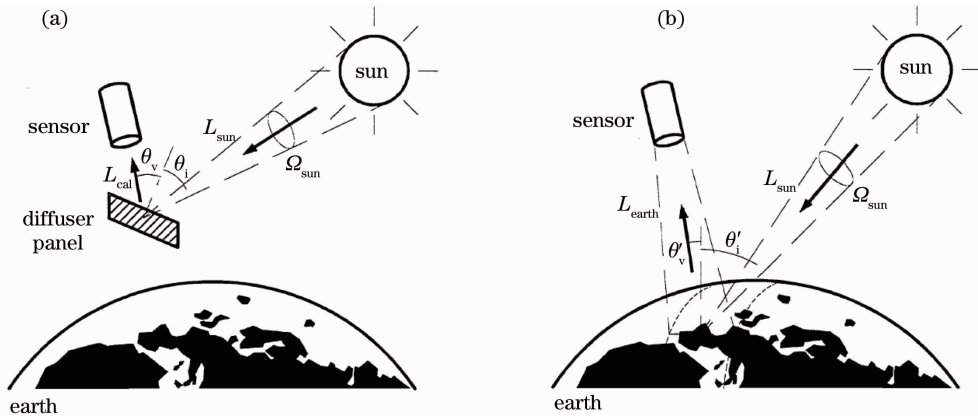


图1 漫透射板原理。(a)空际模式;(b)观测模式

Fig. 1 Principle of solar diffuser. (a) Calibration configuration; (b) observation configuration

### 2.2 太阳漫透射板制备

空间遥感仪器太阳漫透射板主要采用物理研磨方法制成,基底材料采用高等级抗辐射熔石英,样品直径为25 mm,厚度为2 mm,将表面光滑、洁净的熔石英平板用65  $\mu\text{m}$  粒径的金刚砂研磨,研磨后用高压去离子水将漫透射板上的磨料冲洗掉,再使用乙醇超声波溶液进一步清洗。

单块漫透射板半球透射率较高,250nm处半球透射率高于50%,1000 nm处高于75%。漫透射板

辐照度、角度及波长有关。

$$f_{B\text{-diffuser}}(\theta_i, \theta_v) = E_{sun}(\theta_i)/L_{cal}(\theta_v) = E_{sun} \cos \theta_i / L_{cal}(\theta_v), \quad (1)$$

$$f_{B\text{-earth}}(\theta'_i, \theta'_v) = E_{sun}(\theta'_i)/L_{earth}(\theta'_v) = E_{sun} \cos \theta'_i / L_{earth}(\theta'_v), \quad (2)$$

式中 $\theta_i$ 为太阳在漫射板上的入射角度, $\theta_v$ 为仪器接收方向与漫射板的夹角, $f_{B\text{-diffuser}}$ 为漫透射板双向散射分布函数, $f_{B\text{-earth}}$ 为地球双向散射分布函数, $L_{earth}(\theta'_v)$ 为地球辐亮度, $L_{cal}(\theta_v)$ 为漫透射板定标辐亮度, $E_{sun}$ 为太阳辐照度。根据(1)式和(2)式可得出

$$f_{B\text{-earth}}(\theta'_i, \theta'_v) = f_{B\text{-diffuser}}(\theta_i, \theta_v) L_{earth}(\theta'_v) \cos \theta_i / L_{cal}(\theta'_v) \cos \theta'_i. \quad (3)$$

根据(3)式可知,遥感仪器获得的探测结果 $f_{B\text{-earth}}(\theta'_i, \theta'_v)$ 与漫透射板 $f_{B\text{-diffuser}}$ 、定标测试结果 $L_{cal}$ 、地球辐亮度测量结果 $L_{earth}$ 有关,也就是遥感反演精度 $f_{B\text{-earth}}(\theta'_i, \theta'_v)$ 是否准确取决于仪器整机探测性能与地面定标 $f_{B\text{-diffuser}}$ 的结果。仪器在轨工作时,长时间紫外辐照的漫透射板 $f_{B\text{SDF-diffuser}}$ 存在一定程度的衰减,根据(3)式中的关系,这将影响遥感反演精度。因此,为提高遥感仪器反演精度,有必要确定漫透射板紫外辐照衰减特性,考察其在轨环境适应性,为在轨定标修正方案提供参考。

使用时,采用两块漫透射板叠加。这样使用具有两个优点:1)遥感仪器利用太阳进行在轨定标时,观测目标光谱辐射能量较强,两块漫透射板叠加能够降低光学系统传输能量,防止探测器饱和;2)两块漫透射板叠加后,散射特性更好,仪器整机角度响应更接近余弦特性。

## 3 在轨辐照剂量分析

太阳真空紫外辐照剂量由太阳光谱辐照度、作

用时间、光谱范围决定,满足

$$dP_s = E_s(\lambda)dt d\lambda, \quad (4)$$

式中  $P_s$  为太阳辐照剂量,单位为  $J/cm^2$ ,  $E_s(\lambda)$  为太阳光谱辐照度,单位为  $W/cm^2 \cdot nm$ ,  $t$  为时间,单位为  $s$ ,  $\lambda$  为波长,单位为  $nm$ 。

氙灯真空紫外辐射剂量主要由氙灯光谱辐射强度、作用距离、作用时间、光谱范围决定,满足

$$dP_d = \frac{I_d(\lambda)}{r^2} dt d\lambda = E_d(\lambda) dt d\lambda, \quad (5)$$

式中  $P_d$  为氙灯辐照剂量,单位为  $J/cm^2$ ,  $I_d(\lambda)$  为氙灯光谱辐射强度,单位为  $W/sr \cdot nm$ ,  $r$  为作用距离,单位为  $cm^2$ ,  $E_d$  为氙灯光谱辐照度,单位为  $W/cm^2 \cdot nm$ ,  $t$  为时间,单位为  $s$ ,  $\lambda$  为波长,单位为  $nm$ 。

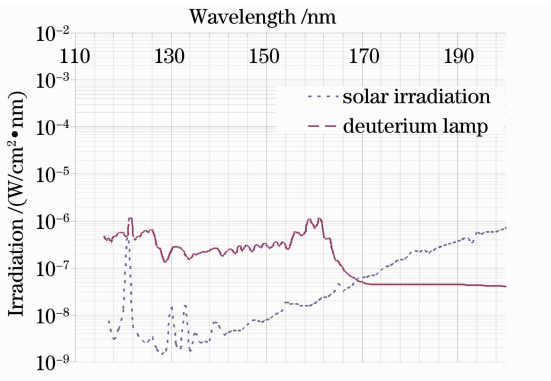


图 2 太阳与氙灯辐照度

Fig. 2 Comparison of irradiation values of the deuterium lamp and the sun

仪器在轨工作寿命 2 年的情况下,每天进行一次太阳定标,每次定标时间不大于 4 min,2 年辐照次数为 730 次,总辐照时间为 2920 min(48 h)。

根据国外在轨真空紫外仪器探测的太阳 115~200 nm 光谱辐照度数据,利用德国 PTB 标定的氙灯辐射强度数据可以计算出 400 mm 位置的光谱辐照度,氙灯与太阳辐照度关系如图 2 所示。根据太阳紫外光谱与氙灯光谱辐射分布,在 115~200 nm 波段氙灯辐照度等效为太阳辐照度的 8 倍,即是氙灯辐照 6 h 即可达到太阳辐照 48 h 的真空紫外辐照剂量( $1.81 J/cm^2$ )。

## 4 实验方法及结果

### 4.1 实验装置构建

漫透射板真空紫外辐照特性研究实验装置由真空测试室、无油高真空机组、真空紫外辐照光源构成。

真空测试室外形尺寸为  $\Phi 1200 mm \times 1500 mm$ ,

内空间净尺寸为  $\Phi 900 mm \times 1100 mm$ 。无油高真空机组:选用法国 ALCTEL 公司 11LACP40 干泵和美国 APD 公司 4000LM16 低温泵构成,真空度可达  $10^{-5} Pa$ 。真空紫外辐照光源采用德国 PTB 标定的氟化镁窗口标准氙灯 V2048,该光源在真空紫外波段具有较强的光谱分布,标定波长范围为 115~400 nm。实验中,氙灯的发光中心到漫透射板中心的距离为 400 mm。实验装置如图 3 所示。

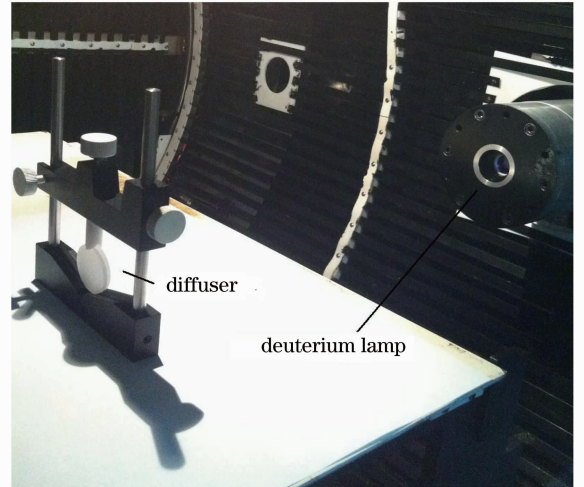


图 3 真空辐照装置

Fig. 3 Experimental setup of vacuum irradiation

### 4.2 真空紫外辐照实验

真空辐照实验中氙灯辐照时间为 6 h,样品第一次进入真空系统之前进行一次半球透射率测试,该实验结果作为样品衰减之前的初始值,实验过程中每间隔 1 h 将样品取出进行一次半球透射率测试,这样能够监测实验过程中漫透射板的性能变化。

半球透射率测试采用 Lambda950 紫外-可见-红外分光光度计,波长覆盖范围为 175~3300 nm(实际使用波段为 250~1000 nm),紫外、可见光光谱分辨率优于 0.05 nm,近红外光谱分辨率优于 0.2 nm,杂光抑制水平优于 0.00008%,使用 150 mm 内径的积分球与标准白板测量半球透射率,样品实际测试时的光谱采样间隔设为 2 nm,探测器积分时间为 32 ms。

漫透射板辐照前后共进行了 7 次测量,测试结果如图 4~6 所示。图 4~5 为漫透射板的光谱半球透射率实际变化,图 6 为漫透射板辐照后与实验前的半球透射率比值。测试结果表明,漫透射板经过真空紫外辐照后,各波长半球透射率均呈现了不同程度的衰减,辐照时间越长,衰减幅度越大,紫外波段衰减幅度大于可见光与近红外波段的衰减幅度,其中,6 h 真空紫外辐照后,250~400 nm 紫外波段

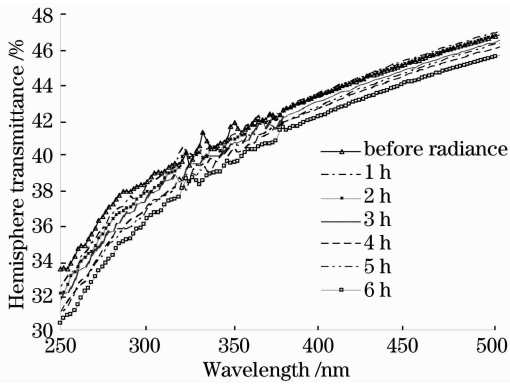


图 4 250~500 nm 半球透射率变化

Fig. 4 Change of hemisphere transmittance in 250~500 nm

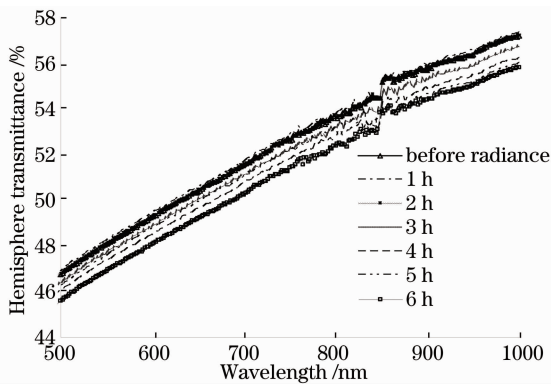


图 5 500~1000 nm 半球透射率变化

Fig. 5 Change of hemisphere transmittance in 500~1000 nm

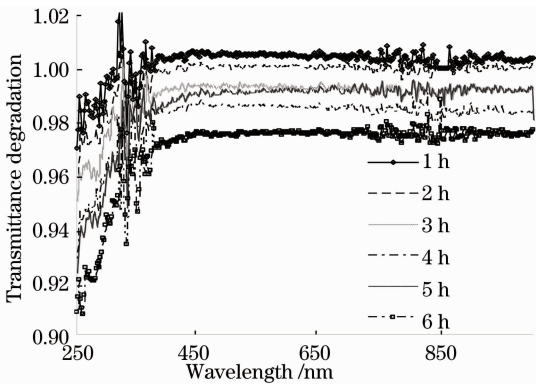


图 6 半球透射率衰减比

Fig. 6 Degradation ratio of hemisphere transmittance

半球透射率衰减约为 2%~3%，400~1000 nm 可见光与近红外波段衰减约为 1.5%。

## 5 衰减机理初步分析

为了分析探讨漫透射板衰减机理,漫透射板真空紫外辐照 6 h 后,对漫透射板再次进行了乙醇超声波溶液清洗,清洗后测试半球透射率,结果如图 7

所示。测试结果表明,真空紫外辐照后的漫透射板半球透射率已经接近辐照前的初始值,但半球透射率仍有一定衰减,250~1000nm 波段半球透射率平均衰减小于 0.5%。

根据实验结果,可能造成这种现象的原因主要包括两个方面:

1) 氙灯真空紫外辐射造成熔石英基底材料发生一定程度的改变,导致漫透射板产生了衰减;

2) 漫透射板经过辐照与清洗后的半球透射率接近辐照前初始状态,这说明真空紫外辐照导致真空系统中的微量污染物沉积在光学元件表面,使漫透射板半球透射率逐渐衰减,当漫透射板清洗后,污染物清除,半球透射率基本恢复。

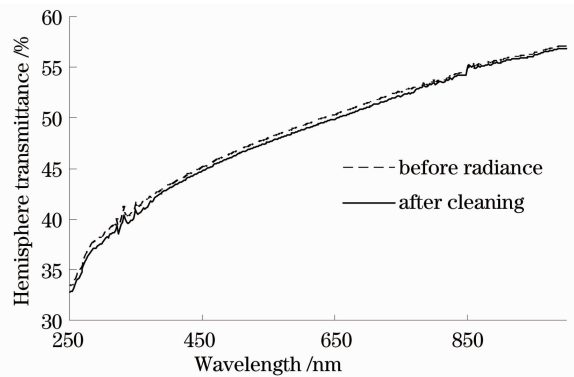


图 7 清洗后的半球透射率

Fig. 7 Hemisphere transmittance after cleaning

## 6 结 论

为考察空间遥感仪器漫透射板真空辐照衰减特性,分析了漫透射板在轨太阳辐照剂量,利用氙灯构建了紫外辐照测试装置,对漫透射板样品进行了辐照测试实验,漫透射板经过真空紫外辐照后,半球透射率在各个波段均产生了不同程度的衰减,250~400 nm 衰减约为 2%~3%,400~1000 nm 衰减约为 1.5%,漫透射板清洗后在 250~1000 nm 半球透射率平均衰减约为 0.5%。实验结果表明,真空紫外辐照能够导致漫透射板半球透射率的衰减,这种现象可能是由于真空系统污染物与光学元件辐照损伤所致。

针对漫透射板的这种衰减特性,建议空间遥感仪器对漫透射板采取三种措施:1) 尽量减少遥感仪器太阳定时漫透射板的使用时间;2) 安装两块或多块漫透射板,校正漫透射板衰减引起的在轨定标误差;3) 漫透射板应远离卫星排泄气体(存在污染物)的方向。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Shurong, Li Futian, Qu Yi. Space UV optical remote sensing technology and development [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 17-22.  
王淑荣, 李福田, 曲 艺. 空间紫外光学遥感技术与发展趋势[J]. 中国光学, 2009, 2(1): 17-22.
- 2 Zhang Zhenduo, Wang Shurong. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum from the solar backscatter ultraviolet spectrometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 061201.  
张振铎, 王淑荣. 星载臭氧垂直探测仪地外太阳紫外光谱测量[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 061201.
- 3 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Hongzhuang, *et al.*. Study on calibration environment of spectral responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312001.  
张振铎, 王淑荣, 李宏壮, 等. 空间紫外遥感仪器光谱响应度定标环境的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0312001.
- 4 X Xiong, N Che, Y Xie, *et al.*. Four-years on-orbit spectral characterization results for aqua MODIS reflective solar bands [C]. SPIE, 2006, 6361: 63610S.
- 5 W Barnes, X Xiong, X Xie, *et al.*. Four years of aqua MODIS on-orbit radiometric calibration [C]. SPIE, 2006, 6361: 63610R.
- 6 J W Leitch, J V Rodriguez, M Dittman, *et al.*. Limb scatter ozone profiling sensor for the NPOESS ozone mapping and profiler suite (OMPS) [C]. SPIE, 2003, 4891: 13-21.
- 7 G Jaross, R P Cebula, M DeLand, *et al.*. Backscatter ultraviolet instrument solar diffuser degradation [C]. SPIE, 1998, 3427: 432-444.
- 8 S Noel, H Bovensmann, J P Burrows, *et al.*. Sciamachy instrument on ENVISAT-1 [C]. SPIE, 1998, 3498: 94-104.
- 9 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Research on high-accuracy in-flight spectral calibration of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228002.  
李占峰, 王淑荣, 黄 煜, 等. 紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228002.
- 10 R C Henry, J Murthy, M Allen, *et al.*. Spectroscopy and imaging of the cosmic diffuse UV background radiation [C]. Proceedings of the Meeting on Ultraviolet Technology IV, 1992, 1764: 61-71.
- 11 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian, *et al.*. Vacuum ultraviolet radiation characteristics of diffuser for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2055-2059.  
张振铎, 王淑荣, 李福田, 等. 空间紫外遥感仪器漫反射板的真空紫外辐照特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2055-2059.
- 12 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101004.  
杨小虎, 王淑荣, 黄 煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101004.
- 13 Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 371-375.  
刘 颖, 李福田. 若干材料紫外真空紫外漫反射特性的研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 371-375.
- 14 Zhang Zihui, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Wavelength difference studies of wavelength calibration based on diffuse reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212001.  
张子辉, 王淑荣, 黄 煜, 等. 漫反射板光谱室标波长差异研究[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212001.

栏目编辑: 殷建芳