

大相对孔径紫外成像仪光学系统设计

崔穆涵^{1,2}, 田志辉^{1,2*}, 周跃^{1,2}, 章明朝^{1,2}, 陈雪^{1,2}, 李佳起^{1,2}, 易翔宇^{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. 长春国科精密光学技术有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要:为解决目前大多数紫外成像仪存在的定位和指向精度差、色差较大、分辨率及光能利用率不足等问题,设计了一款高分辨率的大孔径消色差紫外光学系统。首先,根据电晕放电检测的应用需求,提出了紫外光学系统的总体设计。然后利用熔石英及氟化钙两种材料的不同色散特性,根据改进的双胶合透镜结构设计了一款大孔径的消色差紫外光学系统,并对该系统进行了公差分析。设计的紫外光学系统在全视场全探测范围内点列图均方根直径 <0.08 mm,分辨率为20 lp/mm,满足电力行业中对电晕探测的需求。

关键词:电晕探测;紫外成像仪;光学系统;大孔径;消色差

中图分类号:TH741 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20181102.0212

Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera

CUI Mu-han^{1,2}, TIAN Zhi-hui^{1,2*}, ZHOU Yue^{1,2}, ZHANG Ming-chao^{1,2},
CHEN Xue^{1,2}, LI Jia-qi^{1,2}, YI Xiang-yu^{1,2}

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun National Extreme Precision Optics CO., Ltd, Changchun 130033, China*)

Corresponding author, E-mail: tian-zhi-hui@163.com

Abstract: In order to solve the problems such as the deficiency of positioning and pointing accuracy, large chromatic aberration, insufficient resolution and energy utilization efficiency, a high-resolution large aperture achromatic UV optical system is designed. First, based on the application requirements of corona discharge detection, the overall design requirements of UV optical system are proposed. Then, using the different dispersion characteristics of both fused silica and calcium fluoride, a large aperture achromatic UV optical system is designed according to the improved double-cemented lens structure, and the tolerance analysis of the system is carried out. The results show that the ultraviolet optical system designed in this paper has a dot-matrix root mean square diameter less than 0.08 mm and a resolution of 20 lp/mm within the full field of view, which meets the requirements of the power industry for corona detection.

Key words: corona detection; ultraviolet camera; optical system; large aperture; achromatic

收稿日期:2017-11-13;修订日期:2017-12-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2012AAXXX707)

Supported by National High-tech R&D Program of China(No. 2012AAXXX707)

1 引言

当高压输电设备之间的场强增加至 20~30 kV/cm 时,周围小曲率半径的导电电极会由于空气电离从而产生电晕放电。电晕放电会导致高压输电设备表面烧蚀或腐蚀,毁坏输电线路甚至引发电力事故。此外,电晕放电时产生的高频脉冲电流中夹杂着大量高次谐波,会严重干扰正常的无线电通信^[1-7]。因此,近年来电力行业的相关部门对于能够早期检测并准确定位电晕放电点的紫外成像仪愈发重视。据统计,未来十年我国计划建设及改进智能高压变电站超过 7 000 余座,对相关的配套电力检测设备需求将大大增加,由此可见紫外成像仪的市场应用前景广阔。

紫外成像仪可同时采集日盲紫外、可见双波段图像,并通过二者视场的高度匹配判断故障点的位置。日盲紫外波段位于 240~280 nm 的中紫外区,由于大气分子的散射作用以及地表臭氧的吸收作用,大部分该波段辐射无法穿透臭氧层到达地表,因而称为日盲紫外。基于上述特性,当大气背景中出现包含日盲紫外波段辐射的目标,如电晕放电点时,可利用背景与目标的高对比度对其进行探测^[8-9]。紫外成像仪即利用上述特点实现了对电晕放电点的有效检测。

20 世纪 70 年代末期,国外已对紫外波段辐射特性展开研究,90 年代末期,国外开始研制紫外成像仪,并逐步形成产品投放市场。典型的国外产品有南非国电(ESKOM)与南非 CSIR 共同研发生产的 CoroCAM 系列紫外成像仪,美国电科院(EPRI)和以色列 OFIL 公司共同研发的 DAY-COR 系列,以及以色列 OFIL 自主研发的 Super B 紫外成像仪^[10-12]。典型的国内产品有长春国科精密公司自主研发的 CDH 系列紫外成像仪。

论文重点针对上述产品中紫外光学系统的不足之处进行改进。紫外光学系统作为紫外成像仪的核心关键器件,直接决定了成像仪的光能利用率、通光口径及分辨率等光学参数,其性能优劣对

于成像仪系统的性能表现至关重要。在以色列及南非公司产品中,紫外光学系统普遍采用施密特-卡塞格林系统^[13],虽然解决了由日盲紫外波段的短波特性引起的色差问题,但中心视场存在遮挡,减小了整个光学系统的通光口径,一定程度上降低了系统的光能利用率,导致产品难以进行远距离作业。为使紫外成像仪在进行远距离工作时获得的辐射能量满足成像要求,需选择口径较大的镜片作为光学系统的主镜,这又大大不利于产品的小型化研制,限制了其在电力行业的大规模应用。此外,以 Ofil 公司的某台 SuperB 成像仪为例,其紫外可见光双光路对准精度标称为 1 mrad,实际测试值则为 5 mrad。由此推算,在 20 m 工作距离上,电晕放电位置显示值与实际值相差可达 100 mm,容易造成对故障的定位偏差。长春国科的早期产品虽然有效解决了国外产品光能利用率不足的问题,但由于选择单一熔石英材质,对于色差的消除不够理想,且分辨率仅为 5 lp/mm,不利于分辨相邻电力设备的故障损伤。针对上述问题,论文设计了一款大孔径消色差^[14]紫外光学系统,利用熔石英及氟化钙两种材料^[15]的不同色散特性,根据改进的双胶合透镜结构有效解决了目前大多数紫外成像仪存在的定位和指向精度不佳、色差较大、分辨率及光能利用率不足等问题。设计的紫外光学系统全视场全探测范围内点列图均方根直径 < 0.08 mm,分辨率为 20 lp/mm,满足电力行业电晕探测需求,已计划装配于长春国科的二型紫外成像仪产品中。

2 光学系统参数的确定

紫外成像仪的通用技术指标如表 1 所示。系统所采用的紫外探测器尺寸 18 mm,最小紫外光灵敏度为 3×10^{-18} W/cm²,由于电晕放电发出的紫外辐射极其微弱,需保证入射至探测器的辐通量 $\geq 10^{-17}$ W 方能满足系统成像要求。目标发出的紫外辐射经大气传输、紫外光学系统及滤光片后入射至紫外探测器,此时探测器所接收的辐射通量如式(1)所示:

$$\Psi = \int_{240}^{280} k \frac{\pi D^2}{4} \frac{I(\lambda)}{L^2} \tau_{\text{filter}}(\lambda) \tau_{\text{lens}}(\lambda) \tau(\lambda)^{L/1000} d\lambda, \quad (1)$$

式中, k 为与探测角度相关的系数, D 为紫外光学系统的通光口径, L 为目标距光学系统第一个面的距离, τ_{filter} 为日盲紫外滤光片的透过率, τ_{lens} 为紫外光学系统的透过率, $\tau(\lambda)^{L/1000}$ 为大气衰减系数。

表 1 紫外成像仪通用技术指标

Tab. 1 General technical index of ultraviolet camera

探测距离/m	角分辨率/(°)	视场角/(°)
3 ~ 无穷远	≤ 0.1	≥ 6

本系统中, 日盲紫外滤光片的半宽度透过率约为 0.2, 紫外光学系统的整体透过率 ≥ 0.9, 通过表 1 的通用技术指标可知, 实际探测目标与成像之间的法向夹角很小, 因此认为 $k = 1$ 。

将参数 $k = 1$, $\tau_{\text{filter}} = 0.2$, $\tau_{\text{lens}} = 0.9$, 探测器的最小紫外灵敏度 $3 \times 10^{-18} \text{ W/cm}^2$ 及辐射通量需求 $1 \times 10^{-17} \text{ W}$ 代入式(1), 可以得到当紫外光学系统通光口径 $D \geq 48.512 \text{ mm}$ 时, 满足紫外成像仪的成像需求。

紫外光学系统的焦距可通过式(2)计算得到:

$$f' = \frac{d}{\tan 2\omega}, \quad (2)$$

式中, d 为探测器尺寸, 2ω 为系统的光学视场角。计算得到紫外光学系统的设计焦距 $f \leq 171.73 \text{ mm}$ 即可, 考虑近来电力部门实际应用紫外成像仪时, 对于设备小型化的需求愈发迫切, 选取 $f' \approx 100 \text{ mm}$ 。

紫外成像仪在实际工作时, 可见光通道用于对被检目标的背景进行成像从而帮助定位故障点, 因此需主要关注背景图像的细节信息; 而紫外通道用于检测电晕放电的有无, 因此无需关注目标放电点的细节信息, 论文着重描述紫外通道光学系统的设计, 因此只需关注目标放电能量的大

小以及多目标间的分辨问题即可。通常意义上, 认为可通过简单的图像处理算法识别两个目标点的前提条件是两目标放电点的 80% 弥散斑不重叠。紫外光学系统对目标点所成像的 80% 弥散斑半径 r 可由式(3)求得:

$$r \leq \frac{f' \times \Delta\theta}{2}, \quad (3)$$

式中, $\Delta\theta$ 为系统的通用技术指标角分辨率, f' 为系统的设计焦距, 可得 $r \leq 0.175 \text{ mm}$ 。

综上所述, 紫外光学系统的优选技术指标如表 2 所示。

表 2 紫外光学系统的优选设计指标

Tab. 2 Preferred design index of ultraviolet optical system

工作谱段/nm	240 ~ 280
通光孔径/mm	50
工作距离/m	3 ~ 无穷远
视场角/(°)	≤ 10
焦距/mm	≈ 100
弥散斑半径/mm	≤ 0.175

3 紫外光学系统设计

多数光学材料的光透过率随波长减小而降低, 因此可用于紫外谱段的光学透镜材料很少, 常见的仅氟化钙及熔石英两种材料。由于日盲紫外谱段的短波特性, 单独的熔石英材料会给系统带来较大的色差; 而单独的氟化钙材料则表现出较强的本征双折射, 从而严重影响系统的分辨率。因此, 选择熔石英与氟化钙共同作为紫外光学系统的原材料。同时, 由于典型的消色差结构——双胶合透镜结构无法透射紫外谱段辐射, 因此采用改进的分离式双胶合透镜结构消除系统色差。设计的大孔径高分辨率消色差紫外光学系统, 最终设计结果如表 3 所示, 系统结构如图 1 所示。

表3 紫外光学系统设计结果

Tab.3 Design results of ultraviolet optical system

面	曲率半径/mm	厚度/间隔	材料	通光口径/mm
光阑	55.833 9	15.327 6	氟化钙	50.098 9
2	-48.895 5	0.171 3		50.801 2
3	-48.278 1	3.000 0	熔石英	50.685 9
4	-706.347 2	0.100 0		49.228 1
5	35.386 8	15.488 7	氟化钙	46.787 0
6	-57.736	0.100 3		45.416 1
7	-57.555 5	3.000 0	熔石英	44.785 6
8	55.226 6	5.921 3		37.784 4
9	26.369 9	5.687 5	氟化钙	32.777 7
10	16.284 4	36.193 4		26.673 4

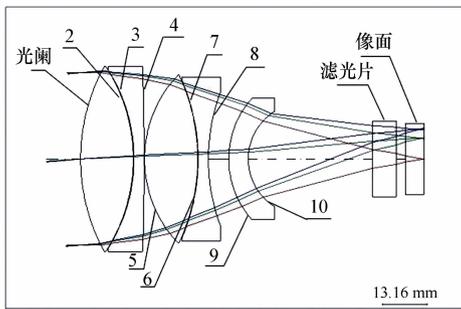


图1 紫外光学系统结构图

Fig.1 Structure of ultraviolet optical system

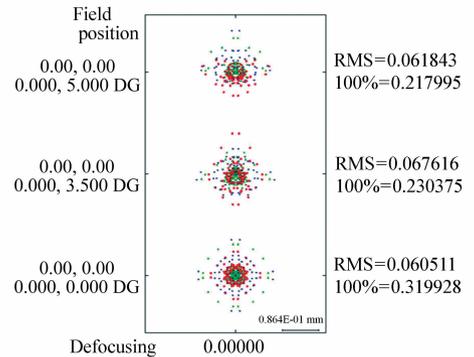
4 紫外光学系统分析

4.1 紫外光学系统像质评价

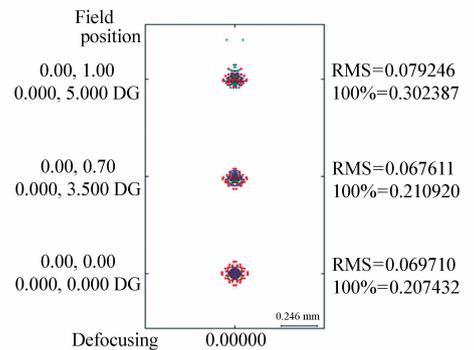
通常情况下,紫外成像仪中的紫外光学系统主要起对目标辐射进行能量收集探测的作用,因此认为光学系统的能量集中度是评判其成像质量优劣的核心指标。在电力部门实际应用时,发现分辨率也应作为紫外成像仪的主要评价指标,原因在于,在远距离对输电线路进行巡检时,高分辨率紫外成像仪可有效判断相邻电力设备的损伤点,而不至于将两个或几个相邻损伤点混淆。因此论文采用点列图及传递函数曲线(MTF)共同作为紫外光学系统的评价标准。

图2为对焦3 m及无穷远时,各视场的成像点列图。图3为对焦3 m及无穷远时,各视场的传递函数,从图3中可以看出,系统各视场弥散斑

的均方根直径在整个探测范围内均 $<0.08\text{ mm}$,且光斑圆度好,定位和指向精度高,大大有助于操作人员确定电力设备损伤点的位置;系统的分辨率为 20 lp/mm ,满足设计需求,大大有助于操作人员在远距离作业时分辨相邻电力设备的损伤。



(a) 3 m对焦
(a) 3 m focus



(b) 无穷远对焦
(b) Infinity focus

图2 点列图

Fig.2 Spot diagram

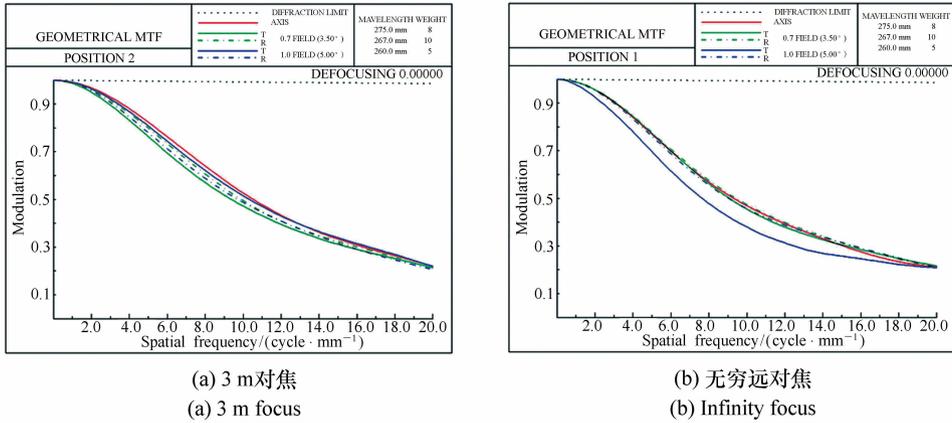


图 3 传递函数曲线

Fig. 3 MTF curve

4.2 紫外光学系统公差

考虑实际的光学元件加工能力以及实验人员

的装调水平,设定光学系统公差见表 4,其中光学元件的折射率公差 0.000 1,阿贝常数允许偏差 0.1%。

表 4 最终制定的紫外光学系统公差

Tab. 4 Final ultraviolet optical system tolerance

表面	元件加工公差					装配公差	
	面形公差 $p_v(\lambda)$	半径公差 (N)	厚度公差/mm	元件楔形/mm	间隔公差/mm	偏心公差/mm	倾斜公差/(')
1	0.25	2	0.05	0.05		0.05	2
2	0.25	2			0.05		
3	0.25	2	0.05	0.05		0.05	2
4	0.25	2			0.05		
5	0.25	2	0.05	0.05		0.05	2
6	0.25	2			0.05		
7	0.25	2	0.05	0.05		0.05	2
8	0.25	2			0.05		
9	0.25	2	0.05	0.05		0.05	2
10	0.25	2			焦距调节		

采用蒙特卡罗统计模拟法对公差进行敏感度分析,结果如表 5 所示。分析表中结果得出结论,在表 4 的公差范围内,有 90% 的镜头均可满足设计需求。综上,紫外光学系统可根据表 4 中制定

的公差范围进行加工和装调。最终加工装调完成的紫外光学系统实物如图 4 所示。

表 5 公差分析结果

Tab. 5 Results of tolerance analysis

点列图均方根直径最佳值/mm	0.072 432 995
点列图均方根直径最差值/mm	0.105 281 321
点列图均方根直径平均值/mm	0.080 668 826
90% 均方根直径最大值/mm	0.087 272 107
前焦距补偿量/mm	0.101 205
后焦距补偿量/mm	0.065 814

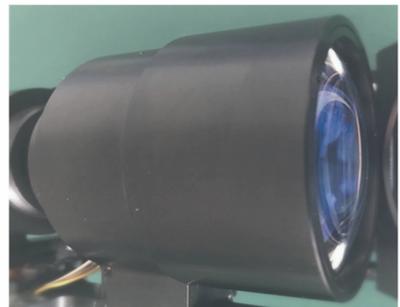


图 4 紫外光学系统实物图

Fig. 4 Ultraviolet optical system

5 结 论

本文分析了电晕放电探测的需求,提出了紫外成像仪中紫外光学系统的总体设计,利用熔石英及氟化钙两种材料的不同色散特性,选取上述两种材料组合,根据改进的分离式双胶合透镜结

构设计了一款大孔径高分辨率的消色差紫外光学系统。在 10° 视场范围内,设计的紫外光学系统全探测范围内点列图均方根直径 $<0.08\text{ mm}$,分辨率为 20 lp/mm 。有效解决了目前大多数紫外成像仪存在的定位和指向精度欠缺、色差较大、分辨率及光能利用率不足等问题,对于紫外成像仪在电力行业的推广及应用具有重大实际意义。

参考文献:

- [1] 刘尚合,朱利,魏明,等.电晕放电辐射信号远距离探测技术研究[J].高电压技术,2013,39(12):2845-2851.
LIU SH H,ZHU L,WEI M,*et al.*. Research on long-range detection technology for corona discharge radiation signal[J]. *High Voltage Engineering*,2013,39(12):2845-2851. (in Chinese)
- [2] 万保权,谢辉春,樊亮,等.特高压变电站的电磁环境及电晕控制措施[J].高电压技术,2010,36(1):109-115.
WAN B Q,XIE H CH,FAN L,*et al.*. Electromagnetic environment and corona control measures of UHV substation[J]. *High Voltage Engineering*,2010,36(1):109-115. (in Chinese)
- [3] 张乔根,王清亮,张璐,等.污秽条件下 $\pm 800\text{KV}$ 直流输电线路电晕特性[J].高电压技术,2010,36(1):31-36.
ZHANG Q G,WANG Q L,ZHANG L,*et al.*. Corona characteristics of $\pm 800\text{ kV}$ UHV DC polluted transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*,2010,36(1):31-36. (in Chinese)
- [4] 孟晓波,卞星明,陈枫林,等.负直流下绞线电晕起始电压分析[J].高电压技术,2011,37(1):77-84.
MENG X B,BIAN X M,CHEN F L,*et al.*. Analysis on negative DC corona inception voltage of stranded conductors[J]. *High Voltage Engineering*,2011,37(1):77-84. (in Chinese)
- [5] 陈澜,卞星明,陈枫林,等.电晕笼内导线交流电晕起始电压判断方法[J].高电压技术,2011,37(1):85-90.
CHEN L,BIAN X M,CHEN F L,*et al.*. Method to judge corona inception voltage of AC transmission lines using corona cage[J]. *High Voltage Engineering*,2011,37(1):85-90. (in Chinese)
- [6] 张海峰,庞其昌,陈秀春.高压电晕放电特征及其检测[J].电测与仪表,2006,43(2):6-8.
ZHANG H F,PANG Q CH,CHEN X CH. The characteristics of high-voltage corona and its detection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2006,43(2):6-8. (in Chinese)
- [7] 周影,姜洪伟,周跃,等.微弱日盲紫外电晕自动实时检测方法[J].中国光学,2015,8(6):926-932.
ZHOU Y,LOU H W,ZHOU Y,*et al.*. Automatic real-time detection method of faint solar-blind ultraviolet corona[J]. *Chinese Optics*,2015,8(6):926-932. (in Chinese)
- [8] WILCOX P G,SAFRONOVA A S,KANTSYREV V L,*et al.*. Extreme ultraviolet spectroscopy of low-Zion plasmas for fusion applications[J]. *Review of Scientific Instruments*,2008,79(10):10F543
- [9] 崔穆涵.日盲紫外像增强器与ICCD的参量测试与辐射标定[D].北京:中国科学院大学,2016.
CUI M H. Calibration of the solar-Blind UV image intensifier and intensified CCD[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2016. (in Chinese)
- [10] MCCLEMENTS K G,HARRISON R A,ALEXANDER D. The detection of wave activity in the solar corona using UV line spectra[J]. *Solar Physics*,1991,131(1):41-48.
- [11] PINNANGUDI B,GORUR R S,KROESE A J. Quantification of corona discharges on nonceramic insulators[J]. *Dielectrics and Electrical Insulation,IEEE Transactions on*,2005,12(3):513-523.
- [12] 姚明辉.紫外CCD在电晕检测系统中的应用[J].科学技术与工程,2007,7(7):1320-1322.
YAO M H. Application of UV-CCD to corona detecting system[J]. *Science Technology and Engineering*,2007,7(7):1320-1322. (in Chinese)
- [13] 张学军,樊延超,鲍赫,等.超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J].光学精密工程,2016,24(11):2614-2626.
ZHANG X J,FAN Y CH,BAO H,*et al.*. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*,2016,24(11):2614-2626. (in Chinese)
- [14] 杨晋,张锐,潘明忠,等.大孔径面视场PG成像光谱仪的光学设计[J].光学精密工程,2017,25(4):335-342.

YANG J, ZHANG R, PAN M ZH, *et al.*. Optical design of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4):335-342. (in Chinese)

[15] 张春雷, 徐乐, 刘健, 等. 全频段亚纳米精度氟化钙材料加工[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11):2636-2642.

ZHANG CH L, XU L, LIU J, *et al.*. Sub-nanometer precision optical fabrication of CaF₂ materials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11):2614-2626. (in Chinese)

作者简介:



崔穆涵(1988—),女,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事光学设计及光电测试方面的研究。E-mail: cuimuhan@cnepo.com.cn



田志辉(1981—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: tian-zhi-hui@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。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(Ei)数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 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、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

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

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

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)