

doi: 10.3788/gzxb20164502.0212004

高分辨率 ITO 导电薄膜透明区域缺陷识别

陈方涵^{1,3}, 赵光宇², 蒋仕龙³, 彭文达¹

(1 深圳大学 光电工程学院, 广东 深圳 518052)

(2 华南师范大学 华南先进光电子研究院 光及电磁波研究中心, 广州 510006)

(3 北京大学深圳研究院 运动控制技术实验室, 广东 深圳 518057)

摘 要:为识别铟锡氧化物导电薄膜透明区域内可能存在的加工型和移交型缺陷,并满足实际应用需求,提出了基于高分辨率视觉系统的自动缺陷识别方法.根据铟锡氧化物薄膜光学特性和空间要求,设计了工作距离为 30 mm 的科勒式同轴光照明模块.此外,为了与照明部分通用光学元件,设计了适用于应用检测的高分辨率成像模块.完成图像采集后,为便于分别检测两类缺陷,采用了两种预处理方法:对图像进行邻域半径 $r=7$ 的中值滤波并与原图像相减后,获取清晰的划痕缺陷;对图像进行形态学处理和阈值处理后,获取对比度为 48% 的透明电路图案.处理后的图像为缺陷的自动识别提供了可靠的依据,保障了铟锡氧化物薄膜定位的灵敏度和准确度.

关键词:机器视觉;薄膜检测;表面缺陷;光学设计;图像处理

中图分类号:O439;TN307;TP391 文献标识码:A 文章编号:1004-4213(2016)02-0212004-6

High-resolution Defect Inspection for Transparent Indium-tin-oxide Conductive Film

CHEN Fang-han^{1,3}, ZHAO Guang-yu², JIANG Shi-long³, PENG Wen-da¹

(1 School of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518052, China)

(2 South China Academy of Advanced Optoelectronics, Center for Optics and Electromagnetic Research, South Normal China University City Campus, Guangzhou 510006, China)

(3 Laboratory of Motion Control Technology, PKU-HKUST Shenzhen-Hongkong Institution, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: The transparent area of indium tin oxide conductive film possibly has two kinds of defects, processing-type and handling-type. According to the characteristics of different defects and requirements from practicable application, an automatic method for defect inspection based on high-resolution vision system was proposed. In the system, a coaxial lighting module using Koler configuration was designed, which was suitable for optical property of indium tin oxide film and meets space requirement of working distance 30mm. In addition, the high-resolution imaging module applied to practicable inspection was also designed. It shared a doublet lens with lighting module. After obtaining image of indium tin oxide film, two image pre-processing methods were exploited to inspect each kind of defect respectively. If subtracted image processed by median filter in neighboring radius $r=7$ from original image, scratch defect could be kept clearly. If processed original image by morphological and threshold method successively, transparent circuit pattern could be observed remarkably. The contrast of the pattern image was increased to 48%. The images after being pre-processed provide reliability for automatic defect recognition, and guarantee sensitivity and accuracy to location of indium tin oxide film.

基金项目:广东省引进创新科研团队计划(No. 201001D0104799318)资助

第一作者:陈方涵(1983-),女,在站博士后,主要研究方向为现代光学技术及工程应用. Email:chenhan620@163.com

导师:彭文达(1948-),男,研究员,硕士,主要研究方向为光电成像器件与技术. Email:pwd@szu.edu.cn.

通讯作者:蒋仕龙(1968-),男,高级工程师,博士,主要研究方向为机器视觉关键技术及其自动化控制. Email:jiang_sl@motionwell.com

收稿日期:2015-09-07;录用日期:2015-11-12

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Machine vision; Thin-film measurement; Surface defect; Optical design; Image processing

OCIS Codes: 120.4630; 150.3040; 150.0155; 150.1835; 100.2000

0 引言

锡氧化物(Indium Tin Oxide, ITO)透明导电膜是触控面板的重要组成部分之一^[1-2],除了要接受操作,产生正确的定位信号外,还要兼顾保护触摸屏和显示器,保证显示器图像的正确传递和较长的使用寿命.该薄膜的生产需经溅射、蚀刻、印刷电路、涂胶、压合、引线等多重工序^[3].在此过程中,由于原料污染物、无尘室的灰尘、操作系统不小心的抓取、不完善的清洗设备、不合格的图案制造模具或外部光散射等因素,使薄膜产生一些缺陷. ITO 导电薄膜透明区域存在的典型缺陷主要有加工型和移交型两大类.这些缺陷直接影响着触控产品的使用性能与客户感受,应尽可能地减少其出现几率.随着近些年 ITO 薄膜加工工艺与技术的不断改善,产品不良率已大大降低,但缺陷的产生仍不可避免,并且朝着更加细微的方向发展.因此,适用于 ITO 透明薄膜的高精度自动检测技术研究十分必要,其中,基于机器视觉的检测方法更是优势凸显.

机器视觉是一个年轻的学科,它被作为工业生产工具不到三十年.但是却由于低成本、高效、省时以及良好的准确性和可依赖性发展迅猛,所获取的信息也从 2D 扩展到 3D,成为产品检测和分析的重要工具,应用涉及半导体、电子器件、制造加工等众多行业^[4-7].

对 ITO 导电膜而言,缺陷检测包含透明区域与周围金属电极两个部分.韩国、日本、台湾等国家和地区已相继研发出了专门用于 ITO 导电玻璃或导电膜缺陷的检测设备^[8-9],但总结起来有两点不足:1)能够检测的缺陷类型有待完善;2)采集的图像分辨率有限,一般适用大小在 30 μm 以上的缺陷检测.在国内,基于视觉的高分辨率 ITO 薄膜自动缺陷检测研究主要针对薄膜周围金属电极或透明区域外观(如划痕、裂纹等移交型缺陷)检测^[10].对透明区域内的不可见电路图案仍以评估该区域的电容或电阻值为主,视觉的方法极少.也就是说,国内对 ITO 薄膜进行质量检测时,常常分为视觉和非视觉两部分,而后者在一定程度上影响了整个检测结果的可靠性和精度.因此,本文提出了应用于 ITO 薄膜缺陷检测的机器视觉方法.该方法在获取较高分辨率图像后,能够同时实现透明区域移交型外观缺陷和加工型电路图案缺陷的检测,减小 ITO 薄膜细微缺陷对触控面板定位精度和使用寿命的影响,并且将测试结果与缺陷类别建立相互关系,优化生产过程与合格率等.

1 机器视觉 ITO 薄膜透明区域缺陷检测原理

机器视觉系统检测过程包括图像采集、图像处理

和结果输出三个步骤.一个典型的系统由视觉软件和光电图像采集模块组成.组成虽不复杂,但在细化、确定系统各组件性能参数过程中,却要根据终端应用考虑许多因素;系统中的每一个组件都很重要且相互关联,不能将任何一个组件分割开来考虑,因此,机器视觉技术具有独特性与多样性.

ITO 薄膜检测系统包括照明模块、成像模块、显示与视觉分析模块、控制模块等,如图 1.其中照明与成像模块决定着图像采集的质量,比如照明曝光不足、照明角度不合理、镜头像差过大、相机分辨率太低等都会导致图像信息丢失,直接影响分析模块的处理结果.因此,检测系统需要尽可能通过照明凸显 ITO 透明区域的缺陷特征,然后匹配适当的镜头和探测器观察并采集清晰的特征.越多的特征信息被采集,图像处理与分析过程就会变得越简易,机器视觉应用高效、可靠等优势就越明显.

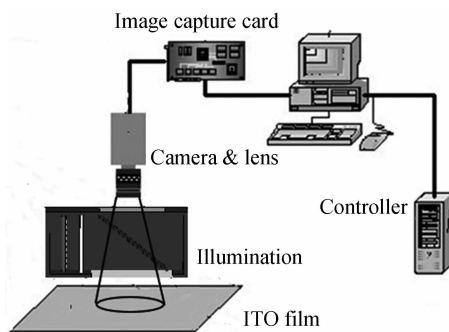


图 1 ITO 薄膜检测机器视觉系统

Fig. 1 Schematic diagram of machine vision system for ITO film inspection

当需要识别 ITO 薄膜的加工型缺陷时,机器视觉系统必须要观测到具有一定对比度的透明电路图案,然后再根据采集图案与模板图案之间的差别来判定缺陷的存在与类别;同样,在检测移交型缺陷时,首先也需要获取该类缺陷的特征图像.相对来讲,将照明光线调整到适当角度即可识别移交型缺陷.而对加工型缺陷,由于 ITO 薄膜具有显示图像的功能,在可见光波段透过率高达 95% 以上,因此不论是人眼还是普通的视觉系统,都无法观察到透明电路图案,为检测带来一定困难.综合两类缺陷的特点,用于 ITO 薄膜透明区域自动检测的视觉系统应具有两个功能:1)同时采集透明区域线路图案与移交型缺陷特征图像;2)通过预处理方法从采集图像中分离出不同类型的缺陷,便于后续特征判别输出.

2 ITO 薄膜透明区域图像采集光学模块设计

机器视觉光学设计包括照明模块和成像模块设

计,各模块设计参数基于图像分辨率与空间要求,以及特定型号的相机.本系统采用的是 2/3" Basler 黑白面阵相机,像素分辨率为 2048(H)×1088(V),像素大小为 5.5 μm ;采集的图像空间分辨率要求小于 5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$;采集系统的工作距离要求为 30 mm.

2.1 照明模块设计

理想的照明应最大化特征与背景之间的对比度.对 ITO 薄膜移交型缺陷来讲,满足适当的均匀性和照明角度就可以获取对比度;但对加工型缺陷则较为困难.因为 ITO 导电薄膜对可见光的透过率 $\geq 90\%$,对近红外光的反射率 $\geq 70\%$,对紫外的吸收率 $\geq 85\%$ ^[11-12].当用普通可见光照明时,无论采用何种照明角度,ITO 薄膜与同样在可见光波段透过率较高的基底之间都不能产生对比度,无法观察 ITO 电路图案.然而,ITO 薄膜在红外和紫外波段的光谱特性却为加工型缺陷的照明研究提供了可行方案.本文利用 ITO 材料在近红外的反射特性,采用同轴照明方式获取透明电路图案.

为保证照明能量,采用中心波长 940 nm 的单颗 OSRAM 高功率红外 LED SFH4725S 作为光源,该光源在连续电流 1A 驱动时辐射能高达 900 mW.由于 SFH4725S 发光芯片上有许多微小电路及连线,即发光面不均匀,因此考虑照明均匀性,采用柯勒照明方式,如图 2. LED 光源经前透镜组 1 和透镜 2 成像到孔径光阑,孔径光阑和检测平面分别位于透镜 3 的两个焦平面,孔径光阑半径与透镜 3 焦距的比值即为照明的数值孔径.视场光阑在前透镜组 1 后表面附近,其大小决定了孔径光阑处的数值孔径,可直接改变照明的视场范围.经柯勒结构系统后,LED 发光表面的每一点都能照明整个检测平面,照明平面均匀性不会受到光源本身的影响.图 2 中的孔径光阑直径 $\Phi=5.7\text{ mm}$,经过孔径光阑的光束 $\text{NA}=0.15$,透镜 3 的焦距为 $f'=38.1\text{ mm}$,因此检测平面上的照明数值孔径 $\text{NA}=0.074$,照明视场对角线为 11 mm.同时照明按要求预留了约 30 mm 的工作距离.

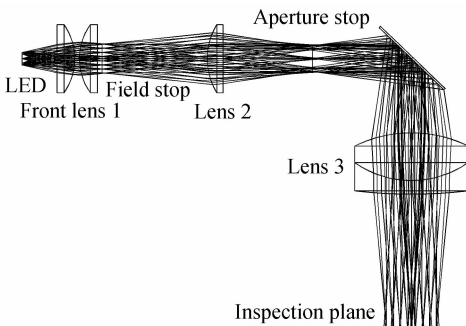


图 2 科勒同轴照明光路图

Fig. 2 Layout of coaxial illumination with Koler configuration

2.2 成像光学系统设计

成像光学模块决定了采集图像的分辨率,即表征图像的清晰程度.本文由于设计了同轴照明光源,为满足图像采集模块 30 mm 工作距离的要求,以及照明系统数值孔径和成像系统数值孔径的匹配,成像部分需基于图 2 中的透镜 3 进行针对性的设计.

首先需要确定成像系统的基本设计参数.为充分利用能量,成像系统的物方 NA 等于照明 NA,为 0.074.由工作波长和瑞利判据可计算,物方光学分辨率为 7.8 μm .根据采样定律,当采样点为 2 时,图像的空间分辨率为 3.9 $\mu\text{m}/\text{pixel}$,满足小于 5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 的要求.系统设计采用远心结构,放大倍率为 2×,成像到 2/3" 的 CCD 芯片上,如图 3(a).图 3(b)为光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线,实际 MTF 曲线与理想曲线很接近,在探测截止频率 45 lp/mm 处,MTF 值为 0.3,符合成像要求.

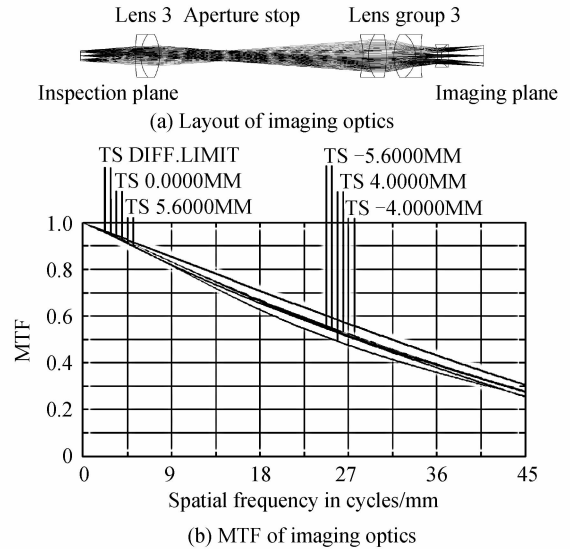
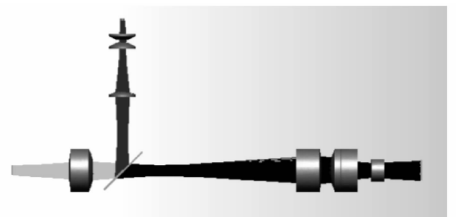


图 3 成像系统光路图及其 MTF 曲线

Fig. 3 Layout of imaging optics and its MTF curve

为了验证照明模块的性能,将其与成像模块组合成如图 4(a) 所示的模型,并在成像平面评估照明性能.假定检测表面为理想镜面,成像平面接收的辐射照度分布与接收面上垂直和水平两个方向的轮廓曲线见图 4(b), (c).从图 4 可知,在探测器平面 11 mm×6 mm 的范围最大平均辐射值为 95 W/m^2 ,最小平均辐射值为 85 W/m^2 ,计算可得照明均匀性为 90%,平均辐射照度为 90 W/m^2 .



(a) Optical model for image capture system

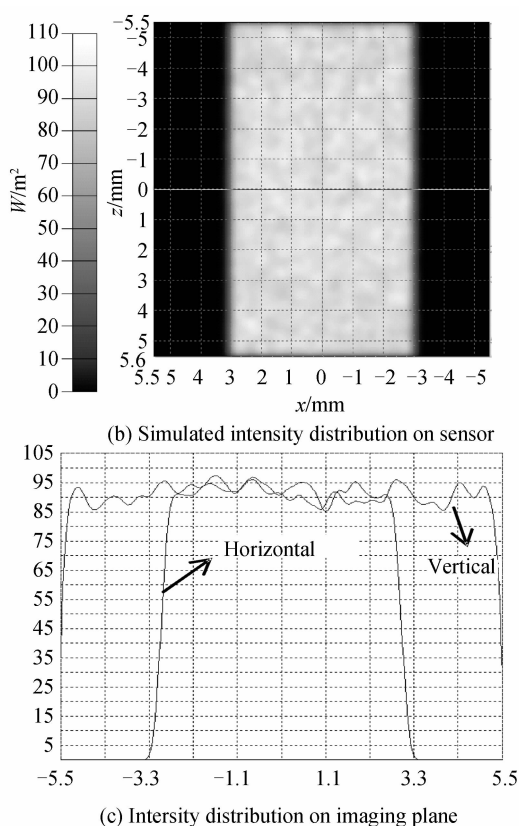


图4 图像采集光学模型及其在探测器和接收面的光强分布
Fig. 4 Optical model for image capture and simulated intensity distribution on sensor

将ITO薄膜样品置于被检平面时,该系统能够采集到透明区域中人眼不可见的电路图案和细微划痕特征.图5(b)为视场为 $6.5\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$ 的图像结果.对比图5(a),白色同轴光照明在缺陷提取中失效.当采用白色同轴光时,除了薄膜表面的一些污迹,观察不到其它任何特征.图5(b)中获取的划痕缺陷和电路图案信息对比度不高,电路图案与薄膜基底的对比度约为 11.5% .为了便于后续识别软件快速识别薄膜的加工型缺陷与移交型缺陷,本文将对采集图像进行预处理,分别提取两大类缺陷.

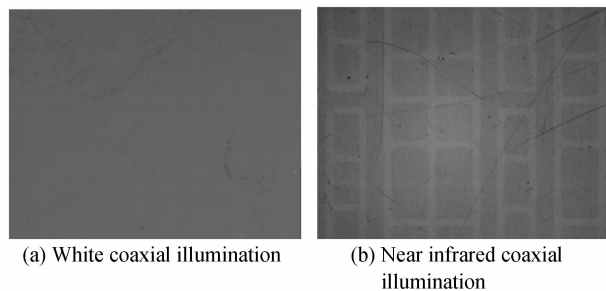


图5 不同波长照明采集图像对比
Fig. 5 Comparison of image captured by different illumination

3 ITO透明区域图像预处理

在分析物体前,可采用图像滤波器锐化图像像素、

提高边缘对比度、去除噪声或滤波等预处理操作,改善因照明不稳定、照明能量不足、物体本身特性或杂散光等因素引起的对采集图像质量的不良影响^[13-14].常用的预处理工具有阈值处理与图像滤波.

ITO透明区域缺陷包括移交型缺陷和加工型缺陷两大类,见表1.移交型缺陷在加工完薄膜后人为造成的,主要有表面划痕或外来污染物等;加工型缺陷在加工过程中产生,包括开路、短路等.检测加工型缺陷首先必须提取出采集图像中的电路图案,该电路图案与移交型缺陷都是检测感兴趣的目标特征.由于两者的图像特征完全不同,例如移交型缺陷灰度值较低,形状细长;电路图案特征灰度值较高,具有规则图案(如图5).采用同一种预处理方法凸显不同种类的缺陷特征较为困难,因此本文分别采用两种预处理方法增强不同类型的特征.

表1 ITO导电薄膜典型缺陷

Table 1 Typical defects of ITO conductive film

Defects	Image	Cause of sampling
Open		Processing-type defect ITO pattern perforation
Short		Processing-type defect ITO pattern connection
Pin Hole		Processing-type defect Close edge is on the ITO pattern
Protrusion		Processing-type defect Open edge is on the ITO pattern
Substance		Processing-type defect Open edge is on ITO substance
Scratch		Handling-type defect Line across the pattern
Spot		Handling-type defect Concentrated pointed or lines

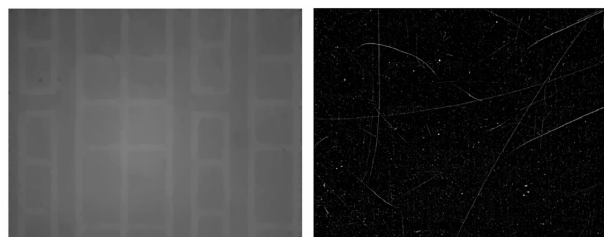
3.1 移交型缺陷提取

将图像中的划痕作为特征时,首先要去除图案背景的干扰.由于划痕特征尺寸不大,灰度变化小于背景,背景各点的灰度值都比特征点亮.因此本文先采用排位法模糊划痕特征,提取图案背景;再将原图像与提取的背景相减,剩下的就是检测感兴趣的划痕缺陷.

排位运算在各像素的某一邻域范围内进行,基本思路是按指定方式比较邻域内各像素点的灰度值,最后原像素点由邻域内的某像素值取代.该邻域可以是矩形也可以是圆,通常近似为大小可调节的圆,圆半径的变化影响运算速度和处理结果.中值滤波作为排位法的典型代表,是最常用的图像去噪方法之一^[15].

排位方式除了取中值外,也可根据图像特征取最大值或最小值.但就图5的划痕特征而言,为获取相减用的图案背景,采用的邻域排列方式是取中值.将该运算应用于整幅图像后,之前属于特征的区域被扩展为

局部的背景灰度值,扩展程度随着邻域区域半径的增大而加强.图 6(a)为半径 $r=7$ 的中值排列结果,图中去除了划痕,保留了背景图案.将图 6(a)和图 5 相减后,得到图 6(b),该图去掉了原来的线路图案,在黑色背景下凸显了白色的划痕特征.



(a) Pattern background extracted by median filtering

(b) Surface defects obtained by subtraction

图 6 移交型划痕缺陷提取处理结果

Fig. 6 Processed result of scratch defect extraction

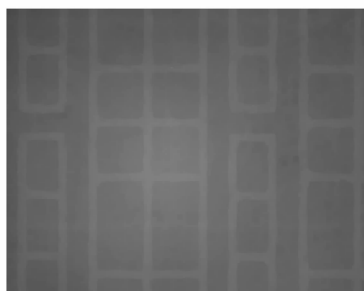
3.2 加工型图案特征提取

检测线路图案的缺陷时,移交型缺陷会成为干扰背景,同时还存在图案对比度低的问题.针对这两点,论文首先对采集图像图 5 进行形态学处理,淡化划痕;然后对淡化后的图像进行大津法(Otsu)阈值处理,拉伸透明电路图案和透明基底之间的对比度.

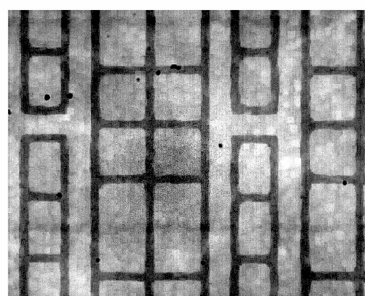
膨胀和腐蚀是数学形态学中的基本运算,即采用结构元素对图像每个像素对应的区域进行特定的逻辑运算^[16-17].由于膨胀可将与特征接触的所有背景点合并到该物体中,为了减小划痕特征的影响,采用结构元素 $B=[0\ 1\ 0; 1\ 1\ 1; 0\ 1\ 0]$ 对图 5 进行三次膨胀处理,处理结果如图 7(a).图 7(a)中淡化划痕的同时特征边界向外部扩张,使图案线条变宽.采用与膨胀作用相反的腐蚀对图 7(a)进行处理,结构元素不变,其结果如图 7(b).所获取的图像为几乎没有划痕特征的对比如较



(a) Processed image of Fig.5 after three times dilation



(b) Processed image of (a) after three times erosion



(c) Processed image of (b) by Otsu threshold method

图 7 ITO 透明图案提取及对比度增强

Fig. 7 Transparent ITO pattern extraction and contrast enhancement

低的线路图案.

图 7(b)的 ITO 图案与基底之间的灰度值区别较小,对比度为 11.5%.为改善图像效果,对该图进行基于 Otsu 最大类间方差法原理的阈值处理,对图像对比度进行拉伸,将线路图案对比度提高到 48%左右,增强对加工型缺陷的识别能力,如图 7(c).

4 结论

设计了适用于 ITO 薄膜透明区域高分辨率图像采集的光学部分,包括照明和成像两个模块.在满足工作距离要求的前提下,共用一双胶合透镜,采集到空间分辨率 $3.9\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 的原始图像.采用两种预处理方法加强图像中的特征.分析表面划痕等移交型缺陷时,对每个像素半径 $r=7$ 的邻域内进行中值滤波,再将淡化缺陷后的图像作为背景与原图像相减,得到清晰的划痕特征;分析电路图案开路、短路等缺陷时,采用形态学中的腐蚀、膨胀功能淡化划痕,然后对图像进行动态阈值处理提高图案与基底的对比度.不管是加工型缺陷还是移交型缺陷,经图像预处理后,缺陷特征一目了然,为分析软件的后续缺陷判定提供了可靠和准确的结果,同时也为 ITO 薄膜高品质自动化检测提供了可能.

参考文献

- [1] XI Zhu-you, XU Qi-ming, ZHAO Peng, *et al.* Review of the characteristics of ITO thin film and its development [J]. *Journal Xi'an University of Arch & Tech (Natural Science Edition)*, 2004, **36**(1): 109-112.
裘著有,徐启明,赵鹏,等. ITO 薄膜特性及发展方向[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2004, **36**(1):109-112.
- [2] DUAN Xue-chen, YANG Xiang-ping. Development and application of ITO film [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 1999, **9**(138): 58-60.
段学臣,杨向萍. 新材料 ITO 薄膜的发展和应[J]. 稀有金属与硬质合金, 1999, **9**(138): 58-60.
- [3] ZHANG Jin-tao, FAN Yu-feng, LEI Gang. Etching research of ITO films in PDP[J]. *Vacuum Electronics*, 2005, (6): 42-44.
张劲涛,范玉峰,雷刚. PDP 中 ITO 膜制作工艺技术的研究[J]. 真空电子技术, 2005, (6): 42-44.

- [4] HU Xiao-dong, ZHAO Wan-hua, XU Chao, *et al.* The CCD based weld pool control system for directly metal forming[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3):375-377.
胡晓东, 赵万华, 许超, 等. 基于 CCD 的金属直接成型过程监控系统[J]. 光子学报, 2003, **32**(3):375-377.
- [5] ZHANG Hong-tao, DUAN Fa-jie, DING Ke-qin, *et al.* Development of key technology on surface defects detection system for steel strip[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, **28**(3): 216-219.
张洪涛, 段发阶, 丁克勤, 等. 带钢表面缺陷视觉检测系统关键技术研究[J]. 计量学报, 2007, **28**(3):216-219.
- [6] LIU Hao-ran, ZHANG Wen-ming, KIU - Bin. Three dimensional measurement based on the binocular vision[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1830-1839.
刘浩然, 张文明, 刘彬. 基于双目立体视觉实现物体三维测量的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(7):1830-1839.
- [7] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua, *et al.* High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 19493-19510.
- [8] CHEN Yen-chung, YU Jiun-hung, XIE Mu-chiau, *et al.* Automated optical inspection system for analogical resistance type touch panel[J]. *International Journal of the Physical Science*, 2011, **6**(22): 5141-5152.
- [9] SONG J Y, PARK H Y, KIM H J, *et al.* Development of defect inspection system for PDP ITO patterned glass[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2006, **7**(3):18-23.
- [10] SHEN Gan-song, YE Yu-tang, LI Chang-hai. A high resolution detection system for ITO lines [J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(1):24-27.
沈淦松, 叶玉堂, 李昌海. 一种高分辨率 ITO 线路缺陷检测系统[J]. 激光技术, 2013, **37**(1):24-27.
- [11] YANG Meng, DIAO Xun-gang, SUN Yi, *et al.* Transparent microwave absorption properties of ITO film[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2006, **12**(5):465-468.
杨盟, 刁训刚, 孙裔, 等. 氧化铟锡(ITO)薄膜的透明吸波特性研究[J]. 功能材料与器件学报, 2006, **12**(5): 465-468.
- [12] MA Yong, KONG Chun-yang. Electrical and optical properties and applications of ITO films [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, **25**(8):114-117.
马勇, 孔春阳. ITO 薄膜的光学和电学特性及其应用[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, **25**(8):114-117.
- [13] LI Li-chao, YANG Lu, ZHANG Yan-hua. Defect test of material using infrared image processing methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2):372-376.
李立超, 杨录, 张艳花. 利用红外图像处理方法检测材料缺陷[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(2):372-376.
- [14] QUAN Yan-ming, CHEN Jia-jia, KE Zhi-yong. Image processing method for automatically batch detection of steel ball's surface defects[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, **24**(6): 518-521.
全燕鸣, 陈佳佳, 柯志勇. 成批抛光钢球表面缺陷自动检测的图像预处理方法[J]. 测试技术学报, 2010, **24**(6):518-521.
- [15] LIU Ming. Dynamic window-based adaptive median filter algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, **31**(2): 390-393.
刘茗. 基于噪声检测的自适应中值滤波算法[J]. 计算机应用, 2011, **31**(2): 390-393.
- [16] CHENG Xu-sheng, CAO Yi-ping, HE Yu-hang. A quantitative model and implementation of width measurement for irregular crack[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2097-2100.
程旭升, 曹益平, 何宇航. 一种测量无规则裂缝宽度的量化模型与实现[J]. 光子学报, 2010, **39**(11): 2097-2100.
- [17] MA Wen-wei, ZHAO Yong-qiang, ZHANG Guo-hua, *et al.* Infrared dim target detection based on multi-structural element morphological filter combined with adaptive threshold segmentation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1020-1024.
马文伟, 赵永强, 张国华, 等. 基于多结构元素形态滤波与自适应阈值分割相结合的红外弱小目标检测[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1020-1024.