

红外硫系玻璃内部宏观缺陷透视成像检测系统

吴礼刚^{1,2} 李祖盼² 王训四² 沈 祥² 宋宝安² 戴世勋² 徐铁峰²

(¹ 宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315216; ² 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要 红外硫系玻璃透射率高, 光谱范围宽, 可广泛应用于红外热像仪等光学系统, 然而红外玻璃在熔制过程中容易因组分不均匀造成各种内部缺陷, 影响成像质量。利用透视成像的原理, 在分辨力估算的基础上, 设计了一种可检测玻璃内部宏观缺陷的系统。这种系统光源功率可调, 可以检测厚度和直径都在几毫米到几十毫米范围内的红外硫系玻璃, 在 300 mm 成像距离条件下分辨尺寸达到 0.19 mm, 并且可对长度 63.4 mm 的物体成满像。通过 Sobel 算子进行玻璃内部条纹边缘提取, 可以获得更加清晰的条纹特征。

关键词 探测器; 红外硫系玻璃; 透视成像; 内部宏观缺陷; 边缘检测

中图分类号 TN247; TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0108001

Internal Macroscopic Defects Perspective Imaging Detection System for Infrared Chalcogenide Glasses

Wu Ligang^{1,2} Li Zupan² Wang Xunsi² Shen Xiang² Song Baoan² Dai Shixun² Xu Tiefeng²

(¹ Electronic and Information Engineering College, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China)
² College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract Chalcogenide glasses are widely used in optical systems of thermal imagers for its high transmission and broad spectral band width. However, internal defects brought by composition's disproportion of glasses during the melting and solidification can affect the imaging performance. A detection system of internal macroscopic defects is introduced by using the principle of perspective imaging based on resolution estimate. The optical power of system is adjustable, which can detect the thickness and diameter of glass samples within several millimeters to dozens of millimeters. It's resolution can reach 0.19 mm at the distance of 300 mm, and it can make a full image of an object at 63.4 mm. The distinct stripes inside the glasses are obtained by glass edge extraction of internal stripe through Sobel operator.

Key words detectors; infrared chalcogenide glasses; perspective imaging; internal macroscopic defects; edge detection

OCIS codes 110.2970; 120.4820; 120.4630; 160.2750

1 引 言

红外硫系玻璃具有良好的红外光学性能, 如透射光谱范围宽(如硒基硫系玻璃透射光谱范围为 0.9~16 μm), 折射率与锗单晶相差较大易与锗镜片构成消色差透镜组, 可精密模压成型, 玻璃组分易调节等优点, 因此在军事、民用方面的应用范围越来越广泛^[1~6]。对红外玻璃材料的质量要求也日益提高, 如何准确检测出玻璃内部条纹、裂纹、析晶、分相、气泡等宏观缺陷对于玻璃质量控制和生产工艺改进显得尤为重要。一般来说宏观缺陷主要是由玻

璃熔制工艺中玻璃液化学组分的不均匀性, 以及凝固成形过程中引起的热不均匀性造成的。

目前玻璃内部缺陷常采用光学干涉检测方法^[7~10], 其装置显得比较复杂, 而且玻璃窗口的污染、实验系统的振动、光学仪器的缺陷以及照明光源亮度的不均匀等都会引入噪声, 操作也不方便。而红外玻璃工作在近红外至中远红外波段, 波长较长, 用于红外成像则允许红外波长限度的非均匀性存在, 因此对于玻璃内部宏观缺陷检测若采用精度极高的干涉测量法并不十分适宜。本文利用透视成像原理, 设计了一种红外硫系玻璃内部缺陷检测系统。

收稿日期: 2011-04-26; **收到修改稿日期**: 2011-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(60878042, 60978058, 60908032)、浙江省杰出青年基金(R1101263)、浙江省公益性技术应用研究计划项目(2010C31087)、宁波市科技创新团队项目(2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

作者简介: 吴礼刚(1976—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电检测及光电器件封装方面的研究。E-mail: wg21c@sina.com

2 系统原理及结构

典型的红外硫系玻璃透射光谱如图 1 所示,为测试玻璃内部缺陷,采用透视成像的方法,这就要求检测系统的工作波段必须选在透射光谱范围内。目前高分辨率的碲镉汞、氧化钒、钢镓砷等陈列探测器价格不菲,设计中选用了一种能够响应近红外波段的 Contour IR 照相机作为成像探测模块,价格相对低廉。照相机探测器响应光谱如图 2 所示,考虑到探测器在 $0.9 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 相对响应率较低 ($0.05 \sim 0.4$),故设计中结合红外玻璃的吸收特性和厚度尺寸,选用较大功率的近红外光源来弥补探测器响应率的不足。

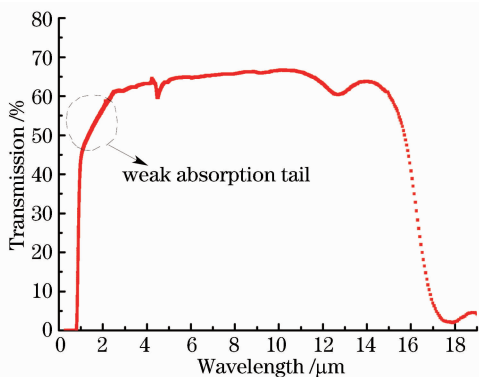


图 1 典型的硒基红外硫系玻璃透射光谱
Fig. 1 Typical transmission spectrum of chalcogenide glass

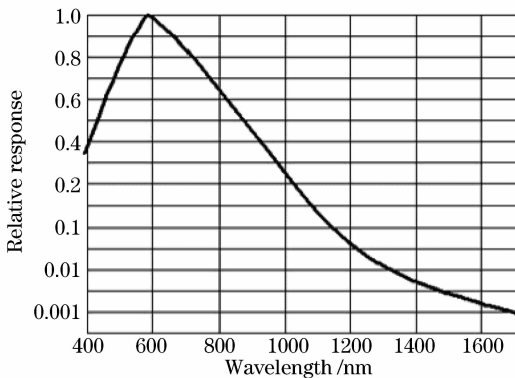


图 2 探测器响应光谱

Fig. 2 Response spectrum of detector

选定近红外照相机之后,设计如图 3 所示的玻璃内部缺陷检测系统。经过多次实验,最终选用能够发射近红外光谱功率为 20 W 的卤素灯作为近红外光源,卤素灯发出的光经过平行光管之后变成平行光,然后穿过玻璃样品,通过光轴上的 Contour IR 相机成像,最后探测到的图像信号由计算机进行处理。因为被测玻璃样品厚度一般在几毫米到几十毫米,玻璃的透射衰减差异很大,所以到达 Contour

IR 探测器上的光强信号差别也很大。为了防止探测器因信号过强而饱和,或者因信号太弱而严重降低图像对比度,可通过卤素灯的电功率调节,或者在玻璃样品前后加上起偏器和检偏器,使得到达探测器的信号强度调整到一个合适的范围内。

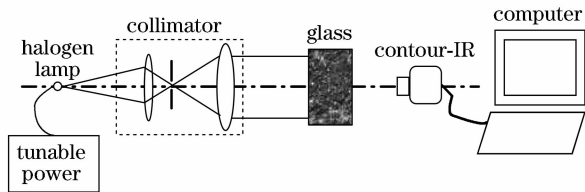


图 3 检测系统原理结构

Fig. 3 Schematic of detection system

玻璃中,因材料密度和组成物质引起的折射率或极化率的波动引起的瑞利散射,以及由微晶、气泡、不均匀性及不溶物颗粒缺陷杂质所产生的非本征散射对透射光波产生的衰减较大。除此之外,硫系玻璃中存在由玻璃内部杂质与结构缺陷所引起的弱吸收拖尾远高于瑞利散射的损耗吸收^[11]。弱吸收拖尾如图 1 所示,弱吸收拖尾的吸收系数经验公式为^[12]

$$\alpha_t = A_t \exp(B_t/\lambda), \quad (1)$$

式中 A_t 为与玻璃基底吸收有关的常数,通常在 $5 \sim 10^5$ dB/km 范围内变化, B_t 为与玻璃内部缺陷有关的常数,在 $0.8 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内为常数, λ 为波长。由 (1) 式的指数关系可知即使 B_t 很小,弱吸收拖尾也将在整个近红外波段引起比较显著的吸收,且其吸收系数对波长较敏感。图 1 显示在近红外波段典型的硫系玻璃有一个明显的弱吸收拖尾,因为其吸收效果显著,故一定厚度的玻璃样品对该波段吸收造成的图像灰度对比将更为明显。相比其他波段,选用近红外波段将使玻璃内部杂质及结构缺陷图像锐度和对比度明显改善。

3 分辨力估算

相机 Contour-IR 主要性能参数如表 1 所示。

表 1 Contour IR 相机主要参数

Table 1 Main parameters of Contour IR

Spectral range / nm	400~1700
Focus / mm	F1.4/26
Field of view / (°)	25
Detector	1/3" CMOS
Focal plan array resolution / pixel	782×582
Signal noise ratio / dB	48
Interface	USB

根据探测器 $1/3''$, 可知探测器像面尺寸为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$, 像方线视场为 6 mm 。因为像素规模为 $782 \text{ pixel} \times 582 \text{ pixel}$, 所以每个光敏元尺寸为 $6.4 \mu\text{m} \times 6.2 \mu\text{m}$ 。根据图 4 所示, 知道当物距 $u = 300 \text{ mm}$ 时, 物距远大于镜头焦距 26 mm , 由高斯公式算出像距 $v = 28.4672 \text{ mm}$ 。又由物像高度关系公式

$$\frac{y}{u} = \frac{y'}{v} \quad (2)$$

知道如果按照 4 个像素 ($2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$) 分辨一个目标的话, 则有 $y' = 17.8 \mu\text{m}$, 进而求得 $y = 0.19 \text{ mm}$, 即相机可以分辨 300 mm 处 0.19 mm 的目标。这满足红外玻璃内部宏观缺陷成像的分辨力要求。

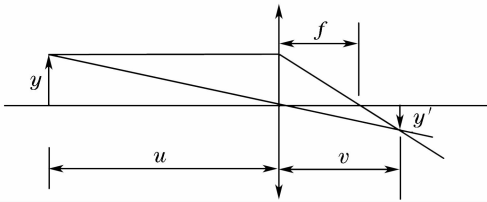


图 4 成像光路示意图

Fig. 4 Diagram of light path

设 300 mm 处尺寸为 Φ 的目标成满像, 则根据像方线视场可计算得出 $\Phi = 2y = 63.4 \text{ mm}$, 即 300 mm 处直径小于 63.4 mm 的玻璃样品内部缺陷都可以被相机完整拍摄下来。将钢板标尺平放在镜头前 300 mm 处, 可获得如图 5 所示的标尺成像图, 可以看出系统对长度 63.3 mm (刻度大约在 $59.5 \sim 122.8 \text{ mm}$ 之间) 的部分标尺成满像。因此实验结果与计算值非常吻合。

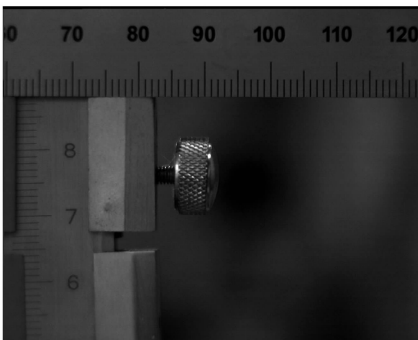


图 5 检测系统视场

Fig. 5 Field view of detection system

为了从轴向拍摄完整的红外玻璃样品的内部缺陷, 将计算得到的各样品直径规格、成像距离、分辨尺寸关系按照表 2 列出。当对直径较大的玻璃样品进行内部缺陷观测时, 可参照表 2 设置成像距离; 当

对玻璃内部缺陷细节进行研究时可适当拉近成像距离。

表 2 样品直径、成像距离、分辨尺寸关系

Table 2 Relation of diameter, distance and resolution

Diameter of samples /mm	Imaging distance /mm	Resolution size /mm
20	≥ 100	≥ 0.06
30	≥ 150	≥ 0.10
50	≥ 250	≥ 0.16
60	≥ 300	≥ 0.19
80	≥ 400	≥ 0.25
100	≥ 500	≥ 0.32
110	≥ 550	≥ 0.35

4 成像与光谱实验

4.1 成像实验

图 6 为典型的硫系玻璃样品, 其两端表面做平行抛光处理, 从外表上看不出任何内部缺陷。图 7 为检测系统拍摄的 $\phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 不同工艺条件下的各玻璃内部形貌图像。实验中考虑到大部分玻璃样品的尺寸要求, 以及实际的测量方便, 装置中的光源、Contour IR 照相机部分固定在光学平台上, 样品夹持架也固定在光学平台上, 样品离照相机的距离为 500 mm 。为了突出玻璃内部条纹, 图片通过边框剪切的方法去除了原始图像中玻璃样品周围的冗余背景。为分析方便, 实验中 4 个样品编号分别为 (a)~(d)。

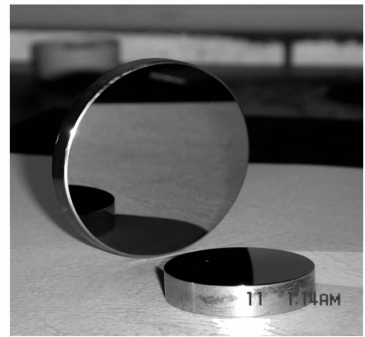


图 6 典型红外硫系玻璃

Fig. 6 Typical infrared chalcogenide glass

从图 7 可看出样品 (a) 显示玻璃内部无明显条纹; 样品 (b) 显示玻璃内部存在大量细条纹; 样品 (c) 显示玻璃内部有大量杂乱的粗条纹, 主要是因为熔制过程中摇摆不均匀, 出炉温度不佳导致材料组分不均匀, 造成折射率分布差异大的缘故; 样品 (d) 显示玻璃内部虽无明显条纹, 但是在近红外波段存在失透 (透射率极低) 现象。因此, 样品 (a) 内部光学均

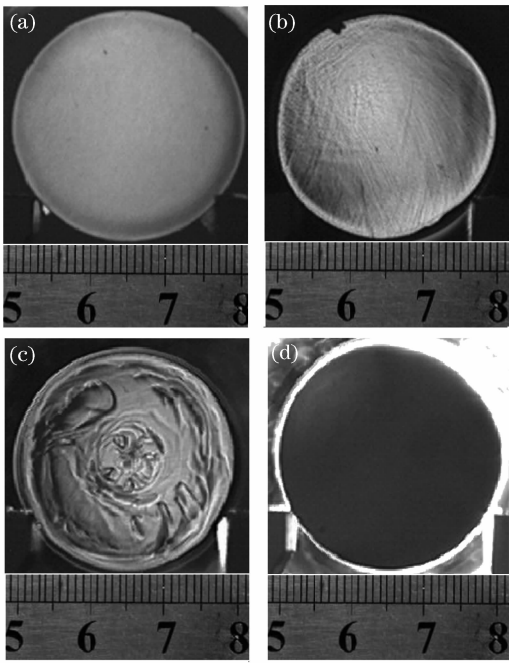


图 7 不同工艺下的红外玻璃内部形貌
Fig. 7 Internal morphology of infrared glasses with different processes

匀性最好, 样品 (b) 次之, 样品 (c) 内部光学均匀性差, 样品 (d) 内部红外失透。

在图 7(b) 中, 通过细条纹与标尺比对, 可发现当成像距离为 500 mm 时, 大约 0.3 mm 粗细的条纹是可以被辨认出来的, 这个结果与表 2 中 500 mm 成像距离下分辨尺寸为 0.32 mm 相吻合。虽然这种实验验证不是很精确, 但是可以大致验证系统分辨尺寸的设计和计算的准确性。

4.2 光谱测量验证实验

为了进一步验证上述检测结果的光学均匀性优劣等级的正确性, 在样品 (a)~(d) 的不同部位各取 5 个区域, 对每个区域采用 Nicolet-380 型傅里叶红外光谱仪进行透射光谱测试, 分别得到图 8 所示的透射谱曲线。从图 8 看出样品 (a) 不同位置的红外透射率曲线差异不大, 说明样品光学均匀性较好; 样品 (b) 不同位置的透射率曲线变化较大, 均匀性较差; 样品 (c) 不同区域透射率曲线相差很大; 样品 (d) 各个区域的透射率都很低, 而且透射率曲线差异最大。因此, 可以判断样品 (a) 内部光学均匀性最好, 样品 (b) 次之, 样品 (c) 光学均匀性差, 样品 (d) 各个区域的透射率都很低, 存在失透现象, 并且因为其内部存在着析晶晶粒, 使得入射光在析晶玻璃内部发生多次散射和吸收, 大大降低了其透射率; 不同部位析晶晶粒的大小和多寡差异又使得样品不同部位的透射率差别非常大。

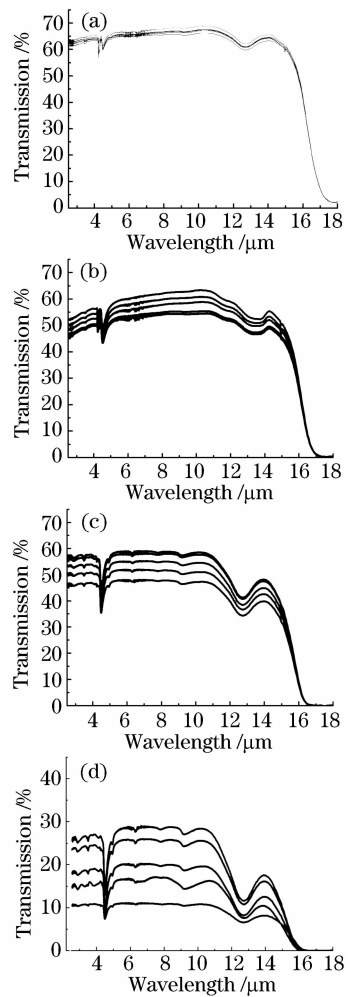


图 8 样品 (a)~(d) 不同区域的红外透射谱曲线
Fig. 8 Transmission spectra of sample (a)~(d) in different regions

当玻璃内部光学均匀性变差时, 使得玻璃的透射光谱出现两个特征: 1) 透射率曲线整体呈现下降趋势, 主要是由大尺寸的条纹引起光的折射和散射, 或者是析晶晶粒引起的散射和吸收造成的; 2) 不同部位透射率曲线差异较大, 各部位透射率曲线表现为随机性的差异, 如图 8(b)~(d) 每个图中的 5 条透射率谱线所示, 主要是因为条纹或析晶晶粒的随机分布导致了玻璃样品各部位透射率随机性变化。因此依据检测系统的成像结果判断的玻璃样品内部光学均匀性优劣等级, 与透射率光谱测试结果一致, 这表明成像检测系统实验结果可信。

5 图像处理

为了更加清晰地分辨玻璃内部条纹特征, 采用 Sobel 算子对条纹边缘进行检测^[13]。Sobel 边缘算子一般由一个对垂直边缘响应最大的卷积核, 和另

一个对水平边缘响应最大的卷积核构成。Sobel 算法的边缘检测,就是在图像空间利用两个卷积核与图像进行邻域卷积运算完成的。将两个卷积的最大值,赋给图像中对应卷积核中心位置的像素,作为该像素的新灰度值^[14]。两个卷积核表达式为

$$\mathbf{M}_v = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_h = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 \end{pmatrix}.$$

通过 Sobel 算子进行处理后获得如图 9 所示的样品(b)和(c)的内部条纹图像,处理后的图像条纹边缘更加清晰,条纹分布和走向更加清楚,玻璃内部条纹特征更加明显。

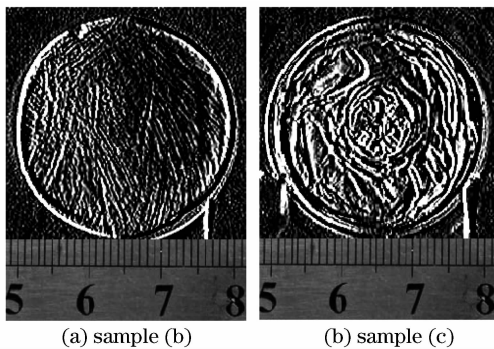


图 9 Sobel 算子边缘检测条纹图像

Fig. 9 Stipes processed by Sobel operator

6 结 论

介绍了一种基于透视成像原理的红外硫系玻璃内部宏观缺陷检测系统,在 300 mm 成像距离条件下,计算得出其分辨尺寸达 0.19 mm,并且能对长度为 63.4 mm 的物体成满像。通过带有刻度的标尺成像验证了检测系统视场计算的正确性,并且将 500 mm 成像距离下的细条纹宽度与标尺刻度的粗略对比,也表明系统分辨尺寸设计和估算的准确性,此外透射光谱测试实验结果表明此检测系统对于玻璃内部光学均匀性等级的判断准确。通过光源功率调节,被测玻璃样品厚度可达几毫米到几十毫米。成像实验表明,此系统拍摄的红外玻璃内部缺陷图像清晰直观。最后通过 Sobel 算子对玻璃内部条纹边缘进行检测,获得了更加清晰的条纹特征。此内部宏观缺陷检测系统为红外硫系玻璃研制和生产提供了可靠的质量检测手段,能帮助改进红外玻璃生产工艺,提高红外玻璃产品质量。尽管如此,系统在

分辨力上还需进一步改进,以满足更精细条纹的分辨,而且后期的研究还需要集成条纹尺度软件定量分析等功能,以实现系统的仪器化改进。

参 考 文 献

- 1 A. K. Varshneya, D. J. Mauro. Microhardness, indentation toughness, elasticity, plasticity, and brittleness of Ge-Sb-Se chalcogenide glasses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, **353**(13-15):1291~1297
- 2 J. Vázquez, D. Garcia-G. Barreda, P. L. López-Alemaný et al.. An alternative method for analyzing the non-isothermal glass-crystal transformation kinetics: Application to the crystallization of some alloys of Ge-Sb-Se and Sb-As-Se glassy systems [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, **421**(1-2):109~116
- 3 M. A. Popescu. Non-Crystalline Chalcogenides [M]. Kluwer Academic Publishers, 2002
- 4 Zhu Jun, Dai Shixun, Chen Feifei et al.. Mid-Infrared emission properties of Ho³⁺ ion in nanocrystals embedded chalcogenide glass ceramics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7):1916~1920
朱 军,戴世勋,陈飞飞等. Ho³⁺ 掺杂硫卤玻璃陶瓷的中红外发光特性的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7):1916~1920
- 5 Wang Xunsi, Liang Xiaowei, Zhu Mingxing et al.. Optic effect of KCl on GeS₂-Ga₂S₃ chalcogenide glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7):2047~2052
王训四,梁小伟,朱明星等. KCl 对 GeS₂-Ga₂S₃ 硫系玻璃光学性能的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7):2047~2052
- 6 Zhang Pengjun, Dai Shixun, Peng Bo et al.. Near- and mid-infrared spectroscopic properties of Tm³⁺-doped Ge-Ga-S-CsI glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2):554~559
张鹏君,戴世勋,彭 波等. Tm³⁺ 离子掺杂 Ge-Ga-S-CsI 硫卤玻璃近红外及中红外发光特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2):554~559
- 7 R. E. Gaskin, C. Lewis. Interferometric measurements of refractive index variations in infrared transmitting material at 10.6 μm [J]. *Optics Acta*, 1980, **27**(9):1287~1294
- 8 Charles E. Synborski, Mary J. Hanes. 10.6 micron wavelength interferometry and the measurement of infrared transmitting materials index of refraction homogeneity [C]. *SPIE*, 1980, **255**:32~39
- 9 B. Dichler, P. Koidl. Scanning CO₂ laser interferometer for theinspection of infrared transmitting plane parallel plate [C]. *SPIE*, 1988, **966**:177~182
- 10 Li Jianmin, Wang Yunfen, Feng Tianbao et al.. Measurement of bubble diameter in a flat glass based on far-field interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6):1508~1511
李建民,王蕴芬,冯天宝等. 基于远场干涉测平板玻璃内的气泡直径[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6):1508~1511
- 11 N. J. Pitt. New materials for optical waveguides [C]. *SPIE*, 1987, **799**:7~25
- 12 D. L. Wood, J. Tauc. Weak absorption tails in amorphous semiconductors [J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **5**(8):3144~3151
- 13 Jiang Ting, Tan Yuegang, Liu Quan. Research of a clarity-evaluation function of image based on sobel [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2008, **36**(8):129~131
蒋 婷,谭跃刚,刘 泉. 基于 SOBEL 算子的图像清晰度评价函数研究[J]. *计算机与数字工程*, 2008, **36**(8):129~131
- 14 Zhang Dengyin, Bo Shunrong, Xu Yangyang. Improved image edge detection algorithm and its application in QoE measurement [J]. *Computer Technology and Development*, 2009, **19**(8):49~53
张登银,薄顺荣,许扬扬. 边缘检测算法改进及其在 QoE 测定中的应用[J]. *计算机技术与发展*, 2009, **19**(8):49~53

栏目编辑: 韩 峰