

# 基于硫系玻璃的汽车夜视衍射光学系统

芦雅静 宋宝安 徐铁峰 戴世勋 聂秋华 沈祥 林常规 张培晴

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要** 在夜间或雨雪、大雾天气等能见度低的情况下,利用传统的汽车照明系统,驾驶员较难看清前方的景物及行人。夜视辅助驾驶系统可以提高驾驶员夜间行车视距,减小交通事故发生概率。基于硫系玻璃的汽车夜视系统应用越来越广。分析比较了目前市场上存在的几类夜视光学系统的优缺点,设计了基于新型红外硫系玻璃和衍射光学元件的夜视系统,优化后系统的视场角为 $30^\circ$ 、焦距为15 mm、 $F$ 数为1、工作温度范围为 $-30\text{ }^\circ\text{C}\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 。系统包含三片材料为 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 的透镜,仅引入一个非球面和一个衍射面。实验结果表明,在空间频率15 lp/mm处,系统的调制传递函数接近衍射极限,在 $-30\text{ }^\circ\text{C}\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内最大的焦移量为 $6.6\text{ }\mu\text{m}$ ,远小于系统焦深 $20\text{ }\mu\text{m}$ ,成像质量良好。

**关键词** 光学设计;硫系玻璃;衍射光学元件;夜视系统

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.122204

## Design of Refractive-Diffractive Night Vision System Based on Chalcogenide Glass

Lu Yajing Song Baoan Xu Tiefeng Dai Shixun Nie Qiu-hua

Shen Xiang Lin Changgui Zhang Peiqing

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract** The illumination of cars is limited when they run at night or under other low visibility situations. The drivers have difficulty in seeing the scene and pedestrians in front, which greatly increases the risk of driving. Night vision system based on chalcogenide glasses is more and more used in automotive industry. The advantages and disadvantages of night vision systems are analyzed. A novel optical system based on chalcogenide glass and diffractive optical elements is presented. A diffractive-refractive hybrid night vision system with  $30^\circ$  field of view is designed. The effective focal length and  $F$  number are respectively 15 mm and 1. The system is composed of three lenses which use  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ , including a conic surface and a diffractive surface. The experimental results show that the modulation transfer function (MTF) of the hybrid system is close to diffraction limit at the spatial frequency of 15 lp/mm. The maximum focal shift is  $6.6\text{ }\mu\text{m}$  in the range from  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  to  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , which is less than the system focal depth of  $20\text{ }\mu\text{m}$ . The system has a compact structure and a good imaging quality.

**Key words** optical design; chalcogenide glass; diffractive optical element; night vision system

**OCIS codes** 220.3620; 220.4830; 110.3080; 110.4850

## 1 引言

随着汽车工业的快速发展,汽车持有量迅速增加,交通事故的发生率也呈逐年上升的趋势。尤其是在夜间行车时,驾驶员较难看清前方路况,容易产生视觉疲劳,这导致夜间交通事故增加。据美国公路交通安全

收稿日期: 2013-08-20; 收到修改稿日期: 2013-09-23; 网络出版日期: 2013-11-07

基金项目: 国际科技合作项目(2011DFA12040)、国家 973 项目(2012CB722703)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0976)、宁波市创新团队项目(2009B21007)、宁波市自然科学基金(2011A610187)、宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 芦雅静(1989—),女,硕士研究生,主要从事红外材料光功能器件及光学设计方面的研究。

E-mail: luyj\_1989@126.com

导师简介: 徐铁峰(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术、特种玻璃光纤、红外光学材料和红外信息系统等方面的研究。E-mail: xutiefeng@nbu.edu.cn(通信联系人)

管理局的统计数据,夜间行车比例大约为 25%,但是有 55% 的交通事故发生在夜间<sup>[1]</sup>。因此,视距短与视觉疲劳成为夜间行车安全的重大隐患。

夜视辅助驾驶系统可以改善和扩大驾驶员的视野,增加视距,给驾驶员提供更多的信息,提高夜间观察能力。目前,部分豪华轿车,比如悍马、凯迪拉克、宝马、奔驰、丰田、本田、奥迪、凌志、红旗等品牌中的高端车型已配备了红外夜视系统<sup>[2]</sup>。夜间行车时环境温度变化较大,温度变化对夜视系统像质有显著的影响。用于夜视系统的红外材料有限,一般为锗、硒化锌、硫化锌等,这几种材料具有较大的折射率温度系数且不易加工,这些情况限制了夜视系统的发展<sup>[3]</sup>。硫系玻璃在夜视系统中的应用备受关注,该材料具有较小的折射率温度系数,同时可模压成型,在夜视系统中有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。近年来,基于硫系玻璃的衍射光学元件在理论和工艺等方面也取得了突破。硫系玻璃衍射光学元件的使用有利于系统的小型化。另外,衍射光学元件具有特殊的色散性能、温度特性和良好的像差校正能力,含有衍射元件的系统,通过合理分配光焦度,可以设计出具有较好温度稳定性的混合系统<sup>[5-6]</sup>。

本文首先简要阐述了车载红外夜视系统的工作原理,然后分析了目前市场上存在的几类夜视系统的优缺点,最后,系统深入地分析了基于硫系玻璃衍射光学元件的夜视系统设计所涉及的材料光热特性、系统光焦度分配等问题,设计并优化了基于硫系玻璃衍射光学元件的三片型夜视光学系统,对比分析了系统的成像性能。

## 2 车载夜视系统

车载夜视技术是在夜间或低亮度条件下,将景物不可见的红外辐射图转变为人眼可见图像的光电技术。一般汽车前照灯只能照射 50 m 左右,而夜视系统可以帮助驾驶员看到几百米以外的路况信息,使驾驶员提前注意到危险,及时做出反映,减少交通事故的发生。常用的车载红外夜视系统有两类,一类是基于近红外发光的主动夜视系统,另一类是基于远红外热成像技术的被动夜视系统。主动夜视系统利用本身携带的红外光源照射景物成像,故体积和质量较大,作用距离也受到红外光源功率的限制。被动夜视系统通过探测器接收景物自身的红外热辐射成像,系统结构简单,且探测距离远<sup>[7]</sup>。

夜视系统的结构一般如图 1 所示,主要包括四个部分,光电转换装置将红外辐射图转变为人眼可见的图像,再经过去噪、整形、放大等处理显示到显示屏上。红外镜头是夜视系统的重要部件,负责接收目标辐射的红外线,并将其会聚成像于红外探测器上。目前,用于红外光学镜头的材料一般为锗、硅、硒化锌等,这些材料具有较大的折射率温度系数,当温度变化时,光学系统产生热差,性能下降,需要进行温度补偿,使得系统体积和质量增大。本文针对目前红外光学透镜存在的缺陷,利用新型硫系玻璃和衍射光学元件设计了结构简单的被动夜视光学系统,实现系统的温度自适应,使系统在较大温度范围内成像良好。

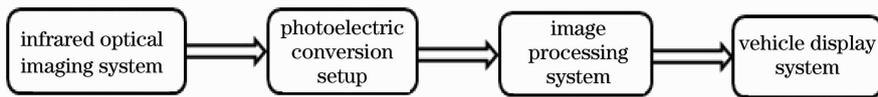


图 1 夜视系统示意图

Fig. 1 Schematic of night vision system

## 3 夜视光学系统元件光热特性

### 3.1 硫系玻璃

硫系玻璃是第 VI 主族元素 S、Se、Te 中的一种或几种与其他金属、非金属元素形成的非晶态玻璃的总称<sup>[8]</sup>。硫系玻璃种类繁多,目前广泛应用的是由 Ge、As、Se 和 Ge、Sb、Se 几种元素按不同比例组成的。硫系玻璃在 1~14  $\mu\text{m}$  波段具有良好的透过性能,适用于红外夜视系统。

硫系玻璃具有较小的折射率温度系数  $dn/dT$ 。传统的锗材料,其折射率温度系数为  $400 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,而 Se 基玻璃的折射率温度系数约为锗材料的 1/8,即  $50 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,它是良好的消热差材料<sup>[9]</sup>。硫系玻璃是非晶态材料,可用精密模压工艺制备红外镜片,大批量生产出球面、非球面以及带有衍射面的复杂光学元件。

当用于非球面或者衍射面时,一般红外材料需要采用金刚石车削技术,该方法成本高、效率低,而模压技术克服了传统生产工艺的缺陷,具有快速、高效、低成本的特点,在红外透镜制作中较大的优势<sup>[10]</sup>。在硫系玻璃基底上制作衍射元件,不仅能够减小夜视系统的体积和质量,改善系统的热稳定性和成像质量,还能降低成本,在夜视系统中具有独特的优势。

### 3.2 色散特性

光学元件的色散特性通过材料的阿贝常数来表征<sup>[11]</sup>。

折射元件的色散系数为

$$V_{re} = \frac{n_m - 1}{n_s - n_l}, \quad (1)$$

式中  $n_s$ 、 $n_m$ 、 $n_l$  为下限波长、中心波长和上限波长处对应的材料折射率。

衍射元件的色散系数为

$$V_{di} = \frac{\lambda_m}{\lambda_s - \lambda_l}, \quad (2)$$

式中  $\lambda_s$ 、 $\lambda_m$ 、 $\lambda_l$  为相应的工作波长。

由(1)式和(2)式可以看出,折射元件的色散与材料的折射率有关,且恒为正,而衍射元件的色散与材料无关,仅与波长有关,且恒为负。在夜视系统中,利用衍射元件可以在宽波段范围中校正色差,提高系统像质。

### 3.3 温度特性

#### 3.3.1 折射元件的温度特性

光学元件的温度特性<sup>[12]</sup>由它的光热膨胀系数表示,定义为单位温度变化引起的光焦度的变化,表示为

$$x_f = -\frac{\Delta\Phi_T}{\Phi} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT}, \quad (3)$$

式中  $\Delta\Phi_T$  为温度  $T$  变化引起的光焦度变化量,  $\Phi$  为系统总光焦度,  $f$  为系统的有效焦距。

对于折射光学元件,采用薄透镜模型,透镜曲率半径为  $r_1$ 、 $r_2$ ,折射率为  $n$ ,空间环境的折射率为  $n_0$ ,则透镜的光焦度为

$$\Phi = \frac{1}{f} = (n - n_0) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (4)$$

透镜的折射率以及曲率半径随温度变化而变化,因此光焦度也将随温度的变化而变化,对温度求导,则有

$$\frac{d\Phi}{dT} = \left[ \frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right] \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n - n_0) \left[ -\frac{1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dT} + \frac{1}{r_2^2} \frac{dr_2}{dT} \right], \quad (5)$$

其中,  $\partial_g = \frac{dr_1}{r_1 dT} = \frac{dr_2}{r_2 dT}$  为光学元件的线膨胀系数。因此折射光学元件的光热膨胀系数表示为

$$x_{f,r} = \frac{d\Phi}{dT} = \partial_g - \frac{1}{n - n_0} \left( \frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right), \quad (6)$$

折射元件的温度特性是由材料的热膨胀系数和折射率温度系数决定的。

#### 3.3.2 衍射元件的温度特性

对于衍射光学元件<sup>[13]</sup>,它的焦距是由中心波长  $\lambda$  和环带半径所决定的,对应于第  $m$  个环带,其焦距为

$$f_m = \frac{n_0 r_m^2}{2m\lambda}. \quad (7)$$

当温度改变时,环带半径和空间折射率都会随温度变化而变化,环带半径和温度的关系表示为

$$r_m(T) = r_m(1 + \partial_g \Delta T). \quad (8)$$

因此,衍射光学元件的光热膨胀系数为

$$x_{f,d} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = 2\partial_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}, \quad (9)$$

衍射元件的温度特性只和材料的热膨胀系数有关。

根据(6)式和(9)式可知,折射元件的光热膨胀系数一般为负,而衍射元件的光热膨胀系数始终为正,这

就给折衍混合系统消热差提供了可行性。

## 4 夜视光学系统设计

### 4.1 夜视系统技术指标

设计了工作于  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  波段的折衍混合车载夜视系统,配合非制冷  $320\ \text{pixel}\times 240\ \text{pixel}$  的红外焦平面阵列探测器工作,像元尺寸为  $30\ \mu\text{m}$ 。系统设计的技术参数如表 1 所示,要求成像系统在空间频率  $15\ \text{lp/mm}$  处调制传递函数(MTF)大于  $60\%$ 。使用 Ge 和硫系玻璃  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  进行光学设计。由于车载镜头要求尺寸小、重量轻,因此两种材料的设计均采用三片式结构,并分析比较设计结果。

表 1 夜视系统结构参数

Table 1 Parameters of night vision system

Focal length /mm	Field of view /( $^{\circ}$ )	$F$ number	Spectrum range / $\mu\text{m}$	Temperature range / $^{\circ}\text{C}$
15	30	1	$8\sim 12$	$-30\sim 50$

### 4.2 像质分析

#### 4.2.1 全 Ge 系统

通过求解文献[14]中给出的消热差、消色差及光焦度方程,得到系统初始结构,用 Zemax 光学软件对其进行优化设计,并将第四面设计为非球面,第六面设为衍射面,系统结构如图 2 所示。图 3 为系统在空间频率  $15\ \text{lp/mm}$  处,  $0^{\circ}$  视场、 $0.7^{\circ}$  视场子午面和全视场子午面 MTF 值随温度变化的示意图,从图中可以看出,系统各视场 MTF 随温度变化较大,稳定性受温度影响严重。在  $-30\ ^{\circ}\text{C}\sim 50\ ^{\circ}\text{C}$  温度范围内,系统的最大离焦量为  $46.4\ \mu\text{m}$ ,大于系统焦深  $20\ \mu\text{m}$ 。

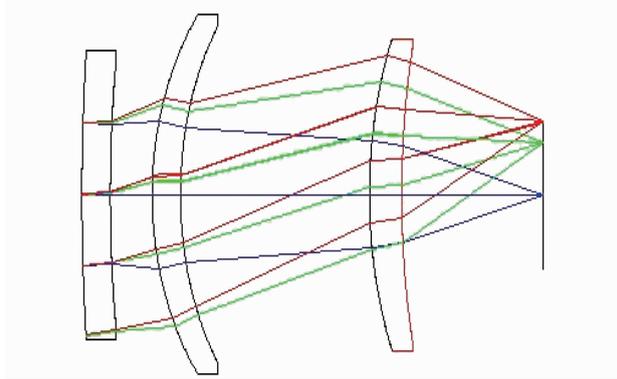


图 2 全 Ge 透镜折衍混合夜视系统

Fig. 2 Layout of the hybrid system with Ge lenses

另外,Ge 透镜用于非球面和衍射面时,需要采用单点金刚石车削工艺,如果考虑批量生产,则材料成本和加工成本较高,限制了红外夜视系统的发展。

#### 4.2.2 基于硫系玻璃的折衍混合系统

硫系玻璃的折射率温度系数较小,热稳定性较好,在较大温度范围内可以使系统有稳定的像质。因此,采用硫系玻璃对表 1 中的光学系统进行重新设计,系统包括三片透镜,全部采用硫系玻璃  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 。通过 Zemax 光学设计软件对初始结构进行像差分析以及优化,最终得到结构简单、布局合理、性能良好的光学系统,其结构如图 4 所示,其中第二片透镜后表面为非球面,第三片透镜后表面为衍射面,非球面面型采用全偶次非球面,衍射面采用旋转对称结构。在光学设计软件 Zemax 中,衍射元件的相位表达式为  $\phi(r) = m \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i}$ ,式中  $\rho$  为归一化半径, $A_1$  为二次相位系数,用于消色差; $A_2$ 、 $A_3$  等为非球面相位系数,用于校正高级像差,本设计中取前三个系数。衍射级次为 1,中心波长为  $10\ \mu\text{m}$ ,则硫系玻璃基底的最大浮雕深度为  $6.306\ \mu\text{m}$ 。衍射面的相位系数为  $A_1 = -4.842 \times 10^{-5}$ ,  $A_2 = 7.924 \times 10^{-10}$ ,  $A_3 = 2.0136 \times 10^{-13}$ 。

图 5 为系统在  $20\ ^{\circ}\text{C}$  时的调制传递函数。图 6 给出了不同温度下,系统在  $15\ \text{lp/mm}$  处各视场的 MTF

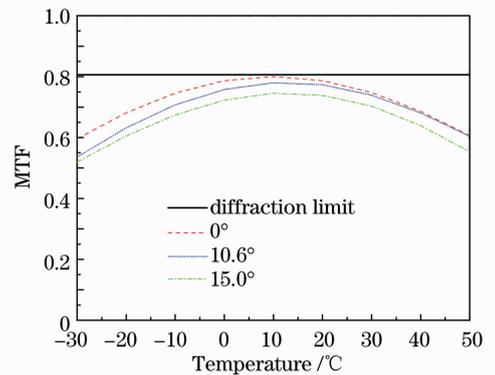


图 3 Ge 透镜系统在  $15\ \text{lp/mm}$  处各视场的 MTF 值

Fig. 3 MTF of the Ge lens system at  $15\ \text{lp/mm}$

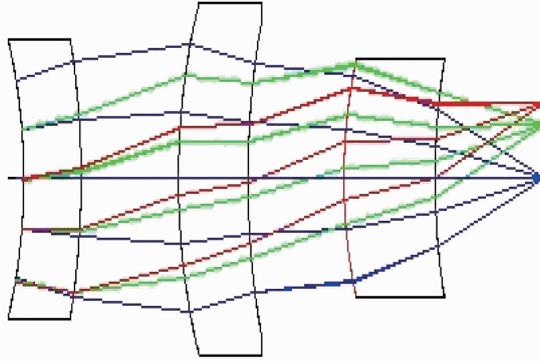
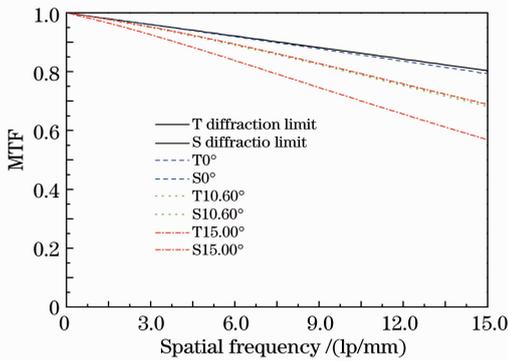
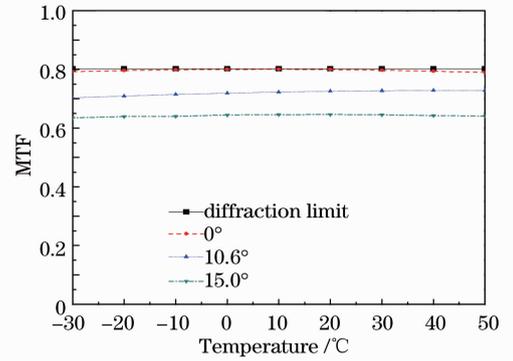
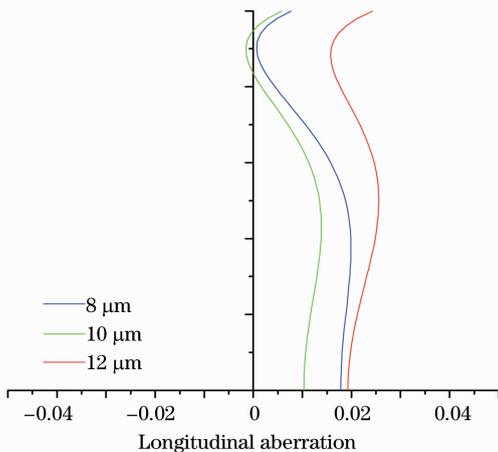
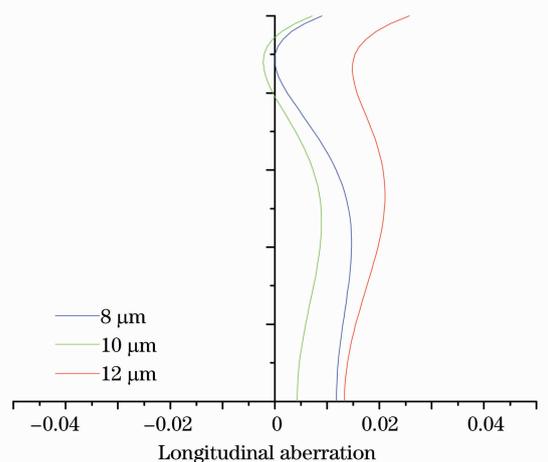


图 4 基于硫系玻璃的折衍混合夜视系统结构图

Fig. 4 Layout of the hybrid system based on chalcogenide glass

值,从图中可以看出,系统在各视场的 MTF 值均大于或接近 0.6,成像质量良好,满足光学系统在整个温度范围内的使用要求。 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时系统的有效焦距为  $15.0066\text{ mm}$ , $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时系统的有效焦距为  $14.9946\text{ mm}$ ,系统在此温度范围内最大的离焦量为  $6.6\text{ }\mu\text{m}$ ,而光学系统的焦深为  $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,系统在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内最大的离焦量远小于系统焦深,成像质量较好。

图 7 和图 8 给出了系统在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的轴向色差曲线,由图可知系统的轴向像差小于  $0.02\text{ mm}$ ,

图 5 折衍混合系统在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的调制传递函数Fig. 5 MTF of the hybrid system at  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 图 6 基于硫系玻璃的折衍混合系统在  $15\text{ lp/mm}$  处各视场的 MTF 值Fig. 6 MTF of the hybrid system based on chalcogenide glass at  $15\text{ lp/mm}$ 图 7 系统在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的轴向像差Fig. 7 Longitudinal aberration curves at  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 图 8 系统在  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的轴向像差Fig. 8 Longitudinal aberration curves at  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

具有较好的色差校正效果。图 9 为该系统衍射元件相位及周期同径向距离的关系,结果表明此衍射元件的最大环带数为 6,衍射面最边缘宽带的宽度为  $576\ \mu\text{m}$ ,完全可以利用单点金刚石车削工艺或模压工艺加工此衍射面。

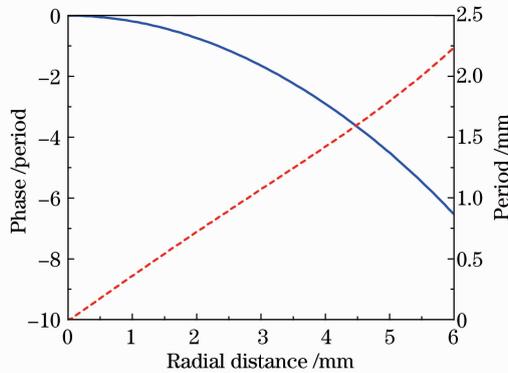


图 9 衍射元件相位、周期和径向距离的关系

Fig. 9 Dependence of phase and line frequency on radial distance

## 5 结 论

总结了市场上存在的几类夜视光学系统的优缺点。采用晶体 Ge 和硫系玻璃  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  分别设计了工作在  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  波段的夜视光学系统。该系统全视场角为  $30^\circ$ ,有效焦距为 15 mm, $F$  数为 1,在空间频率 15 lp/mm 处系统 MTF 大于 0.6。结果分析表明,Ge 系统在常温下各视场的 MTF 均接近衍射极限,但是当温度改变时,系统 MTF 下降较大,热稳定较差。硫系玻璃系统仅用三片透镜,引入一个二次非球面和一个衍射面,结构简单、体积小、重量轻,实现了在  $-30\ ^\circ\text{C}\sim 50\ ^\circ\text{C}$  温度范围内的消热差设计。在空间频率 15 lp/mm 处,系统各视场的 MTF 值均大于或接近 0.6。该系统具有较好的消色差和消热差能力,且衍射面的特征尺寸较大,易于加工制作。研究结果将为车载夜视光学系统低成本、小型化以及无热化设计提供技术支持。

## 参 考 文 献

- 1 Lin Shufen. Research on Active Infrared Laser Night Vision Imaging System on Cars [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.  
林淑芬. 车载主动式红外激光夜视成像系统的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- 2 Yan Jun. The Research of on Board Infrared Night View System Based on Active Safe [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.  
颜 俊. 基于汽车主动安全的车载红外夜视系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- 3 Luo Shoujun, Huang Fuyuan, Zhan Daojiao, *et al.*. Development of chalcogenide glasses for infrared thermal imaging system [J]. Laser and Infrared, 2010, 40(1): 9–13.  
骆守俊, 黄富元, 詹道教, 等. 硫系玻璃在红外成像系统应用进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 9–13.
- 4 Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, *et al.*. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 847–852.  
戴世勋, 陈惠广, 李茂中, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 847–852.
- 5 Gao Hongyun, Chen Mengwei, Yang Yingping, *et al.*. Novel long wavelength infrared diffractive/refractive athermal optical system [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(12): 2143–2146.  
郜洪云, 陈梦苇, 杨应平, 等. 新型长波红外折衍混合消热差系统[J]. 光子学报, 2010, 39(12): 2143–2146.
- 6 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low  $F$ -number compact athermalizing infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322003.  
曲贺盟, 张 新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003.
- 7 Wang Yuanfangzhou, Shi Xiaoguang, Bai Yuzhuo, *et al.*. Statuses and trends on night vision enhancement systems [J]. Infrared Technology, 2012, 34(8): 490–495.

- 王远方舟, 石晓光, 白玉琢, 等. 民用车载视觉增强系统发展现状[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 490—495.
- 8 X H Zhang, Y Guimond, Y Bellec. Production of complex chalcogenide glass optics by molding for thermal imaging [J]. J Non-Cryst Solids, 2003, 326-327: 519—523.
- 9 Shi Guangwei, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Application of the new chalcogenide glass in design of low cost thermal imaging systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 615—619.
- 史广维, 张新, 王灵杰, 等. 新型硫系玻璃在低成本热成像系统设计中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 615—619.
- 10 Du Hwan Cha, Hye-Jeong Kim, Yeon Hwang, *et al.*. Fabrication of molded chalcogenide glass lens for thermal imaging applications [J]. Appl Opt, 2012, 51(23): 5649—5656.
- 11 Bai Yuzhuo, Ma Lin, Wang Yuanfangzhou, *et al.*. A design of single IR mid-wave athermal optical system [J]. Infrared Technology, 2011, 33(11): 646—650.
- 白玉琢, 马琳, 王远方舟, 等. 单片式红外中波温度自适应光学系统设计[J]. 红外技术, 2011, 33(11): 646—650.
- 12 Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1392—1395.
- 郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1392—1395.
- 13 Liu Ying, Liu Jianzhuo, Li Chun, *et al.*. Athermal optical design of refractive/diffractive staring infrared earth sensor system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722001.
- 刘英, 刘建卓, 李淳, 等. 折/衍混合凝视型红外地平仪系统的无热化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722001.
- 14 Zhang Xinting, An Zhiyong. Design of infrared athermal optical system for dual-band with double-layer harmonic diffraction element [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622004.
- 张欣婷, 安志勇. 双层谐衍射双波段红外消热差光学系统[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622004.