

大口径硫系玻璃内部缺陷检测物镜设计及实验验证

姜波¹, 吴越豪¹, 戴世勋¹, 聂秋华¹, 张勤远², 木锐³

1. 宁波大学 高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;
2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641;
3. 云南北方驰宏光电有限公司, 云南 昆明 650000

摘要: 大口径硫系玻璃在军事及民用高分辨率红外夜视成像领域有着重要的应用价值。现阶段缺少针对大口径硫系玻璃内部缺陷(包括条纹、杂质和裂纹等)进行量化评价的检测技术, 因此硫系玻璃的品质控制成为了限制其大范围发展的瓶颈之一。针对课题组大口径硫系玻璃的透射光谱特性以及现有的近红外照相机的光谱响应特性, 提出了一种工作在近红外波段的大口径硫系玻璃内部缺陷检测技术并设计成像镜头, 镜头包含了使用 K9、F6 玻璃的三片双胶合透镜, 有效焦距为 200 mm, 在近红外波段 0.95~1.05 μm 实现消色差, 成像质量接近衍射极限。根据镜头特点搭建了大口径硫系玻璃内部缺陷测试装置, 实验验证了镜头的分辨率与设计要求相符, 并可针对大口径硫系玻璃的各种内部缺陷进行有效检测。

关键词: 大口径硫系玻璃; 光学设计; 内部缺陷; 近红外成像

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0718002

Optical design of inspection lens for internal defect of large-diameter chalcogenide glasses and experimental verification

Jiang Bo¹, Wu Yuehao¹, Dai Shixun¹, Nie Qiu Hua¹, Zhang Qinyuan², Mu Rui³

1. Laboratory of Infrared Materials and Devices, The Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
3. KIRO-CH Photonics Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: Large diameter chalcogenide glasses play an important role in developing high resolution infrared imaging systems for various military and civil applications. However, it lacks an effective measure for inspecting the internal artifacts (including non-uniformity of refractive indices, impurities, and cracks) of bulk chalcogenide glasses and thus the application of such glasses was limited. A near infrared lens was developed for inspecting the internal artifacts of large diameter chalcogenide glasses. Considering the spectral characteristics of the chalcogenide glasses and a currently available infrared camera, the

收稿日期: 2015-11-17; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 国家科技部重大国际合作项目(2011DFA12040); 浙江省自然科学基金(LQ15F050002);

发光材料与器件国家重点实验室开放基金(2014-skllmd-01); 浙江省重中之重学科开放基金(XKXL1320, XKL141039); 宁波市自然科学基金(2014A610125)

作者简介: 姜波(1990-), 男, 硕士生, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。Email: nbu_jiangbo@163.com

导师简介: 吴越豪(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事硫系玻璃光学设计、硫系玻璃光器件方面的研究。Email: wuyuehao@nbu.edu.cn

performance of the lens was optimized for the spectral band of 0.95–1.05 μm . A group of three achromatic doublets was utilized to eliminate the chromatic aberration and realize an imaging performance that is close to a diffraction-limited system. Off-the-shelf glasses of K9 and F6 were used in this design. The proposed lens was tested in experimental settings for inspecting internal artifacts of chalcogenide glasses. According to the experimental results, the resolution of the proposed lens matches the design parameters well and many kinds of internal artifacts of chalcogenide glasses, including non-uniformity of refractive indices, impurities, and cracks, are clearly observed in images captured by the proposed lens.

Key words: large diameter chalcogenide glass; optical design; internal artifacts; near infrared imaging

0 引言

硫系玻璃是一种以元素周期表 VIA 族元素 S、Se、Te 为主并引入一定量的其他金属元素形成的玻璃。它具有较小的折射率温度系数,可用于消色差红外系统的设计;具有较低的折射率,其色散特性类似硒化锌等材料,可用于红外系统消色差;较锗、硒化锌等晶体材料,硫系玻璃加工工艺简单,可应用精密模压技术制备高精度透镜。近几年随着硫系玻璃红外成像在车载夜视、监控安防等民用领域的普及和焦平面非制冷探测器成本的降低,硫系玻璃有望成为降低红外光学系统成本的优良候选材料^[1-5]。

硫系玻璃具有从近红外延伸至长波红外的透过光谱,该材料在可见光波段透过率较低的特点使得其无法在可见光波段进行内部缺陷(裂纹、杂质、空洞和条纹等)的精确检测。现阶段,国内外主要通过研制配套的红外波段透射成像系统对红外材料进行内部缺陷检测。例如 AMI 硫系玻璃内部缺陷检测装置^[6]和硫系玻璃非均匀性检测装置^[7]。AMI 硫系玻璃内部缺陷检测装置使用反射镜设计了透射式系统,其大口径硫系玻璃检测虽可满足,但整套系统搭建复杂、难以调试且系统成像渐晕较大,无法清晰分析整块硫系玻璃内部缺陷结构;宋宝安等^[7]的硫系玻璃内部缺陷检测装置,整套系统的搭建较反射镜系统有了明显的简化,但由于成像物镜的限制,无法一次性清晰检测口径大于 100 mm 的硫系玻璃内部缺陷。

文中主要针对性能优良且加工工艺成熟的硒基硫系玻璃,使用透射成像技术完成材料内部缺陷的

检测,实验装置成像系统搭载自行设计的大口径高倍率消色差物镜。近红外透射成像系统选用价格低廉的玻璃材料来实现消色差光学设计要求。通过分析硒基硫系玻璃透过光谱、实验室现有光源、探测器阵列光谱响应曲线和物高、像高等几何光学参数,进而提出透射成像的最佳方案。设计了一款基于三片双胶合透镜的消色差、大光学倍率的镜头。该系统使用了市面常用 K9、F6 玻璃进行设计,镜头成本及制备工艺成本得到了有效控制。实验结果表明,物镜很好地匹配硫系玻璃内部缺陷透射装置,实现了对抛光圆柱型大口径硫系玻璃内部结构清晰透射成像,整套系统搭建简单,成像无渐晕,能更简单明了地分析玻璃内部裂纹、杂质、空洞和条纹等缺陷。

1 设计思路

1.1 硫系玻璃内部缺陷测试装置

透射检测装置示意图如图 1 所示。图中,1 是卤素灯,2 是扩束准直镜,3 是测试样品架,4 是物镜,5 是三维移动平台探测系统,6、7 分别是光源亮度调节器和图像采集处理器。其中光源亮度调节器与卤素灯相连接,用于调节光源的亮度,图像采集处理器与探测系统连接。卤素灯选用能够发射光谱功率为 20 W 的近红外光源,它发出的光经过平行光管之后变成平行光。物镜、探测器、卤素灯同轴设置。目前,高分辨率的碲镉汞、氧化钒、铟镓砷等陈列探测器价格不菲,设计中选用了实验室现有一款能够响应近红外波段的 Contour-IR 照相机作为成像探测模块。为了完全匹配整个装置透射成像的质量和性能,设计了大口径高倍率消色差近红外成像物镜。

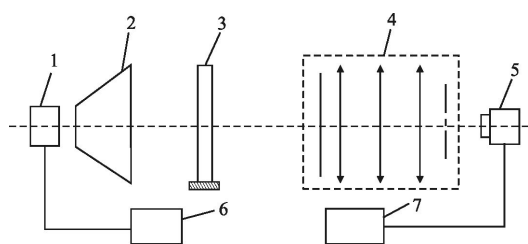


图 1 硫系玻璃内部缺陷实验装置

Fig.1 Experiment platform of chalcogenide glass internal defects

1.2 物镜设计

针对现阶段市场近红外成像物镜口径小、消像差不足的瓶颈,设计匹配 Contour-IR 相机探测器的近红外成像物镜。

1.2.1 主波长选择

透射成像系统既应满足待测玻璃样品的透过光谱,又要满足 Contour-IR 相机探测器的响应波长,相机探测器主要参数如表 1 所示。

表 1 Contour-IR 相机主要参数

Tab.1 Main parameters of Contour-IR

Parameters	Value
Spectral range/nm	400~1 700
Focal plan array resolution/pixel	1 280×1 024
Pixel size/ μm	5.2×5.2

目前,常见的硫系玻璃主要为美国 Amorphous Materials 公司的 AMTIR 系列、德国 Schott 公司的 IRG 系列和法国 Umicore 红外玻璃的 GASIR 系列。国内硫系玻璃生产单位有宁波大学、宁波舜宇红外科技、上海硅酸盐研究所、华东理工大学等^[8]。表 2 中列出三家商业公司的几种常用硫系玻璃牌号和组分,可以看出,硒基硫系玻璃是现有商用最成熟的硫系玻璃。由此,针对硒基硫系玻璃进行消色差物镜的设计。

表 2 几种常用的硫系玻璃

Tab.2 Some common chalcogenide glasses

	AMI	Schott	Umicore
$\text{Ge}_{30}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$	AMTIR-1	IRG22	
$\text{Ge}_{30}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{52}\text{Te}_{25}$		IRG23	
$\text{Ge}_{10}\text{As}_{40}\text{Se}_{50}$		IRG24	
$\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$	AMTIR-3	IRG25	
$\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$			GASIR1
$\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$			GASIR2
$\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$	AMTIR-2	IRG26	
$\text{As}_{40}\text{S}_{60}$	AMTIR-6		

消色差物镜系统主波长由相机探测器响应曲线和硒基硫系玻璃透过带宽共同决定。图 2 所示为 400~1 700 nm 波段时,Contour-IR 相机探测器光谱灵敏度响应曲线和硒基硫系玻璃透过率曲线。

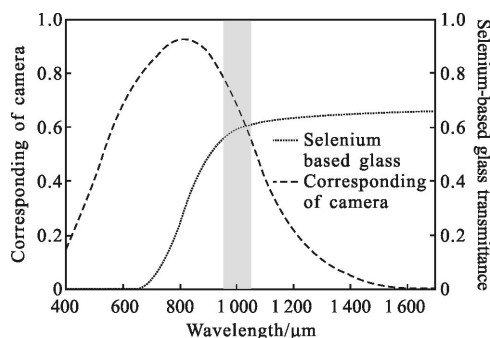


图 2 硫系玻璃透过率和相机响应光谱灵敏度

Fig.2 Chalcogenide glass transmittance and camera spectral sensitivity corresponding

由图 2 可知,硒基硫系玻璃的最低透光波长约为 700 nm,相机探测器最大响应波长约为 800 nm。在波长小于 1 000 nm 时,玻璃透过率较低,波长不满足条件;当波长提高到 1 000 nm 时,玻璃透过率大于 60%,探测器的响应灵敏度约为 0.6,该波长满足条件;波长继续变大,当大于 1 000 nm 时,玻璃透过率变化不大,探测器的灵敏度急剧下降,波长不满足条件。所以,最终选择 1 μm 为物镜系统消色差设计的主波长。

1.2.2 物镜光学参数确定

观察大口径的硫系玻璃内部缺陷,若满足了硫系玻璃内部透射清晰成像,还应满足成像玻璃物像直径小于探测器 CCD 的最小宽度值。镜头加工过程中难免产生误差,因此,透射成像保留一定的空间余量。其效果图如图 3 所示。

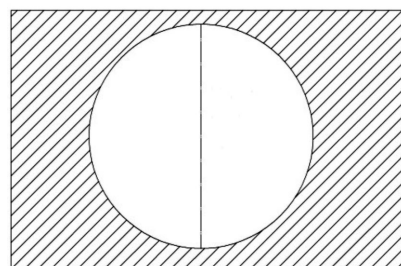


图 3 硫系玻璃透射成像效果图

Fig.3 Chalcogenide glass fluoroscopic imaging renderings

计算 Contour-IR 相机参数得探测器最小宽度值为 5.3 mm。全视场范围内观察整块硫系玻璃透射成像,确定像高区间为 4.4 ± 0.2 mm,留有 0.9 ± 0.2 mm 的余量以避免镜头加工误差。若像高大小确定,则必须对直径 110 mm 硫系玻璃成像缩小 25 倍以保证满足条件。物镜参数的确定还包括系统的物距和焦距。系统物距很大,则系统搭建复杂,不利于系统装调;系统焦距太小,则物镜设计复杂,消色差困难^[9-10]。最终确定设计物镜焦距为 200 mm,物距为 5000 mm。

1.2.3 透射成像分辨率估算

探测器像方线视场为 8.52 mm,如图 4 所示,当物距 $u=5000$ mm、半像高 $y'=2.2$ mm、样品半径 $y=55$ mm 时,由物像高度关系式 $y \cdot v = y' \cdot u$ 得像距 $v=200$ mm,即物镜焦距 $f=200$ mm。两个像素分辨一个物点,即两个像素点大小为 $10.4 \mu\text{m}$,可以计算得到该物镜能分辨的物点大小为 $260 \mu\text{m}$ 。这一条件足以清晰分辨硫系玻璃内部缺陷,满足设计要求。

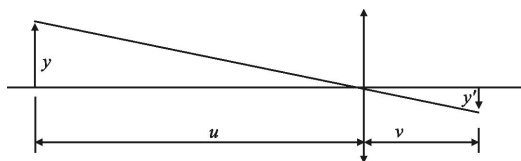


图 4 成像光路示意图

Fig.4 Schematic of imaging optical path

2 物镜光学系统设计

2.1 主要技术指标

为了达到消色差的目的,确定物镜成像系统为简单双粘合聚焦型结构。粘合镜片采用多片分离式设计以更好地消像差。明确主波长和系统物镜缩小率,最终确定物镜的主要设计技术指标如表 3 所示。

表 3 物镜系统设计参数

Tab.3 Design parameters of lens system

Parameters	Value
Effective focal length/mm	200
Work wavelength/ μm	0.95-1.05
Working length/mm	$50 \leq x \leq 100$
Lens number	3

2.2 成像系统设计

选择 K9 和 F6 材料,最终设计了三分离式聚焦

消色差物镜如图 5 所示。该系统依次设置光阑、第 1~3 镜片和带通滤光片,第 1~3 镜片均为正光焦度的粘合镜片,三镜片均由一凸透镜和一平凹透镜粘合而成。

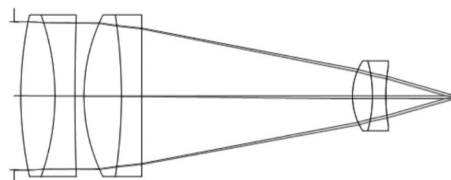


图 5 光学系统结构图

Fig.5 Structure diagram of optical system

2.3 光学系统像质评价

根据探测器的规格,如图 6 所示,该物镜在衍射极限 96 lp/mm 时的 MTF 值大于 0.5,完全满足探测器最高分辨率时的成像要求。

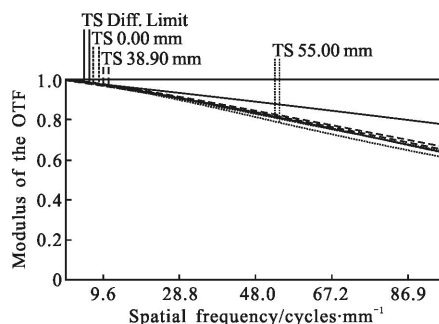


图 6 光学系统 MTF 图

Fig.6 MTF diagram of optical system

物镜系统在 $0.95\sim 1.05 \mu\text{m}$ 的倍率色差曲线如图 7 所示。由图可知,系统最大倍率色差为 $0.5 \mu\text{m}$,远小于艾里斑的大小,物镜系统消色差性能良好。

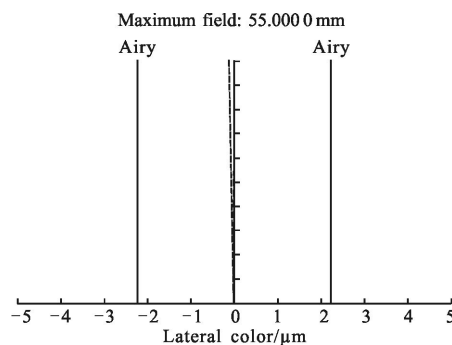


图 7 倍率色差图

Fig.7 Lateral color diagram

图 8 所示为物镜系统各三视场时的点列图。由图可知,系统在半物高为 0、35.35 mm 和 50 mm 时的弥散斑半径分别为 1.881 μm 、2.081 μm 和 2.464 μm , 匹配探测器的最小像元,满足设计条件。

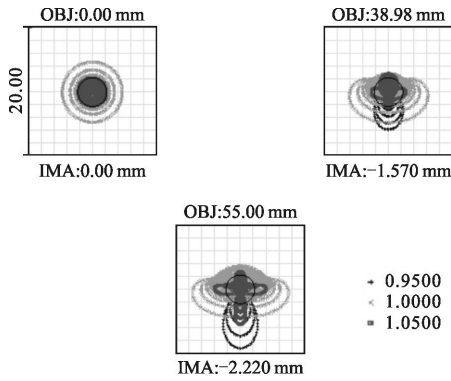


图 8 点列图

Fig.8 Spot diagram

探测大口径物体的透射成像,分析物镜系统的球差是非常必要的。图 9 所示为系统的轴上球差图,可以看出,系统最大球差小于 0.025 μm ,可以满足设计要求。

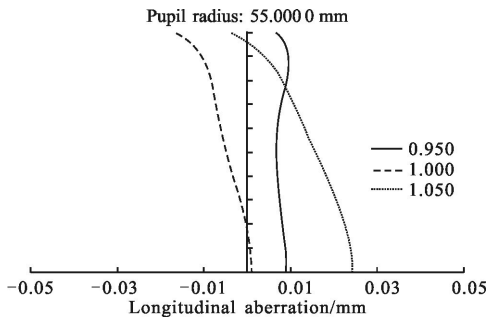


图 9 球差图

Fig.9 Longitudinal aberration diagram

3 光学系统平台实验与结果分析

3.1 物镜样机与性能测试

采用 C 接口连接 Contour-IR 探测器,物镜实物如图 10 所示。图 11 为镜头、显示器测试平台图。图 12 为平台线对测试成像。由结果可以看出,物镜可分辨测试结果数字 4 的区域两线对线条,该分辨率下每个线条为 0.25 mm,可完全满足硫系玻璃内部宏观缺陷的检测。



图 10 物镜样机实物图

Fig.10 Image of fabricated objective lens

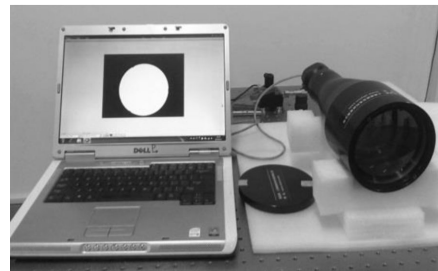


图 11 测试平台

Fig.11 Photo of test platform

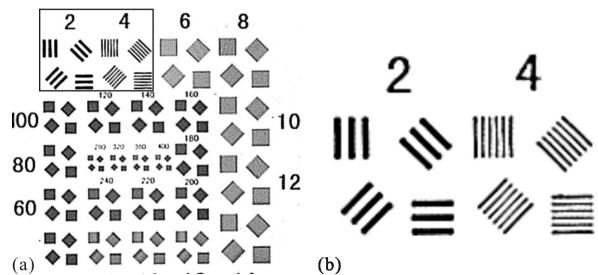


图 12 物镜样机的线对目标物测试成像

Fig.12 Test images of a line-pair target captured by the fabricated objective lens

3.2 不同口径硫系玻璃检测

图 13 所示为 30 mm、50 mm 和 110 mm 口径硫系玻璃实物图。该系统检测方法如下,以上述三块不同口径硫系玻璃分别按照以下步骤测试。

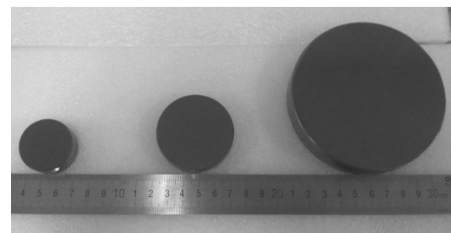


图 13 口径分别为 30 mm、50 mm 和 110 mm 硫系玻璃

Fig.13 Chalcogenide glasses with diameters of 30 mm, 50 mm and 110 mm

(1) 调节光源、扩束准直镜、测试样品架、物镜、

探测系统的相对位置,使它们同轴而且等高;

(2) 调节光源亮度调节器,使光强落在红外探测器的线性响应范围内;

(3) 将待测硫系玻璃样品放置在扩束准直镜和物镜之间的测试样品架上,再次调节光源亮度调节器,直至光强亮度能够满足硫系玻璃成像;

(4) 通过控制三维移动平台微调红外探测器上下左右移动,在图像采集处理器上获得样品在像面焦点处清晰成像。图 14~16 为厚度 10 mm、口径分别为 30 mm、50 mm 和 110 mm 的抛光圆柱形硫系玻璃样品通过上述检测装置测得的像,从图上可清晰观察抛光圆柱形硫系玻璃的内部特征。

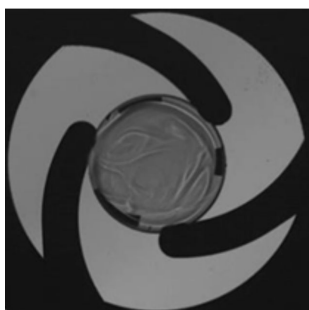


图 14 口径为 30 mm 的硫系玻璃成像图

Fig.14 Image of a chalcogenide glass with a diameter of 30 mm

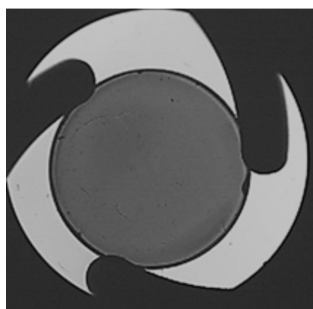


图 15 口径为 50 mm 的硫系玻璃成像图

Fig.15 Image of a chalcogenide glass with a diameter of 50 mm

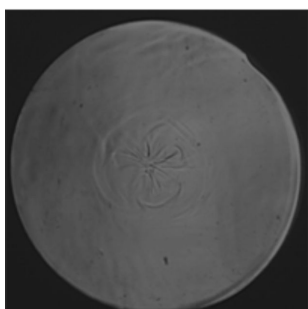


图 16 口径为 110 mm 的硫系玻璃成像图

Fig.16 Image of a chalcogenide glass with a diameter of 110 mm

3.3 硫系玻璃内部缺陷检测

检测了不同制备工艺下得到的口径为 110 mm 的硫系玻璃近红外透射成像。如图 17~20 所示,系统可清洗观察玻璃内部缺陷,主要包括裂纹(图 17)、杂质(图 18)、空洞(图 19)和条纹(图 20)等。这些缺陷主要是由于玻璃溶制工程中工艺参数(包括溶制温度、摇摆角度、出炉冷却方式等)的差异而造成的。通过优化玻璃的溶制工艺参数、出炉温度和冷却速率等,能有效地消除硫系玻璃内部缺陷,获得内部条纹少、光学均匀性好的硫系玻璃。

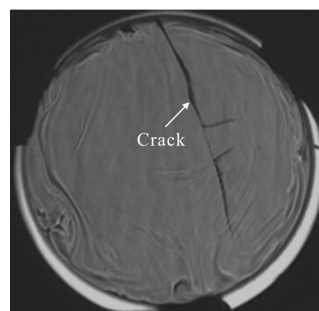


图 17 具有内部裂纹缺陷的硫系玻璃成像图

Fig.17 Image of a chalcogenide glass with internal artifacts of cracks

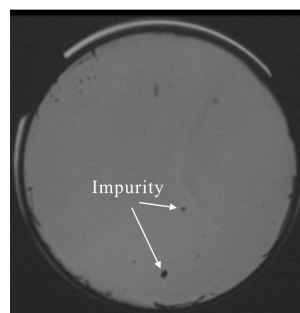


图 18 具有内部杂质缺陷的硫系玻璃成像图

Fig.18 Image of a chalcogenide glass imaging with internal artifacts of material impurities

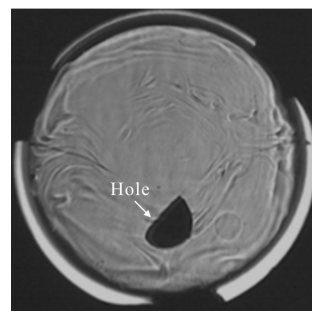


图 19 具有内部空洞缺陷的硫系玻璃成像

Fig.19 Image of a chalcogenide glass imaging with internal artifacts of holes

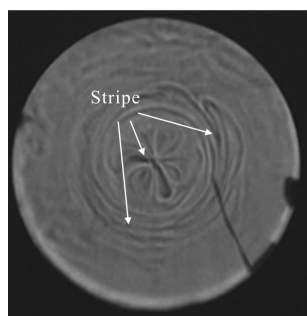


图 20 具有内部条纹缺陷的硫系玻璃成像图

Fig.20 Image of a chalcogenide glass imaging with internal artifacts of stripe

4 结 论

介绍了一种基于光学透视成像原理的硫系玻璃内部缺陷检测装置。该检测装置针对抛光圆柱型硫系玻璃进行透射成像，成像消色差物镜设计主波长为 $1\ \mu\text{m}$ ，焦距为 200 mm。通过实验验证，该透射检测技术能够很好地清晰透射硫系玻璃材料的裂纹、杂质、空洞和条纹等内部缺陷，而且对于口径为 110 mm 的圆柱型硫系玻璃，其透射成像大小也能完全匹配探测器，且无渐晕、色差现象。实验结果表明，该探测技术很好地解决了大口径硫系玻璃内部缺陷检测的难题。

参考文献：

[1] 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. (in Chinese)
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 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.

[2] 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. (in Chinese)
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.

[3] Chen Guorong, Zhang Xianghua. Development of fine molded chalcogenide glasses for IR night version[J]. *Bulletin*

of the Chinese Ceramic Society, 2004, 23 (1): 3-7. (in Chinese)
陈国荣, 章向华. 红外夜视仪用精密模压硫系玻璃研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2004, 23(1): 3-7.

[4] Jiang Bo, Wu Yuehao, Dai Shixun, et al. Application of chalcogenide glasses in designing a vehicle-mounted infrared imaging lens for civilian applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1739-1745. (in Chinese)
姜波, 吴越豪, 戴世勋, 等. 硫系玻璃在民用红外车载成像系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1739-1745.

[5] Lu Yajing, Song Baoan, Xu Tiefeng, et al. Design of refractive-diffractive night vision system based on chalcogenide glass [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 122204. (in Chinese)
芦雅静, 宋宝安, 徐铁峰, 等. 基于硫系玻璃的汽车夜视折衍光学系统[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 122204.

[6] Hilton A. Chalcogenide Glasses for Infrared Optics[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 2010: 114-118.

[7] Song Baoan, Wang Qiaofang, Zhang Yingzhao, et al. Optical inhomogeneity of IR Se-based chalcogenide glasses and influencing factor analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 1985-1989. (in Chinese)
宋宝安, 王乔方, 张莹昭, 等. 红外硒基硫系玻璃光学非均匀性及影响因素分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 1985-1989.

[8] Fu qiang, Zhang Xin. Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1467-1471. (in Chinese)
付强, 张新. 基于硫系玻璃的中波红外光学系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1467-1471.

[9] Huang Lei, Xin Liping, Han Xuhui, et al. Auto-focusing of wide-angle astronomical telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 174-183. (in Chinese)
黄垒, 辛立平, 韩旭辉, 等. 广角天文望远镜的自动调焦 [J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 174-183.

[10] Wang Hong. Optical system or ultraviolet warning camera with widefield of view and large relative aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3212-3216. (in Chinese)
王红. 大相对口径大视场紫外告警相机光学系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3212-3216.