

紫外探测器的辐射定标及标准传递

陈健^{1,2*}, 王伟国¹, 高慧斌¹, 刘廷霞¹, 吉桐伯¹, 于洪君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 100039)

摘要: 针对定量化遥感的深入研究和探测器测量精度的提高, 本文对紫外波段探测器的标定方法和标准的传递进行了研究。介绍了紫外探测器低温辐射计的工作原理、标准建立过程及发展现状, 探讨了美国国家标准研究院(NIST)传递标准探测器的选取和标准传递过程。文中的研究为探测器定标方法的研究提供了理论基础, 对提高标准探测器定标精度, 促进其工程化应用具有借鉴意义。

关键词: 紫外探测器; 低温辐射计; 辐射定标; 标准传递

中图分类号: TN23; TJ95 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120504.0423

Radiation calibration for UV detectors and standard transferring

CHEN Jian^{1,2*}, WANG Wei-guo¹, GAO Hui-bin¹, LIU Ting-xia¹, JI Tong-bo¹, YU Hong-jun¹

(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: chenjian4500@163.com*

Abstract: To research the space optical remote sensing quantitatively and to improve the measuring accuracy of detectors in UV region, this paper analyzes the radiation calibration of the detectors and provides a standard transferring method. The working principle, establishing standard and the development status of UV detector standard-cryogenics radiometers are introduced in detail. Then, the selecting and the procedure of standard transmission of the transfer standard detector in Nation Institute of Standards and Technology(NIST) are discussed in-depth. The experimental results provide the theoretical foundation for the research on the detector calibration method and give the guidance for using the standard detector method to improve the calibration accuracy and accelerate engineering application.

Key words: ultraviolet detector; cryogenics radiometer; radiation calibration; standard transmission

收稿日期: 2012-03-11; 修订日期: 2012-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50902128); 吉林省自然科学基金资助项目(No. 20101534)

1 引言

近年来,随着科学技术的快速发展,紫外光学在空间科学、材料、生物物理和等离子物理等领域显示出了广阔的应用前景,尤其是国内外空间紫外光学遥感领域的发展,使得针对紫外空间遥感方向的研究显得尤为重要^[1-5]。

随着量化遥感研究的深入及测量精度的不断提高,用紫外波段的高精度标准来标定各类传感器,评估其测量精度、稳定性以及数据可比较性十分必要。从理论上讲,实现绝对光谱辐射定标的途径有两个:一是基于辐射光源的标准光源定标法,二是基于辐射探测器的标准探测器定标法。目前,在紫外辐射定标领域,标准光源定标方法被广泛采用,但由于其标准源不确定度较高(2%),且定标过程中引入了较多不确定因素,使得定标精度无法进一步提升。而采用标准探测器定标方法一方面降低了标准源的不确定度(1.2%),同时所采用的定标原理更为合理,消除了部分不确定因素,因此该方法是提高紫外波段辐射定标精度的最有效手段。本文围绕紫外探测器标准的建立及量值传递过程展开讨论,对探测器定标方法的研究和定标精度的提升有着重要意义^[6-10]。

2 紫外探测器标准建立

美国国家标准研究院(NIST)的高精度低温辐射计(HACR)系统结构及工作原理如图1所示。以无氧铜为材质的圆柱型斜底腔作为接收腔,其内壁镀有Ni-P涂层,腔体吸收率 >0.9999 。Rh-Fe电阻温度传感器和薄膜加热器置于腔体底部,腔体与5K的热沉相连,热沉与液氮储藏池相连。整个辐射计内真空度 $<133.3 \times 10^{-5}$ Pa,使液氮持续较长时间,并消除了热对流。55K的屏蔽套位于吸收腔外用于阻挡热辐射,而接收腔与外界没有热传导,基本处于绝热状态。温度为77K的保温液氮储藏池位于液氮储藏池外侧,用于减小液氮的消耗。辐射计入射窗(Brewster)对线偏振光的透射比可达0.9997。当

接收腔接收光辐射后,将光能转化为热能,腔体温度逐渐升高,温度值由温度传感器记录;然后关掉光源,用位于腔体底部的薄面加热器对腔体进行加热至相同温度,此时记录下加热电压和电流,计算出光功率,即可得出入射光的光功率^[12-16]。

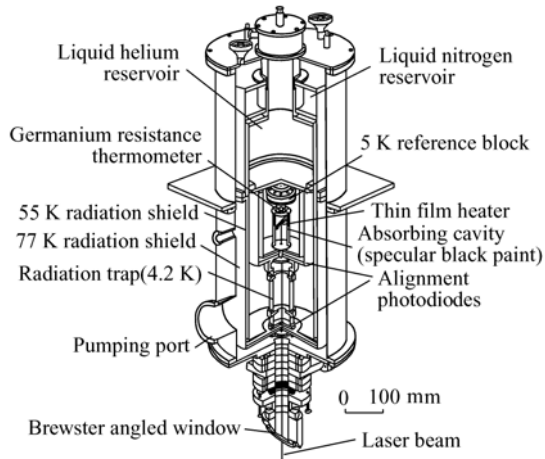


图1 NIST高精度低温辐射计

Fig. 1 High accuracy cryogenic radiometer in NIST

低温辐射计的基本原理^[17]为:采用温度传感器测量探测器接收面相对于温度恒定热沉的温升,达到稳态后测量探测器的温升;然后屏蔽入射光,调节探测器加热功率。当稳态条件下探测器的温升与光加热的温升相同时,测量加热探测器的电功率,如此等效于测量入射到探测器的光功率。

对于低温辐射计腔体,由于吸收热辐射量与温度变化呈严格的线性关系,在实际测量中,须施加一个高加热功率和一个低加热功率,使平衡温度位于光加热平衡温度的两侧,然后通过线性插值得光功率的大小。光功率的测量由1次光加热和2次电替代加热组成,如图2所示。对于光功率测量有:

$$\frac{P_{\text{laser}} - P_L}{P_H - P_L} = \frac{T_{\text{laser}} - T_L}{T_H - T_L}, \quad (1)$$

$$P_{\text{laser}} = P_L + (P_H - P_L) \cdot \left(\frac{T_{\text{laser}} - T_L}{T_H - T_L} \right), \quad (2)$$

式中: P_{laser} 为光加热功率值, P_L 为低电压替代加热功率值, P_H 为高电压替代加热功率值, T_{laser} 为光加热平衡时的温度值, T_L 为低电压替代平衡时的温

度值; T_H 为高电压替代平衡时的温度值。

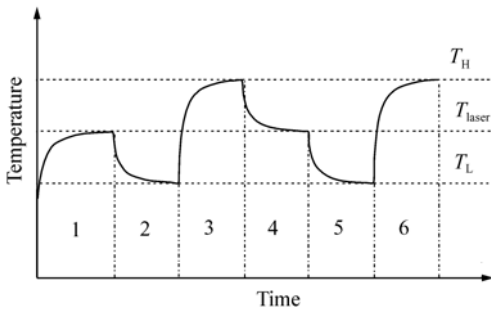


图2 电代替法测量原理

Fig.2 Measurement principle of electricity substitution method

1,4为光功率加热,温度平衡至 T_{laser} ;2,5为低电功率加热,温度平衡至 T_L ;3,6为高电功率加热,温度平衡至 T_H 。

利用电替代方法测量光功率,必须要得到准确的施加电功率值。由于通过高稳定度的直流电压源发送的电功率并不是全部提供给吸收腔的加热电阻^[17-18],还有部分被标准电阻、传输导线等负载所分担,所以在实际实验过程中,利用数字电压表实时地对加热电阻和标准电阻上的电压进行测量,最终结果由式(3)求得:

$$P_{heat} = \frac{V_{sr}}{R_{sr}} \cdot V_{hr}, \quad (3)$$

式中: P_{heat} 为电代替功率, V_{sr} 为标准电阻两端电压; R_{sr} 为标准电阻阻值, V_{hr} 为加热电阻两端电压。

在实验过程中,当获得1组高电压替代加热的温度和功率值,以及1组低电压替代加热的功率和温度值之后,可以利用线性插值法获得当前

光功率值。最终的光功率由式(4)求得:

$$P_{corr} = \frac{1}{T} \left[\frac{P_e}{A} + S \right], \quad (4)$$

式中: P_{corr} 为校正后的光功率, T 为窗口透射率, P_e 为电替代线性插值求得的光功率, A 为腔体吸收率, S 为由低温辐射计内部的四象限硅光电二极管测得的进入低温辐射的杂散光。

在以上校正因子中,只有腔体吸收率较为固定,而窗口透射率与入射光线的偏振度、布鲁斯特窗的角度调节及其洁净度等因素有关。因此有必要在实验进行前测量;杂散光可通过电压表对四象限硅光电二极管测量获得。

通过以上过程建立了低温辐射计标准,但直接利用低温辐射计对待测探测器进行标准传递是难以实现的,主要有以下几点原因:

(1)由于低温辐射计的自身工作特性,它所能测量的光源只能为激光光源。

(2)安装并测量低温辐射计花费的时间特别长,通常一个波长要几天时间。

(3)测量波段也局限在可利用的激光,一般适用于高精度低温辐射计(HACR)高精度测量的光辐射能量约为0.8 mW,明显高于正常光辐射应用的值。

因此,需要将高精度低温辐射计的标准传递给其他便于应用的探测器。

3 紫外探测器标准量值传递

3.1 传递标准探测器—陷阱探测器

鉴于低温辐射计在实际定标应用中的缺陷,

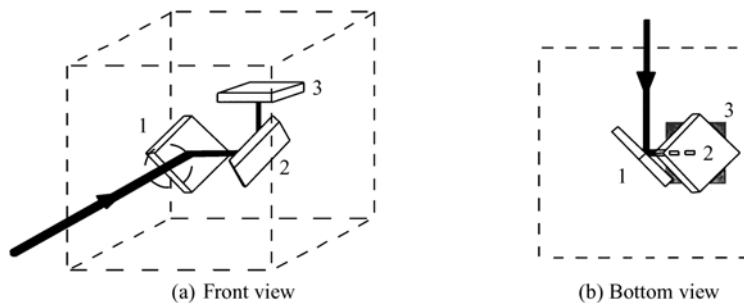


图3 陷阱探测器结构示意图

Fig.3 Configuration of trap detector

找到一个适合的探测器来携带低温辐射计的标准进行标准传递就成为了关键。经过多年研究,陷阱探测器被公认为目前最好的传递标准探测器。比起单片式的光电二极管,陷阱探测器具有低反射率,低温度系数,较好的空间和角度均匀性等优点^[19],其结构如图3所示。

第1,2个硅管的入射面相互垂直,入射角相等,第3个硅管正入射,反射光束沿原路返回,3个光电二极管在光路上并联。这种设计有如下优点:

(1)通过多次反射,总反射率大为降低;

(2)第1,2个硅管的入射面相互垂直,入射角相等,第3个硅管正入射,保证了探测器对入射光的偏振态是非常敏感的;

(3)多次吸收提高了光电转换效率和灵敏度。

3.2 传递标准探测器—热电探测器

由于陷阱探测器工作波段有限,无法实现紫外波段的标准传递,因此需要采用热电探测器作为另一个传递标准探测器,进行紫外波段的标准传递。

热电探测器的性能取决于其金黑材料的吸收比^[20],根据能量守恒定律:其吸收比 $\alpha_p(\lambda)$ 可表示为:

$$\alpha_p(\lambda) = 1 - \rho(\lambda), \quad (5)$$

式中, $\rho(\lambda)$ 为反射率。因此,其光谱响应度 $R_p(\lambda)$ 可表示为:

$$R_p(\lambda) = \tau_w(\lambda) \cdot \alpha_p(\lambda) \cdot F_p = \tau_w(\lambda) \cdot (1 - \rho_p(\lambda)) \cdot CF_p, \quad (6)$$

式中: $\tau_w(\lambda)$ 为热电探测器窗口透射率, CF_p 为定标因子,由输出信号和接收光强之比决定,这个因子可通过与陷阱探测器的对比定标给出。而热电探测器反射率可由 Lambda-19 分光光度计测得^[21]。窗口透射率可由 NIST 透射率测量装置测得。

3.3 标准传递过程

本文以 NIST 的紫外探测器标准传递过程为例,介绍紫外探测器标准的传递过程。

整个标准传递过程如图4所示,以高精度低温辐射计(HACR)作为绝对标准探测器,以陷阱探测器作为传递探测器。首先用 HACR 对陷阱探测器进行定标,并利用定标后的陷阱探测器对待测光电管探测器在可见光波段上进行标定,再利用陷阱探测器对热电探测器进行标定,然后用标定好的热电探测器对硅探测器在紫外波段上进行扩展定标,最终完成待测硅探测器紫外波段的定标工作。

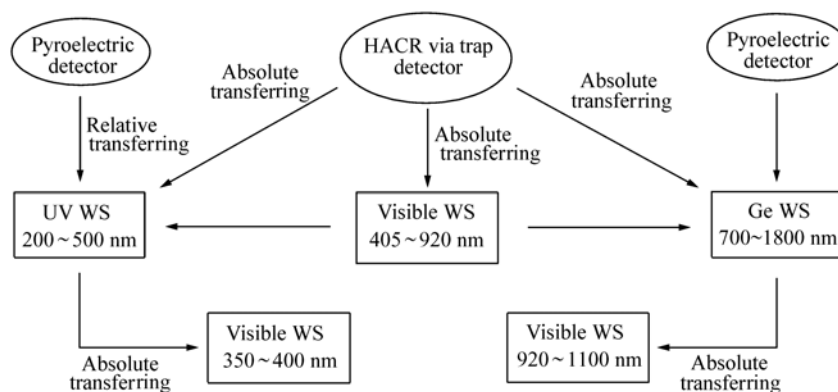


图4 NIST 探测器标准传递过程

Fig. 4 Procedure of standard transmission for NIST detector

由低温辐射计对陷阱探测器进行标准传递的装置如图5所示,在406~920 nm上选取9个激光波长进行定标。采用替代法,用 HACR 给出陷

阱探测器的量子效率,其不确定度为0.05%^[18]。

利用定标过的陷阱探测器作为传递标准探测器,对待测的硅探测器进行可见光波段的定标。

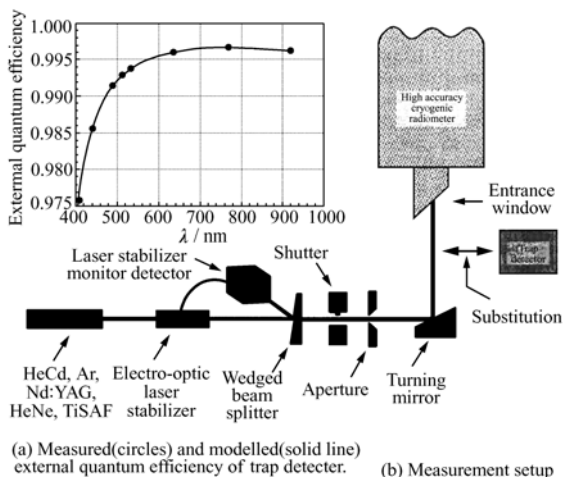


图5 HACR-陷阱探测器的标准传递过程及定标后的陷阱探测器量子效率

Fig.5 Standard transferring procedure from HACR to trap detector and the calibrated quantum efficiency of trap detector

之后就要把其定标波段扩展到紫外波段。这里应用热电探测器作为第二级的传递标准探测器。用陷阱探测器对热电探测器进行可见光波段标定,给出其响应度。由于热电探测器响应度与波长无

关,因此,可以在紫外波段(200 ~ 400 nm)用标定后的热电探测器对待测的硅探测器进行定标。

由陷阱探测器及热电探测器对待测硅探测器的定标装置如图6所示,它由氩弧光源、光栅双单色仪、前置光线系统、后置光学系统、探测器转台组成。将热电探测器及待测硅探测器置于转台上,在计算机控制下交替移入光路,随着光栅转动,不同波长单色光照射在探测器接收面上,分别用热电探测器及待测硅探测器进行信号采集。标定时以5 nm为间隔,定标波段为200 ~ 400 nm。

在热电探测器响应度已知的情况下,可对待测硅探测器进行紫外波段的响应度定标,同样采用替代法,待测硅探测器的响应度 R_x 可表示为:

$$R_x(\lambda) = \frac{B_x(\lambda)}{B_p(\lambda)} \cdot R_p(\lambda), \quad (7)$$

式中: $R_p(\lambda)$ 为热电探测器的响应度; $B_x(\lambda)$ 为待测硅探测器与监视探测器信号的比值; $B_p(\lambda)$ 为热电探测器与监视探测器信号的比值。

通过以上方法完成了对待测硅探测器紫外波段的定标。该探测器结构紧凑,性能稳定,便于在实际定标工作中的应用。在所选取的紫外波段220 ~ 400 nm,其不确定度为0.38% ~ 1.2%。利用这种携带紫外探测器标准的硅探测器可实现辐射定标具体研究工作中的应用。

4 结论

本文深入探讨了紫外探测器标准的建立及发达国家建立探测器基准的发展现状,并详细介绍了其标准传递过程,以便加深对紫外探测器标准的认识,促进紫外探测器定标方法的使用和完善,研究结果对探测器定标方法的研究和紫外辐射定标精度的提高有着重要意义。

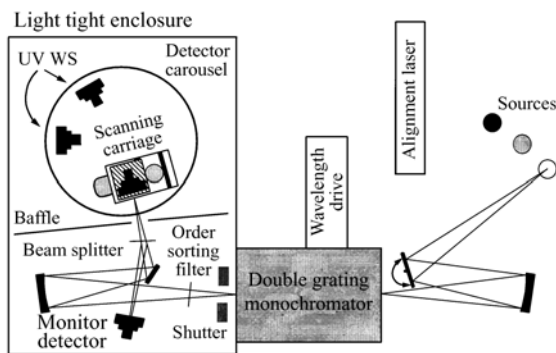


图6 NIST 紫外探测器定标装置

Fig.6 Calibration instrument of NIST UV detector

参考文献:

[1] HEATH D F, KRUEGER A J, ROEDER H A, *et al.*. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUSG[J]. *Opt. Eng.*, 1975, 14(4): 323-331.

[2] 刘建卓, 王学进, 黄剑波. 三波段电晕检测光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1228-1234.

LIU J ZH, WANG X J, HUANG J B. Design of three-band optical system used in corona detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1228-1234. (in Chinese)

- [3] 黎海文,郝鹏,吴一辉. 微硅狭缝紫外-可见光谱仪杂散光的产生与抑制[J]. 光学精密工程,2011,19(4):737-742.
LI H W,HAO P,WU Y H. Generation and suppression of stray light in UV-vis spectrometer based on micro-silicon-slit [J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(4):737-742. (in Chinese)
- [4] QUINN T J. Primary methods of measurement and primary standards[J]. *Metrologia*,1997,34(1):61-65.
- [5] LOSEV V,ALEKSEEV S,IVANOV N,*et al.*. Development of hybrid(solid/gas state) ultra-high power femtosecond laser system on the basis of XeF(C-A) amplifier[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(2):252-259.
- [6] TARASENKO V F,BAKSHTE K H,BURACHENKO A G,*et al.*. Formation of superpower volume discharges and their applications[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(2):273-283.
- [7] GENTILE T R,HOUSTON J M,HARDIS J E,*et al.*. National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer[J]. *Appl. Opt.*,1996,35(7):1056-1068.
- [8] 张永生 郑国鑫. 500 fs 紫外激光系统及其在闪烁体荧光特性测试中的应用[J]. 光学精密工程,2011,19(2):475-481.
ZHANG Y SH,ZHENG G X. 500 fs UV laser system and its application to fluorescence test of thin film scintillators[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(2):475-481. (in Chinese)
- [9] 赵阳,巩岩. 深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计[J]. 光学精密工程,2011,19(1):29-34.
ZHAO Y,GONG Y. Design of beam shaping unit for deep ultraviolet lithographic illumination system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(1):29-34. (in Chinese)
- [10] STOCK K D,HOFER H. Present state of the PTB primary standard for radiant power based on cryogenic radiometry[J]. *Metrologia*,1993,30(4):291-296.
- [11] 吕亮. 低温辐射计计量特性、测量装置及量值传递方法的研究[D]. 北京:中国计量科学研究院,2005.
LÜ L. Study on cryogenic radiometer measurement characteristics, measuring devices and delivery method[D]. Beijing: National Institute of Metrology,2005. (in Chinese)
- [12] 吴礼刚,何文荣,胡晋荪,等. 日盲紫外-可见光双光谱照相机系统[J]. 光学精密工程,2010,18(7):1529-1535.
WU L G,HE W R,HU J S,*et al.*. Solar blind UV and visible dual-spectral camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(7):1529-1535. (in Chinese)
- [13] 王淑荣,李福田,宋克非,等. 地外太阳紫外光谱测量[J]. 光学精密工程,2010,18(6):1271-1277.
WANG SH R,LI F T,SONG K F,*et al.*. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(6):1271-1277 (in Chinese)
- [14] MARTIN J E,FOX N P,KEY P J. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements[J]. *Metrologia*,1985,21(3):147-155.
- [15] 王玉恒,赵学庆,谭晓莉,等. 脉冲紫外激光和 X 射线辐照 Al 靶冲量耦合的异同性[J]. 光学精密工程,2011,19(2):463-469.
WANG Y H,ZHAO X Q,TAN X L. Similarity and distinction between impulse coupling with aluminum by pulsed ultraviolet laser and by X-ray[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(2):463-469. (in Chinese)
- [16] 何飞,陈波,张效信. 月基观测地球等离子体层极紫外辐射特性[J]. 光学精密工程,2010,18(12):2564-2573.
HE F,CHEN B,ZHANG X X. Moon-based imaging of earth plasmaspheric extreme ultraviolet radiation[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(12):2564-2573. (in Chinese)
- [17] KOHLER R,GOEBEL R,PELLP R. Experimental procedures for the comparison of cryogenic radiometer at highest accuracy[J]. *Metrologia*,1996,33(6):549-554.
- [18] DATLA R U,STOCK K. Characterization of an absolute cryogenic radiometer as a standard detector for radiant-power measurements[J]. *Appl. Opt.*,1992,1(34):7219-7225.
- [19] GOEBEL R,YILMAZ S,PELLO R. Polarization dependence of trap detector[J]. *Metrologia*,1996,33(3):455-460.
- [20] ZALEWSKI E F. *The NBS Photodetector Spectral Response Calibration Transfer Program*[M]. Gaithersburg, Maryland: US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, National Measurement Laboratory, Center for Radiation Research,1988.

[21] SCHWINGER J. Electron radiation in high energy accelerators [J]. *Phys. Rev.*, 1946, 70:798-798.

作者简介:陈健(1981—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事高精度快速数字伺服系统等方面的研究。

E-mail:chenjian4500@163.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行人, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国科技核心期刊数据库 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061 传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)