

## 硫系玻璃在现代红外热成像系统中的应用

白瑜<sup>1,2,3\*</sup>, 廖志远<sup>1</sup>, 李华<sup>1</sup>, 程习敏<sup>1,3</sup>, 邢廷文<sup>1</sup>, 蒋亚东<sup>2</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209;

2. 电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**介绍了硫系红外玻璃的组成成分,分析了其独特的优势,建立了红外热成像系统中各个参数和温度之间关系的数学模型。基于硫系玻璃折射率温度系数小、成本低的优点,将硫系玻璃应用于红外热成像探测系统,并给出了一种折射式的中波红外热成像消热差探测系统实例,评价结果表明,该系统在低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、常温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、高温 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 都取得了良好的成像质量,适用于像元数为 $320\text{ pixel}\times 256\text{ pixel}$ ,像元尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$ 的中波红外凝视型焦平面阵列探测器。

**关键词:**红外探测;应用光学;光学设计;硫系玻璃

中图分类号:TN213 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140703.0449

## Application of the chalcogenide glass in modern infrared thermal imaging systems

BAI Yu<sup>1,2,3\*</sup>, LIAO Zhi-yuan<sup>1</sup>, LI Hua<sup>1</sup>, CHENG Xi-min<sup>1,3</sup>, XING Ting-wen<sup>1</sup>, JIANG Ya-dong<sup>2</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

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

\* Corresponding author, E-mail: baiyu91258@163.com

**Abstract:** The composition of novel chalcogenide infrared glass are introduced in this paper. Compared with other infrared glass, its advantages are analyzed. Mathematical model of relation between the temperature and other parameters in infrared detection imaging system is established. Benefitting from the less index temperature coefficient and low cost of chalcogenide infrared glasses, a refractive mid-wave infrared (MWIR) detection thermalization imaging system is presented. The design results indicate that the system has good imaging quality at the temperature of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The system is compatible with staring focal plane array MWIR detector with  $320\text{ pixel}\times 256\text{ pixel}$  and pixel pitch of  $30\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$ .

**Key words:** infrared detection; applied optics; optical design; chalcogenide glass

## 1 引言

随着温度的变化,红外热成像探测系统的曲率半径、元件厚度、元件间隔、非球面系数、光学材料折射率都会发生相应的改变,同时红外探测器的光敏面也随温度的变化而漂移,导致红外热成像探测系统的像面离焦,系统无法正常工作,因此,热补偿和热设计是红外热成像探测系统的关键技术之一。对于红外热成像探测系统的热设计,目前报道的文献中大多采用基于衍射光学元件特殊的热特性<sup>[1-6]</sup>,在系统中引入衍射光学元件和折射光学元件构成折射/衍射混合系统来完成热设计,但在实际工程应用时衍射面的衍射效率不高,产生的杂散光降低系统对比度和信噪比,进而影响红外热成像探测系统的探测性能。

相比可见光玻璃而言,红外玻璃的折射率温度系数  $dn/dT$  都较大,因此红外热成像探测系统的热离焦更严重。机械主动式消热差方法和机械被动式消热差方法因使用了笨重的机械设备,导致了系统重量变重,成本增加。光学被动式消热差方法只须通过光学件和机械件的恰当匹配即可实现无热化探测,该类方法具有结构简单、重量轻、无需调节任何器件自动消热差、像面稳定等优点,因此是目前最受关注的消热差方法。而光学被动式消热差方法的核心是具有低折射率温度系数的红外玻璃,而目前传统红外玻璃的折射率温度系数都较大,引起的热离焦较大。

新型低折射率温度系数红外玻璃的长足发展为红外热成像探测系统实现良好的热设计提供了新的契机。本文分析了硫系玻璃和其他传统红外玻璃的优势,建立了温度变化时,红外热成像探测系统中各个参数随温度变化的数学模型。基于硫系玻璃折射率温度系数小、成本低的优点,在红外热成像探测系统中,利用硫系玻璃代替其他传统红外玻璃,可有效减小红外热成像探测系统的热离焦量,降低红外热成像探测系统消热差设计的难度。

## 2 硫系玻璃

硫系玻璃是以硫族元素为主,同时混合含有 Ge、Si、As、Sb 等其它金属元素的一种红外玻璃<sup>[7-8]</sup>。与传统红外玻璃锗相比,硫系玻璃中锗含量较少,因此硫系玻璃的成本更低,更适用于低成本、批量化的红外热成像探测系统的生产。

在长波红外波段,锗是最常使用的光学玻璃,但对于有消色差要求的长波红外系统,在光学玻璃的选择上受到很大的限制,硒化锌的价格太昂贵,硫化锌在长波红外的透过率不高。在长波红外波段,硫系玻璃的色散特性与硒化锌接近,因此可应用硫系玻璃和锗两种光学玻璃实现长波红外波段的消色差设计<sup>[9-10]</sup>。传统的锗玻璃的折射率温度系数为  $3.96 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ,而硫系玻璃 AMTIR 的折射率温度系数为  $7.7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,因此,在红外热成像探测系统中使用硫系玻璃引起的热离焦量会更小,硫系玻璃对于红外热成像探测系统的消热差设计效果更佳。尤其对于目前广泛应用于小区监控的大视场短焦距红外镜头,因环境温度变化范围不大,因此在该类系统中使用硫系玻璃甚至无需进行消热差就可取得良好的成像性能。

对于传统的红外玻璃(如硅)必须采用传统的生产工艺,先粗磨,再精磨,然后抛光进行加工。锗、硫化锌、硒化锌等红外玻璃可利用单点金刚石车床车削加工,这些加工手段不利于低成本、批量化的生产。硫系玻璃具有较低的转变温度,可采用精密模压成型制备来加工制作,大大降低了其生产加工成本,节约了加工时间,对于应用于小区监控的大视场短焦距红外镜头的低成本、批量化的生产,降低小区业主的生活成本具有很大的应用前景。

## 3 系统参数随温度变化分析

随着环境温度的变化,红外热成像探测系统的曲率半径、元件厚度、元件间隔、非球面系数、光

学材料折射率等参数都会发生相应的改变,导致红外热成像探测系统的像面离焦超过系统焦深,系统无法正常使用。

以下将给出这些参数随环境温度变化的函数关系:

(1) 曲率半径:

$$R(T) = R(20)[1 + \alpha_g \cdot (T - 20)], \quad (1)$$

式中, $R(T)$ 、 $R(20)$ 为温度 $T$ ℃、20℃时的曲率半径, $\alpha_g$ 为光学材料的线膨胀系数。

(2) 玻璃厚度:

$$T_G(T) = T_G(20)[1 + \alpha_g(T - 20)], \quad (2)$$

式中, $T_G(T)$ 、 $T_G(20)$ 为温度 $T$ ℃、20℃时的玻璃厚度。

(3) 空气间隔:

$$T_i(T) = T_i(20) \cdot [1 + \alpha_m \cdot (T - 20)], \quad (3)$$

式中, $T_i(T)$ 、 $T_i(20)$ 为温度 $T$ ℃、20℃时的空气间隔, $\alpha_m$ 为机械材料的线膨胀系数。

(4) 玻璃折射率:

$$n(T) = n_\lambda + (dn/dT) \cdot (T - 20), \quad (4)$$

式中, $n(T)$ 为温度 $T$ ℃时的玻璃折射率, $n_\lambda$ 为20℃时光学材料在波长 $\lambda$ 处的折射率, $dn/dT$ 为光学材料的折射率温度系数。

(5) 非球面系数:

$$K(T) = K(20), \quad (5)$$

$$A(T) = A(20)/[1 + \alpha_g \cdot (T - 20)]^3, \quad (6)$$

$$B(T) = B(20)/[1 + \alpha_g \cdot (T - 20)]^5, \quad (7)$$

$$C(T) = C(20)/[1 + \alpha_g \cdot (T - 20)]^7, \quad (8)$$

$$D(T) = D(20)/[1 + \alpha_g \cdot (T - 20)]^9, \quad (9)$$

$$E(T) = E(20)/[1 + \alpha_g \cdot (T - 20)]^{11}, \quad (10)$$

式中, $K(T)$ 、 $A(T)$ 、 $B(T)$ 、 $C(T)$ 、 $D(T)$ 、 $E(T)$ 为温度 $T$ ℃时的非球面系数,分别对应二次系数,4次项系数,6次项系数,8次项系数,10次项系数,12次项系数, $K(20)$ 、 $A(20)$ 、 $B(20)$ 、 $C(20)$ 、 $D(20)$ 、 $E(20)$ 为常温20℃时非球面的各项系数。

与其同时,热设计分析时还必须考虑红外探测器光敏面随温度变化而产生的漂移量。

## 4 技术指标

红外镜头的主要技术指标如下所示:

(1) 工作波段:3.7~4.8 μm;

(2) 焦距:109.7 mm;

(2)  $F$ 数:2.0;

(3) 视场:6.4°;

(4) 探测器阵列:320×256;

(5) 像元大小:30 μm×30 μm;

(6) 工作温度范围:-40~60℃。

## 5 设计分析与结果

目前红外热成像探测系统的热设计方法主要有机械主动式、机械被动式、光学被动式3种。机械主动式热设计方法和机械被动式热设计方法都需要增加机械设备驱动机械件和光学件来补偿温度变化引起的像面漂移,因此这两种方法结构笨重,成本较高,使用不方便。

光学被动式热设计方法是通过选择合适的光学材料,合理分配各个光学元件的光焦度,选择合适的反射镜材料和机械镜筒、隔圈材料,使得整个红外探测成像系统的光学像面和红外探测器光敏面的漂移量在系统一倍焦深之内。该方法结构简单、重量轻、无需增加其他机构就可自动保证像面稳定,是目前最经常使用的热设计方法,因此本文选用光学被动式热设计方法。

光学系统的结构形式主要有3种,即折射式、反射式、折反射。反射式结构没有色差,对于宽光谱系统很有优势,该结构视场角较小,且加工、检测、装配难度较大,不利于批量化生产。折反射结构中主镜、次镜的间隔公差较紧,装配公差较严,且为了保证优良的成像质量,主镜多采用高次非球面,主镜检测难度较大,也不利于批量化生产。折射式结构是最为常用的结构形式,其公差宽松,光学元件可批量化生产,因此本文选用折射式结构。

光学被动式热设计方法的思路是首先根据技术指标、像质要求优化设计出满足要求的常温镜头,而后将系统等效视为一个变焦系统,根据第2节中的数学关系,分别建立低温、高温和常温时光学元件的曲率半径、厚度、通光口径、非球面系数、光学玻璃折射率、光学元件间隔的函数关系,将常温、低温、高温等效看作变焦系统的短焦、中焦、长焦3个位置。

编写自定义优化程序,对多重变焦系统进行优化,为了减小温度变化引起光学镜片参数变化导致的像面漂移,系统中应多用折射率温度系数小的硫系玻璃,最终优化得到的系统结构如图1所示。系统由2组6片透镜组成,采用4片硫系玻璃,1片锗玻璃,1片硫化锌玻璃,镜筒采用铝合金。前组为2片透镜,承担了主要光焦度,后组为4片透镜,用于将一次像面的像放大成像在探测器靶面上,同时起到平衡系统剩余像差和保证不同温度时像面齐焦的作用。因系统使用制冷型红外探测器,因此系统光阑须和红外探测器冷光阑匹配,为减小前组口径并满足冷屏匹配,通过在前组和后组之间成一次像,再经后组成像到红外探测器靶面上。为了更好的校正像差,后组必须选取合适的放大倍率,后组放大倍率的选取和前组的光焦度有关。为了平衡轴外像差,系统在锗镜和硫化锌镜上分别采用了1个非球面,其余都为球面。

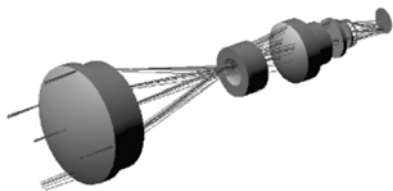


图1 光学系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system

经过计算评估,低温、高温时像面和红外探测器光敏面的漂移量分别为  $-0.012\text{ mm}$ 、 $0.0086\text{ mm}$ , 高低温时像面和红外探测器光敏面的漂移量的变化量为  $0.0206\text{ mm}$ 。

光学系统焦深计算公式为:

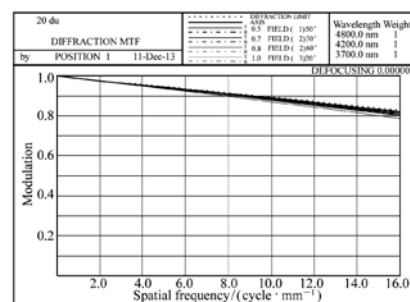
$$\delta = 2\lambda(F/\#)^2, \quad (11)$$

式中, $\delta$ 为系统焦深, $\lambda$ 为中心波长,计算可得该红外探测成像系统的焦深为  $0.0336\text{ mm}$ , 高低温时整个红外探测成像系统的光学像面和红外探测器光敏面的漂移量在系统一倍焦深之内。

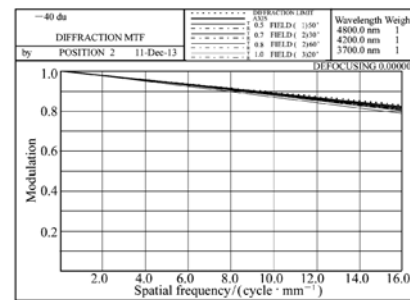
## 6 像质评价

### 6.1 传递函数

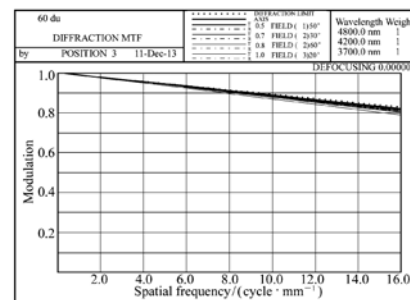
图2给出了该系统的传递函数曲线(Modulation Transfer Function, MTF),其中,(a)、(b)、(c)分别为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60\text{ }^\circ\text{C}$  温度时的 MTF。由图



(a)  $20\text{ }^\circ\text{C}$



(b)  $-40\text{ }^\circ\text{C}$



(c)  $60\text{ }^\circ\text{C}$

图2 传递函数曲线

Fig. 2 MTF curves

可知,奈奎斯特频率  $16\text{ lp/mm}$  处, $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 、

60 °C 的传递函数值均接近衍射极限,温度对系统的 MTF 的影响很小。

### 6.2 能量集中度

图 3 给出了系统在探测器一个像元内 20 °C、-40 °C、60 °C 温度时的能量集中度曲线, 20 °C、-40 °C、60 °C 不同温度时的 80% 能量都集中在探测器一个像元内,满足使用要求。

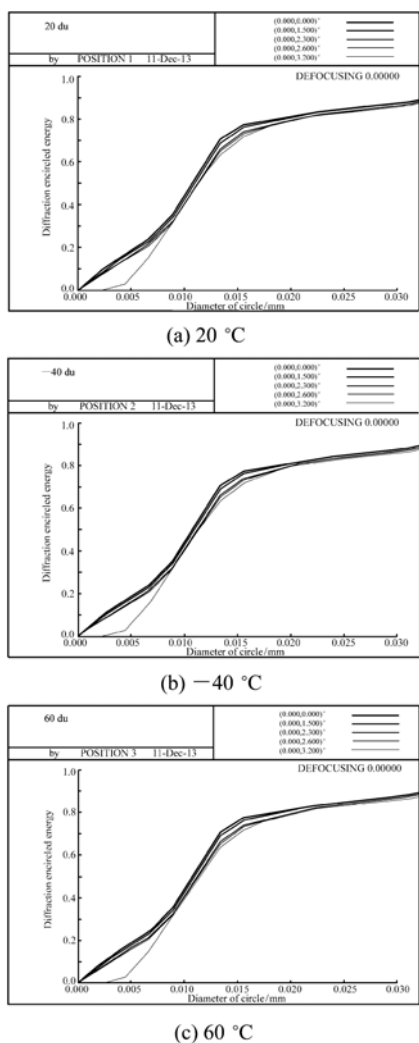


图 3 能量集中度曲线

Fig. 3 Encircled energy curves

### 6.3 点列图

图 4 给出了系统 20 °C、-40 °C、60 °C 时的点列图,由图可知, 20 °C、-40 °C、60 °C 时各视场的 RMS 弥散斑直径均小于 30 μm,小于探测器的一个像元,成像质量良好。

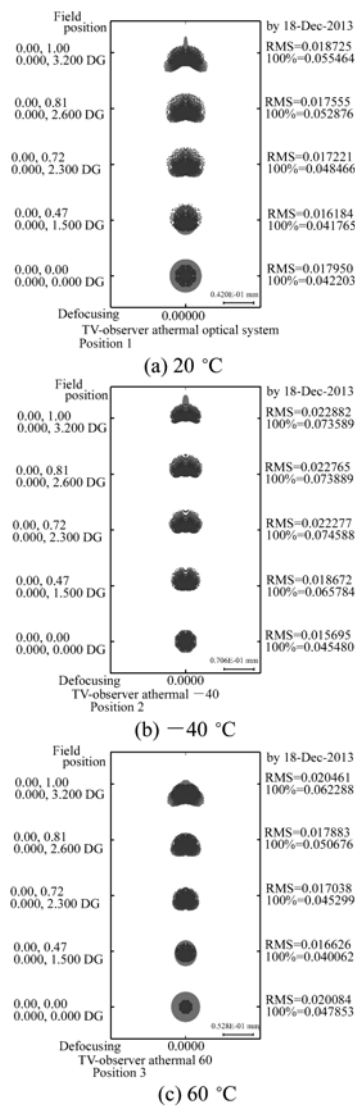


图 4 点列图

Fig. 4 Spot diagrams

## 7 结 论

热设计是红外热成像探测系统的核心技术之一,本文介绍了硫系红外玻璃的组成成分以及和其他传统红外玻璃相比的优势之处,建立了红外热成像探测系统中各个参数和温度之间的数学模型,将硫系红外玻璃应用于红外热成像探测系统,设计了一套折射式的红外消热差探测成像系统,系统拥有 109.7 mm 焦距,6.4°视场,100%冷光阑效率的性能指标,评价结果表明,该系统在低温

-40 ℃、常温 20 ℃、高温 60 ℃ 都取得了良好的 30 μm 的中波红外凝视型焦平面阵列探测器。成像质量,适用于像元数 320 × 256,像元尺寸为

### 参考文献:

- [1] 孙金霞,刘建卓,孙强.折衍混合消热差共形光学系统的设计[J].光学精密工程,2010,18(4):792-798.  
SUN J X,LIU J ZH,SUN Q. Athermal design for hybrid refractive/ diffractive conformal optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(4):792-798. (in Chinese)
- [2] 孙强,王肇圻,李凤友.红外 3.2 ~ 4.5 μm 波段折射/衍射光学系统的减热差设计[J].光学精密工程,2002,10(4):121-126.  
SUN Q,WANG ZH Q,LI F Y. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2 ~ 4.5 μm[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(4):121-126. (in Chinese)
- [3] TAMAGAWA Y. Multilens system with design with an athermal chart[J]. *Appl. Opt.*,1994,33(34):8009-8013.
- [4] AKRAM M N. Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal-plane arrays[J]. *SPIE*,2002,4768:10-21.
- [5] 沈良吉,冯卓祥.3.7 μm ~ 4.8 μm 波段折衍混合红外光学系统的无热化设计[J].应用光学,2009,30(4):683-685.  
SHEN L J,FENG ZH X. Athermal design of refractive diffractive hybrid infrared optical system working at 3.7 ~ 4.8 μm [J]. *J. Appl. Optics*,2009,30(4):683-685. (in Chinese)
- [6] 刘峰,赛建刚,赵建科.8 ~ 12 μm 波段折反衍混合坦克扫描物镜消热差设计[J].红外与激光工程,2012,41(9):2459-2463.  
LIU F,SAI J G,ZHAO J K. Athermalization design of 8 ~ 12 μm infrared hybrid refractive/reflective/diffractive lenses for tank scan[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2012,41(9):2459-2463. (in Chinese)
- [7] GUIMOND Y,BELLE C. Molded GASIR infrared optics for automotive application[J]. *SPIE*,2006,6206:1-6.
- [8] GUIMOND Y,BELLE C. A new moldable infrared glass for thermal imaging and low cost sensing[J]. *SPIE*,2007,6542:1-6.
- [9] BUREAU B,ZHANG X H,SMEKTALA F. Recent advances in chalcogenide glasses[J]. *Non-Cryst Solids*,2004,345 & 346(1):276-283.
- [10] HILTON A R. *Chalcogenide Glasses for Infrared Optics*[M]. New York:McGraw-Hill Companies,Inc.,2010.

### 作者简介:



白瑜(1982—),男,山西原平人,博士研究生,助理研究员,2006年于西安工业大学获得学士学位,2009年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事红外探测技术、空间探测技术、光机系统设计、光电信息处理技术等方面的研究。E-mail: baiyu91258@163.com



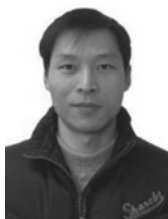
程习敏(1989—),男,河南新乡人,硕士研究生,主要从事红外探测技术等方面的研究。E-mail: chengximin001@gmail.com



廖志远(1976—),男,四川成都人,副研究员,硕士生导师,主要从事光学系统设计等方面的研究。E-mail: lzy@ioe.ac.cn



邢廷文(1965—),男,湖北阳新人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术等方面的研究。E-mail: xtw@ioe.ac.cn



李华(1975—),男,新疆奎屯人,研究员,硕士生导师,主要从事光学机械系统设计等方面的研究。E-mail:ioelh@yahoo.com.cn



蒋亚东(1964—),男,重庆人,教授,博士生导师,主要从事光电信息处理等方面的研究。E-mail:jiangyd@uestc.edu.cn

## 《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,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技核心期刊数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 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](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn); [zgxcn@126.com](mailto: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)