

文章编号:1007-2780(2014)06-1024-08

一种复杂图像背景中残留液晶识别方法

黄妍妍^{1,2*}, 高宝红¹, 张海涛², 康军广²

(1. 河北工业大学 微电子研究所, 天津 300130;

2. 河北工业大学 网络管理中心, 天津 300130)

摘要: LCD 液晶屏是对表面洁净度有严格要求的部件, 基于数字图像处理的残留液晶识别方法能够定量、客观地评价表面的洁净度。针对复杂背景图像中残留液晶难以准确识别的问题, 本文提出并实现了有效的图像处理流程和算法, 包括分割、边缘连接、图像填充、去除多余边界以及噪声等操作。提出了一种边缘连接算子, 在对图像进行分割后, 将不连续的图像边界连接为闭合, 为图像填充奠定基础。提出并实现了一个基于二叉分类方法的模式分类器, 用于对污染物几何形状进行自动识别。实验表明, 针对单一背景残留液晶的识别与分析方法能够精确获得残留液晶边缘, 并且控制了噪声的干扰; 针对复杂背景残留液晶识别与分析方法能够对背景存在明显差异的特定类型图像进行准确的处理。

关键词: 图像处理; 污染物识别; 模式识别; 液晶屏

中图分类号: TP141.9; TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20142906.1024

Identification method of rudimental liquid crystal in complex background image

HUANG Yan-yan^{1,2*}, GAO Bao-hong¹, ZHANG Hai-tao², KANG Jun-guang²

(1. *Institute of Microelectronics, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;*

2. *Network Management Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

Abstract: LCD screen requires strict surface cleanliness. The inspection method based on digital image processing focusing on the residual liquid crystal can give quantitative and objective assessment on the components surface cleanliness. According to the difficulty to identify the rudimental liquid accurately in a complex background image, this paper proposes an effective image processing flow and algorithm, including the operation of segmentation, edge connection, image filling, redundant boundary and noise removing, etc. An edge connecting operator is designed to connect the discontinuous boundary in the image after the segmentation. A classifier is designed and implemented based on binary classification method for automatic identification of geometry types of contaminants. Experiments show that the residual liquid crystal in the simple background image can accurately inspected, and the interference of the noise is excluded. The identification and analysis method for the complex background image can accurately process particular types of images that their backgrounds have significant differences.

Key words: image processing; recognition of contamination; pattern recognition; liquid crystal screen

收稿日期: 2014-02-27; 修订日期: 2014-04-11.

基金项目: 02 国家重大专项项目 (No. 2009zx02308); 河北省高等学校科学技术研究项目 (No. Z2011293); 河北省自然科学基金项目 (No. E2014202147)

* 通信联系人, E-mail: huangyy@hebut.edu.cn

1 引言

液晶屏是一种光电子产品,我国现有液晶屏生产企业 100 多家,中低档液晶的产量占世界的 90%,其中大部分产品出口到国外,是当前我国电子信息产业中极富竞争力和发展前景的高新技术产业。在液晶生产过程中需要多步清洗^[1]来保证液晶屏产品的质量。包括 LCD 基片的清洗、曝光显影后的清洗、摩擦定向后的清洗、灌注液晶后的清洗等。在 LCD 生产过程中,由于液晶的沁润而发生虹吸现象,使液晶进入狭缝,而且在液晶盒表面、PIN 脚上也会残留很多液晶,这些残留不但影响产品外观,妨碍贴偏光片工序,还会造成电极接触不良,电路断路,短路等严重的质量问题,导致整机报废,损失严重。因此,及时有效地检测这些液晶残留对于提高产品的优品率,优化清洗工艺和研发优质的清洗剂具有重要意义。

现有各种污染物识别方法和设备不适于高精度器件表面,不能识别分析微小的污染物。针对微小污染物,需要借助显微镜对物体表面的洁净度进行评价的方法,包括电子显微分析法、光学显微分析法等。电子显微分析法识别准确率高,但价格高昂,分析过程复杂。光学显微分析方法设备较为简单,但评价中主观因素影响较大。

对于 LCD 液晶屏表面的污染物识别与分析,将显微镜等装置获取的放大后图像进行数字化,用计算机软件程序进行自动评价,是一种客观定量的方法。数字图像处理技术不仅可以排除主观因素的干扰,降低劳动强度,提高生产效率,而且还能对这些指标进行定量描述,对污染物的形态、类型进行鉴别和统计^[2-4]。但其难点在于对获得图像的处理,即图像中污染物特性的确定。本文的研究工作正是基于数字图像处理技术,面向 LCD 液晶屏表面污染物进行识别与分析。此外,基于图像处理的器件表面污染物自动识别与分析方法对于集成电路平坦化过程中的清洗工艺及清洗剂配比研究也有重要应用意义。

2 复杂背景残留液晶识别方法设计

图像分割是自动识别图像中目标的基础^[5],但困难在于图像本身的清晰度并无法保证^[6]。迭

代阈值分割方法能够有效地处理背景较平滑的单一背景液晶残留^[7-8],但是对于包含残留密封胶背景或者背景颜色不均匀的图像,效果不理想,背景灰度变化较大的影响,整幅图像分割没有合适的阈值,单一阈值不能兼顾图像全部像素。如图 1 所示。

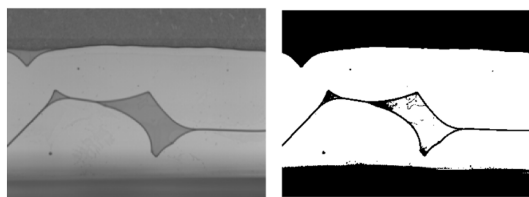


图 1 复杂背景的残留液晶识别(迭代阈值分割方法)

Fig. 1 Liquid crystal rudimental recongnition in complex background (Iterative threshold)

图 1 中,上下边缘为残留密封胶,颜色较深,与中间浅色部分有明显边界。迭代阈值分割方法是对图像整体进行处理,而在此类图像中,复杂背景差距过于明显,并且颜色值与需要识别的残留液晶接近,因此处理过程中所计算得到的阈值并不能将背景与残留液晶分开,而是会将大面积的背景识别为残留液晶。因此,对于背景中包含密封胶图像等规则噪声的图像,不能直接使用全局迭代阈值分割算法。

对于以上图像,大面积噪声出现于上、下边缘,并且下边缘与浅色背景边界不明显,因此可以尝试先对图像直接进行分割,识别出图像的边缘,所得到的边缘所包围的区域即是需要识别的残留液晶。

对图像进行增强并常规分割后的结果如图 2 所示(所使用的边缘检测算子为 Sobel 算子^[9])。

由图 2 可见,残留液晶的边缘得到了较精确

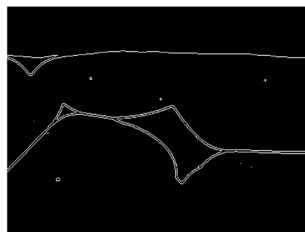


图 2 图像增强并分割的处理结果(Sobel 算子)

Fig. 2 Enhanced and segmented image by Sobel operator

的识别,但所得到的只是边缘部分,并且受图像本身质量的影响,边缘并不完全闭合,另外,大面积残留液晶的边缘识别为双边缘内曲线。因而首先需要对边缘进行连接处理,使之成为闭合的边缘,然后进行填充,为最终统计残留液晶特征做好准备。

3 边缘连接算子研究与设计

3.1 图像填充

在填充过程分为两个阶段:边缘闭合、二次内部填充。边缘闭合阶段采用本文设计实现的边缘连接算子进行处理,针对每一像素,根据 8 个相邻方向上一定范围内的像素颜色值,将满足预设阈值的像素设置为黑色,从而实现对不连续污染物图像边缘的闭合连接。处理的结果是,较大面积(内部空白直径大于阈值)的污染物图像边缘确保连续,内部空白直径小于阈值的污染物图像被完全填充。

二次内部填充是对内部空白直径大于阈值的油污图像进行填充,采用扫描线填充方法进行处理。图像填充^[10]是一个将指定不规则区域内部像素填充为填充色的过程,在计算机辅助设计和图像处理等领域有广泛应用,常用算法包括种子填充算法、扫描线填充算法、边填充算法等。

3.2 边缘连接算子

本文所设计实现的边缘连接算子(Edge Connector, EC)如图 3 所示。使用 EC 算子对图像的每一个像素进行处理,当遍历到像素 $A_{i,j}$ 时,如果其值为 0,则分析其 8 个方向上相邻像素的值,以确定是否将其值修改为 1,进行填充。

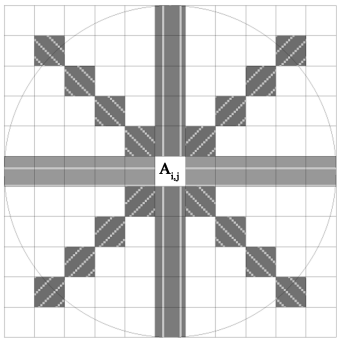


图 3 边缘连接算子示意图

Fig. 3 Edge Connector operator illustration

EC 算子有两个参数: D 表示算子的大小,即图中圆的直径(或正方形边长),取值为奇数,以保证待处理的像素位于中心; N 表示在某方向上像素值连续为 1 的像素数阈值。

当以下条件之一成立时,将 $A_{i,j}$ 的像素值设置为 1:

(1) 左边相邻 $(D-1)/2$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1,并且右边相邻 $(D-1)/2$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1。

(2) 上边相邻 $(D-1)/2$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1,并且下边相邻 $(D-1)/2$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1。

(3) 左上对角线相邻 $(D-1)/2\sqrt{2}$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1,并且右下对角线相邻 $(D-1)/2\sqrt{2}$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1。

(4) 左下对角线相邻 $(D-1)/2\sqrt{2}$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1,并且右上对角线相邻 $(D-1)/2\sqrt{2}$ 个像素中有连续 N 个像素值为 1。

由图 4 可见,图像的边缘均已经连接为闭合曲线。由于填充过程中将只对闭合的区域对进行填充,因此图像边缘的闭合将确保填充过程准确完成。

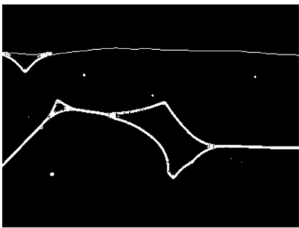


图 4 对分界线进行连接处理的结果

Fig. 4 Connected edge

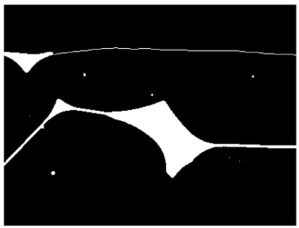


图 5 对图像内部进行填充处理结果

Fig. 5 Filled image

4 图像原始形状恢复方法的研究

填充后所获得的图像,准确地表现出了原图中的残留液晶部分,保持了原残留液晶的几何形

状,但是由于在识别边缘的过程中,所标注出来的边缘,实际上在残留液晶之外的边缘,因此至此步骤所获得的残留液晶的图像,比实际的残留液晶图像面积增大,标注的边缘线即为增大的部分,围绕残留液晶外部一周,宽度为一个像素。因此在最终的结果中需要去除这一多余部分。另外,由于背景也存在明显的区域,被识别为一条直线(宽度为 1 个像素),也需要在最终结果中去除。

由于图像多余的边缘以及非残留液晶的直线宽度均为一个像素,因此采用二值腐蚀的方法去除多余部分,二值腐蚀的结果是使二值图像中像素值为 1 的区域减小。用结构元素 B,扫描图像 A 的每一个像素,用结构元素与其所覆盖的二值图像做“与”操作如果都为 1,结果图像的该像素为 1。否则为 0。如果结构元素是半径为 1 的圆,则二值腐蚀的结果是令图像区域减小一圈,同时会去除宽度小于 2 的边界线,这些边界线并不是残留液晶。

由图 6 通过二值腐蚀处理,去除了单像素宽度的边界影响,同时使得残留液晶的实际面积恢复至原大小(在进行识别边界的分割过程中,将残留液晶的大小扩大了一圈)。



图 6 使用半径为 1 的圆形结构元素进行腐蚀后的结果

Fig. 6 Eroded by circle structure element which radius=1

5 复杂背景残留液晶识别流程设计及实例分析

5.1 识别流程设计

综上所述,对于复杂背景残留液晶的识别,可通过如图 7 步骤完成:

- (a)图像预处理,包括图像的灰度转换等处理。
- (b)图像分割,识别出残留液晶的边缘。此步骤是处理的关键,对于单一背景的残留液晶识别,可使用迭代阈值分割方法,而对于较复杂背景

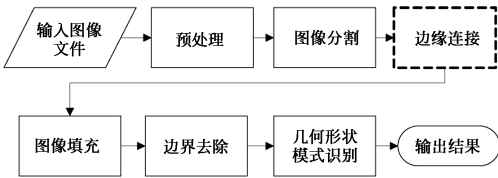


图 7 复杂背景残留液晶识别图像处理流程

Fig. 7 Image processing flow of the rudimental liquid crystal recongnition in complex background

中的残留液晶,迭代阈值分割方法误差过大,需要根据不同背景采用相应的分割方法。

(c)边缘连接,使用 EC 算子,将残留液晶的边缘处理为闭合曲线。(此步骤为可选项,如果分割后所获得的污染图像边缘都是闭合的,则不需要进行本步骤)

(d)图像填充,将残留液晶部分填充为实心图像,为污染物几何形状模式识别做好准备。

(e)去除多余部分,使用二值腐蚀方法,去除多余的边缘以及部分线型背景噪声。

(f)残留液晶几何形状识别,输出结果。

5.2 实例分析

示例图像 A:

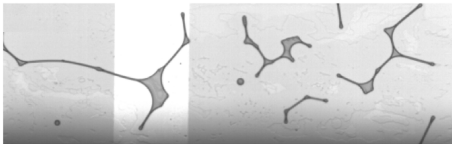


图 8 原图像

Fig. 8 Original image

在图 8 所示的图像中,有多处残留液晶,并且背景中存在较大差异,在中部左侧有部分较亮的背景。另外,图像底部背景的亮度也与上部有差异,图像亮度由上至下逐渐变暗。



图 9 迭代阈值分割方法处理结果

Fig. 9 Output of iterative threshold method

由图 9 可见,使用迭代阈值分割方法处理图 8 的图像,由于背景较复杂,因此处理结果不理想,错误地将底部背景识别为残留液晶。

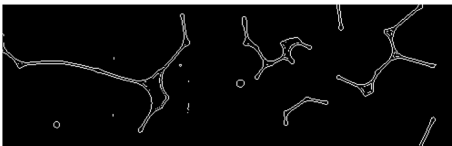


图 10 图像分割处理
Fig. 10 Image segmentation

图 10 所示图像为对图 9 进行图像分割处理的结果,尽管图像背景较复杂,亮度不均匀,但由于背景亮度变化不足被识别为图像边界,所以图像分割能够识别出所有残留液晶的边界。但在中部偏左的较亮竖条也识别出了几处不属于残留液晶的边界,在后继步骤中将被去除。

图 10 识别出残留液晶的边缘,但尚不易统计每一处残留液晶的特征,需要对残留液晶内容进行填充,获得残留液晶的完整图像。在填充之前,首先将残留液晶图像边缘不连续的部分进行连接处理,以确保填充操作的准确进行。图像边缘连接处理的结果如图 11 所示。

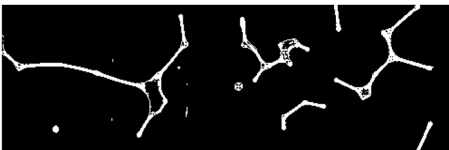


图 11 图像边缘连接处理
Fig. 11 Edge connection

对图 11 所示的图像进行图像填充处理,还原残留液晶图像,处理结果如图 12 所示。



图 12 图像填充
Fig. 12 Filled image

由于残留液晶的亮度低于背景,因此图像分割过程中,所获得的边缘实际上是在沿残留液晶边界之外的像素,并不属于残留液晶,所以最后需要去除所获得的残留液晶图像的边界(宽度为 1 像素)。在此使用二值腐蚀操作完成此步骤,使用的是半径为 1 的圆形结构元素,处理结果如图 13 所示。



图 13 二值腐蚀处理(半径为 1 的圆形结构元素)
Fig. 13 Eroded by circle structure element which radius=1

示例图像 B:

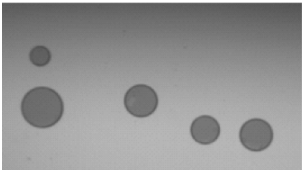


图 14 原图像图
Fig. 14 Original image

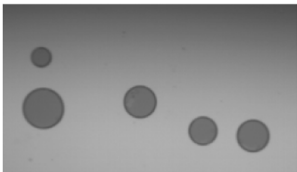


图 15 灰度变换处理结果
Fig. 15 Output of gray-scale transformation

在图 14 所示的图像中,有多处圆形残留液晶,图像亮度由下至上逐渐变暗。图 15 是原图像灰度变换后的处理结果。



图 16 使用图像分割方法
Fig. 16 Image segmentation



图 17 边缘连接
Fig. 17 Edge connection

图 16 所示图像为对图 15 进行图像分割处理的结果,尽管图像背景亮度不均匀,但由于背景亮度变化不足被识别为图像边界,所以图像分割能够识别出所有残留液晶的边界。

图 16 识别出残留液晶的边缘,但尚不易统计每一处残留液晶的特征,需要对残留液晶内容进行填充,获得残留液晶的完整图像。在填充之前,首先将残留液晶图像边缘不连续的部分进行连接处理,以确保填充操作的准确进行。图像边缘连接处理的结果如图 17 所示。



图 18 图像填充
Fig. 18 Filled image

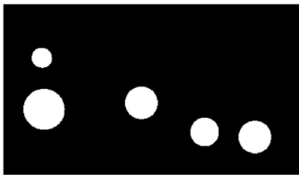


图 19 二值腐蚀处理
Fig. 19 Binary image erosion

对图 17 所示的图像进行图像填充处理,还原残留液晶图像,处理结果如图 18 所示。

最后还需要去除所获得的残留液晶图像的边界(宽度为 1 像素)。使用二值腐蚀操作完成此步骤,使用的是半径为 1 的圆形结构元素,处理结果如图 19 所示。

5.3 几何形状模式识别

污染物几何形状模式分类就是通过提取污染物图像的特征量,对污染物几何形状模式进行分类,这需要通过另外定义相应的分类器^[11]来实现。由于污染物种类众多,并不是所有同类污染物图像具有共同的特征,所以污染物几何形状模式分类是污染物图像分析中的难点之一。鉴于器件表面污染物图像各种特征有一定的相关性,为了降低识别算法的复杂性,特征识别时采用阶层识别的方法。利用分类器,逐步判断各特征参数,对各污染物图像进行分析,并输出分析的结果。

图像分割等处理结束后,将获得一个标识出污染物的二值图像。为定量分析污染物的特性,本文定义了如下几何特征参数:

全局统计特征参数:总面积、总数目、最大面积、最小面积、平均面积、面积方差、面积标准差。

单个污染物特征参数:面积、周长、质心点、最大内切圆直径、离心率、倾角等。

污染物几何形状模式定义为 6 类,分别是圆形、椭圆形、带形、线形、有较大面积节点的线形、不规则形状。由污染物几何形状模式定义可知,对污染物形状的判定要考察多个参数值的所有范围,如果按各模式的参数值约束逐一排查,会引入过多重复计算,且不利于模式识别过程的扩展性。因此本文设计了一个基于二叉分类^[12]方法的模式分类器,每一步只判断一个参数值的取值,并且每一步判断只有两个分支(符合条件,或不符合条件)。分类器处理流程如图 20 所示。

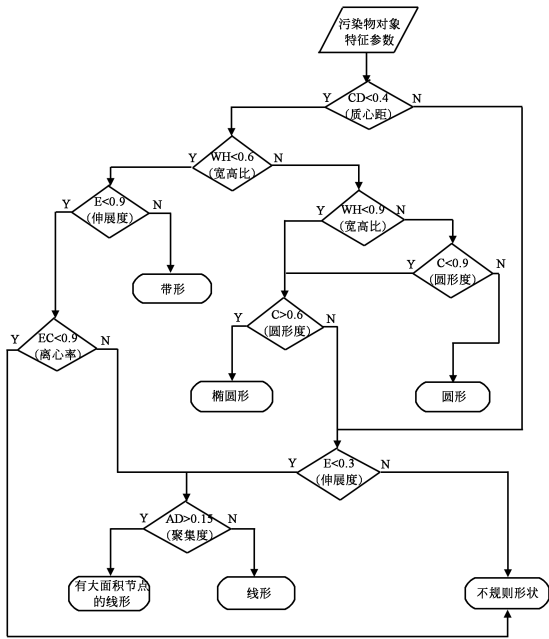


图 20 几何形状模式识别流程图
Fig. 20 Geometry shapes recognition flow chart

图 13 所示图像识别结果如下:原图像大小:157 × 495;污染物对象数目:9;最大污染物面积:1 193;最小污染物面积:1;污染物平均面积:304.000 0;污染物面积方差:170 154.500 0;污染物面积标准差:412.497 9。污染物形状分别为:有较大面积节点的线形、椭圆形、圆形各一个,线形五个,剩余一个面积为 1 像素的污染物不需识别

形状特征。

图 19 所示图像识别结果如下:原图像大小: 230×400 ; 污染物对象数目:5; 最大污染物面积:2 412; 最小污染物面积:584; 污染物平均面积:1 441.800 0; 污染物面积方差:441 276.200 0; 污染物面积标准差:664.286 2。5 个污染物形状均为圆形。

6 结 论

针对单一背景残留液晶的识别,设计的迭代阈值分割方法以及基于数学形态学的边缘检测算子,用以提取残留液晶的边缘轮廓,并进行噪声分析。此方法能够较精确地进行识别与分析,但对背景的一致性要求较高,因此不适于背景差异较大的复杂背景残留液晶识别。实际情况中多为复杂背景,针对复杂背景残留液晶的识别,设计了相应的图像处理流程,首先通过预处理将 RGB 图像

转换为灰度图像,并进行图像分割;然后对分割后的图像进行边缘连接,将不连续的边界补充至闭合;之后进行图像填充,还原得到污染物图像,再使用二值腐蚀操作去除图像分割过程中引入的多余边界以及部分噪声;处理结果可用于污染物图像的几何形状模式识别,获得分析结果。提出了一种边缘连接算子,在对图像进行分割后,将不连续的图像边界连接为闭合,为图像填充奠定基础。

通过实验可知,针对单一背景残留液晶的识别与分析方法能够精确获得残留液晶边缘,并且控制了噪声的干扰;针对复杂背景残留液晶识别与分析方法能够对背景存在明显差异的特定类型图像(图像中包含有封胶的规则边界)进行准确的处理,去除背景不一致的影响,获得残留液晶的相关数据。几何形状模式识别的结果也验证了之前工作所提出的模式识别模型以及分类器实现的正确性。对于无规律背景液晶图像的处理,尚需进一步研究与改进。

参 考 文 献:

- [1] 李广福,刘玉岭,李薇薇. LCD 残留液晶的清洗[J]. 清洗世界,2006,22(9):24-28.
Li G F, Liu Y L, Li W W. Removal of rudimental LC on LCD [J]. *Cleaning World*, 2006, 22(9): 24-28. (in Chinese)
- [2] Huang Y Y, Gao N, Yu M, *et al.* Detection of surface cleanliness based on image recognition [C]. *IITA '08. Proceedings of the 2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008: 360-365.
- [3] 于洪春,邓意成,郑喜凤. 面积约束下的最优阈值法分割 LED 像素点阵[J]. 液晶与显示,2012,27(5):653-657.
Yu H C, Deng Y C, Zheng X F. Segmentation of LED pixel matrix by using optimal threshold method with area constraint [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 653-657. (in Chinese)
- [4] 丘文涛,赵建,刘杰. 结合区域分割的 SIFT 图像匹配方法[J]. 液晶与显示,2012,27(6):827-831.
Qiu W T, Zhao J, Liu J. Image matching algorithm combining sift with region segmentation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 827-831. (in Chinese)
- [5] 靳永亮,王延杰,刘艳滢,等. 红外弱小目标的分割预检测[J]. 光学精密工程,2012, 20(1): 171-178.
Jin Y L, Wang Y J, Liu Y Y, *et al.* Pre-detection method for small infrared target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 171-178. (in Chinese)
- [6] 吴笑天,鲁剑锋,贺柏根,等. 雾天降质图像的快速复原[J]. 中国光学,2013, 6(6): 892-899.
Wu X T, Lu J F, He B G, *et al.* Fast restoration of haze-degraded image [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 892-899. (in Chinese)
- [7] Wang X F, Zhang X Y, Gao R N. Research of image edge detection based on mathematical morphology [J]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2013, 6(5): 227-236.
- [8] 黄妍妍,姜乐涛,于明,等. LCD 表面液晶污染的非接触检测新算法[J]. 液晶与显示,2009,24(1): 135-138.
Huang Y Y, Jiang Y T, Yu M, *et al.* New method of non-contact inspection for liquid crystal residues on lcds surface [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(1): 135-138. (in Chinese)

[9] Rafael C G. *Digital Image Processing* [M]. 3rd ed. Pearson, 2013.

[10] Zhao H,Chen Z X. A simple hole filling algorithm for binary cell images [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 433-435:1715-1719.

[11] Spasojevic S S,Susic M Z, Durovic Z M. Recognition and classification of geometric shapes using neural networks [C]. 2012 11th *Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (NEUREL)*, 2012:71-76.

[12] Gueheneuc Y G,Albin-Amiot H. A pragmatic study of binary class relationship [C]. 18th *IEEE International Conference on Automated Software Engineering*, Montreal, Canada: ASE 2003, 2003:277-280.

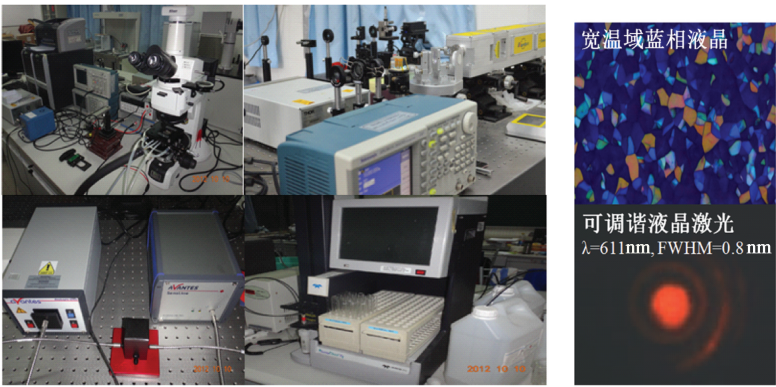
作者简介:黄妍妍(1979—),女,天津人,博士,高级工程师,主要研究方向为微电子学与固体电子学、图像处理与模式识别。E-mail:huangyy@hebut.edu.cn

华东理工大学液晶光子学材料研究小组

华东理工大学具有四十余年液晶材料研究的历史,是国内较早开展液晶材料研究的单位之一。液晶光子学材料研究组继承了几十年的研究基础,由沈冬教授于 2008 年建立,综合考虑研究组的知识结构、背景,结合长远发展的需要,经过几年的努力逐步形成了从材料分子设计材料合成、混配、功能化材料性质测试、分析与性能优化单元器件制备的集材料制备、表征、器件化于一体,具有鲜明特色的研究小组。该课题组目前有教授 1 人,副教授(特别研究员)1 人,在读研究生 9 人。以蓝相液晶材料的合成与性能、结构可控功能材料的合成与性能、可调控液晶微结构材料、液晶光激励材料和有机发光材料的合成为研究重点。

近五年来在国家自然科学基金委、教育部、上海市、华东理工大学以及各企业单位的共同资助下,研究工作稳步推进,取得了一系列成果。利用弯曲形分子诱导获得了稳定的蓝相液晶,提出了获得稳定蓝相液晶的新思想和新方法;开发了在极端低温条件下稳定工作的聚合物稳定蓝相液晶;发现了存在于聚合物稳定蓝相体系内的双稳态现象;实现了液晶自组装体系的微结构多外场调控;制备了不同类型的高性能可调谐液晶激光材料;合成了具备高量子效率的有机发光染料;并且依托“结构可控先进功能材料教育部重点实验室”和“超细材料制备与应用教育部重点实验室”正在进行可控液晶微结构与纳米/液晶复合材料的光学新应用研究。

研究组在过去五年内发表期刊论文 18 篇,其中 SCI 一区、二区 9 篇;受邀进行综述性论文撰稿或评论 2 次;在蓝相液晶方面获美国发明专利和中国发明专利授权各一项,美国发明专利公开 4 项,台湾专利公开 2 项;此外,与国际、国内液晶学术团体保持紧密的联系与合作,受邀做大会邀请报告 4 次,获得来自各学术团体奖项 5 次。



地址:上海市徐汇区梅陇路 130 号
电话:021-64253514(沈冬)

邮编:200237
邮箱:shen@ecust.edu.cn