

## 基于空间梯度信息的自适应边缘算法优化

许梅梅<sup>1a</sup>, 肖琼琳<sup>1a</sup>, 王 璐<sup>1b</sup>, 徐文莹<sup>1a</sup>, 马 跃<sup>2</sup>, 阎志军<sup>1a</sup>

(1. 南京航空航天大学 a. 理学院; b. 自动化学院, 南京 211106; 2. 江苏阿波罗太阳能汽车股份有限公司, 江苏 南通 226612)

**摘 要:** 针对基于阈值分割的多晶硅晶畴检测方法中出现的边缘断点以及伪边缘问题, 提出一种基于空间梯度信息的自适应边缘提取优化算法。对双峰法和 Otsu 法相结合的图像分割算法进行改进, 使分割阈值能够根据图像特征自适应地选取。结合原图的空间梯度信息得到梯度边缘, 将梯度边缘与初始边缘进行综合处理以连接边缘断点并去除伪边缘。实验结果表明, 该算法简单有效, 对不同特征的多晶硅图像均能较好地实现自适应提取完整连续

**关键词:** 多晶硅; 晶畴识别; 图像分割; 边缘优化; 自适应检测

**中文引用格式:** 许梅梅, 肖琼琳, 王 璐, 等. 基于空间梯度信息的自适应边缘算法优化[J]. 计算机工程, 2016, 42(8): 233-236, 242.

**英文引用格式:** Xu Meimei, Xiao Qionglin, Wang Lu, et al. Optimization of Adaptive Edge Algorithm Based on Spatial Gradient Information[J]. Computer Engineering, 2016, 42(8): 233-236, 242.

## Optimization of Adaptive Edge Algorithm Based on Spatial Gradient Information

XU Meimei<sup>1a</sup>, XIAO Qionglin<sup>1a</sup>, WANG Lu<sup>1b</sup>, XU Wenyong<sup>1a</sup>, MA Yue<sup>2</sup>, YAN Zhijun<sup>1a</sup>

(1a. College of Science; 1b. College of Automation Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Jiangsu Apollo Solar Vehicle Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226612, China)

**[Abstract]** In order to solve the edge breakpoint and pseudo edge problem occurred in the detection of polycrystalline silicon crystal domain based on threshold segmentation, an adaptive edge extraction optimization algorithm based on spatial gradient information is proposed. The image segmentation algorithm combining bimodal method and Otsu's method is modified, so that the segmentation thresholds are selected adaptively according to the image characteristics. The gradient edge is extracted by using spatial gradient information of the original image. The edge breakpoint can be connected and the pseudo edge can be removed by combining the gradient edge and initial edge. Experimental results show that the proposed algorithm is simple and effective. Completed and continuous edges can be extracted adaptively for polycrystalline silicon images with various characteristics.

**[Key words]** polycrystalline silicon; recognition of crystal domain; image segmentation; edge optimization; adaptive detection

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.08.041

### 1 概述

为提高太阳能电池的转化效率, 降低生产成本, 工厂需要对多晶硅衬底进行质量检测与筛选, 检测的主要指标之一是多晶硅衬底的结晶度。结晶度主要由衬底上晶畴的个数、面积决定<sup>[1]</sup>。在目前的工业生产中, 基本采用人工目测的方法对硅片晶畴进行检测, 为了避免人工目测的缺陷, 企业需要相应的

智能检测系统。此智能系统的核心部分是利用数字图像处理技术, 尽可能实现处理程序各项参数的自动设定, 自动化识别晶畴并进行相应统计。

多晶硅图像具有对比度低、亮度不均匀等特点。一些传统的边缘检测算法如 Sobel 算子、Roberts 算子、Prewitt 算子和 LOG 算子等具有计算简单、容易实现的特点, 但对噪声比较敏感, 抗干扰性比较差。若直接使用这些算法对复杂目标图像边缘进行检

**作者简介:** 许梅梅(1990-), 女, 硕士研究生, 主研方向为光测技术、信息处理; 肖琼琳、王 璐、徐文莹, 学士; 马 跃, 博士; 阎志军, 副教授、博士。

**收稿日期:** 2015-07-22 **修回日期:** 2015-09-13 **E-mail:** xmmlhj@163.com

测,则结果比较差,容易产生伪边缘。近年来,随着各种新技术、新理论的发展,出现了一些新兴的边缘检测算法,如基于数学形态学与小波变换的边缘检测算法<sup>[2-4]</sup>、基于自适应双阈值的 SUSAN 算法<sup>[5]</sup>、蚁群算法<sup>[6-8]</sup>、神经网络<sup>[9]</sup>、改进的抗噪形态学边缘检测算法<sup>[10-11]</sup>。这些算法能够较好地抑制噪声的影响,但计算量比较大,同时对于一些对比度比较低的图像,检测出的边缘连续性欠佳。Kirsch 算子<sup>[12]</sup>在低对比度图像边缘检测中一直被广泛应用,它采用 8 个模板进行检测,能较好地保持图像的细节,但也存在计算量大、检测运行时间长、边缘连续性较差、容易丢失弱边缘等缺点。针对多晶硅图像的特性,文献[13]提出了一种双峰法与 Otsu 法相结合的算法,该算法利用双峰法选出所有可能的分割阈值,然后采用 Otsu 法选出最佳阈值,其特点是能够自适应地选出阈值个数及阈值取值,能够较好地保留图像细节,且运算速度很快。但由于多晶硅图像是典型的低对比度图像,有时不同目标之间的灰度过渡很缓慢,在分割过程中会难以准确分割,从而产生边缘断点。如何使边缘保持连续性,学者们提出了各种边缘连接的方法。文献[14]选择具有单一形态的结构元素去量度、提取图像中对应的边缘,该方法很难自适应地连接不同类型的边缘。蚁群算法<sup>[15]</sup>是另一种典型的边缘连接方法,它通过选择连接最佳路径实现对断点的连接。然而蚁群算法运行速度较慢,难以适用于实时边缘连接中。即使文献[16]改进了蚁群算法,其运行效率仍然较低。

本文对结合双峰法和 Otsu 法的图像分割算法进行改进,并提出一种采用空间梯度信息对边缘断点进行连接的优化算法。在图像分割过程中,文献[13]使用了固定的经验值来去除伪波峰及伪波谷以确定最佳阈值个数,本文改为程序自适应选取,尽量避免在复杂目标图像中出现不完全分割。然后利用梯度直方图自适应选取阈值,提取梯度边缘,通过将初始边缘与梯度边缘进行综合处理实现边缘断点的连接。

## 2 双峰法与 Otsu 法相结合算法的改进

多晶硅图像对比度比较低,而且可能由于表面上光照不均而造成图像明暗发生明显变化,所以提出了基于阈值分割的多晶硅晶畴检测方法。其具体分割过程为:首先将整个图像分成若干子块,在每一子块内通过结合双峰法与波形对称性分析得到阈值个数及阈值的初步取值,然后利用最大类间方差法精确确定阈值。在结合双峰法确定阈值个数及阈值取值时,由于直方图中存在较小的干扰波峰及波谷,它们会对正确的阈值选取形成干扰。为了排除这些

干扰峰与谷的影响,采用 2 个手段进行鉴别:(1)波峰的峰值需大于一定值;(2)波谷与相邻的两波峰值中之差至少有一个需大于一定值。在这 2 种筛选办法中的定值均为特定经验值,对于不同特征的图像适应性不同。特别是在复杂目标图像中,恒定的经验值常常导致不完全分割现象的出现。为改善算法适应性,经过大量图像特征分析,本文采取比例设定的办法,从而使得程序在面对不同特征图片时具有更广泛的适应性。具体操作为:

(1)通过直方图中的极值点寻找阈值。直方图中灰度级  $g$  的频率  $N(g)$  的一阶差分可表示为:  $N'(g) = N(g+1) - N(g)$ 。若一阶差分  $N'(g)$  在某处由正值变为负值,则该处为直方图的峰点,相反若由负值变为正值,该处则为直方图的谷点。将所有的极大值用数组  $\max[j]$  表示,极小值用数组  $\min[j]$  表示。排除多余的极大极小值有 2 个筛选办法:(1)所寻找到波峰峰值需大于一定值,即  $\max[j] \geq Z_1$ ,  $Z_1$  取值为子块内包含所有像素点数/100。(2)波谷与相邻的两波峰值中之差至少有一个需大于一定值,即  $\max[i] - \min[j] > Z_2$  或者  $\max[i+1] - \min[j] > Z_2$ ,  $Z_2$  取  $\max[j]$  中的最大值/10。将筛选出的波谷值作为可能的阈值组合,用  $T[j]$  表示。

(2)对已经找到的  $T[j]$  中的阈值进行筛选。 $T[j]$  中可能存在灰度相近的阈值,若不经筛选将会造成不必要的分割。满足下列条件之一的阈值予以保留:1)两阈值间存在一极大值,即  $T[j] < \max[\forall] < T[j+1]$ 。2)两阈值分割得到的区域面积应大于某一定值  $Z_3$ , 即  $\sum_{j=th[i]}^{th[i+1]} h(j) > Z_3$ ,  $Z_3$  取值为  $N/15$ 。

(3)在已经获得的阈值组合  $T[j]$  数组中,每个阈值都不一定是最佳的阈值选择,需要对每一阈值进行适当的微调,文中使用在每个阈值左右各取 5 个灰度作为微调区域,通过在局域使用 Otsu 法来确定最佳阈值。

## 3 边缘优化

图像分割后利用 Sobel 算子提取出的边缘称为初始边缘。由于阈值分割会产生一些不完全分割以及过度分割,因此提取出的初始边缘中存在许多边缘断点以及一些伪边缘。为提高边缘的准确度,须对伪边缘进行移除并找回丢失的边缘。

### 3.1 边缘断点连接

使用梯度算子进行边缘提取时,若阈值设置得偏低,则图像中的强弱边缘都能被保留,但也容易产生伪边缘;若阈值设置得偏高,则图像中的较强边缘被保留,但一些较弱的边缘容易丢失,不过提取出的边缘一定为真正的边缘。后文称较低阈值为小阈值,较高阈值为大阈值。本文首先在梯度直方图中

使用 Otsu 法自适应地得到大阈值,提取出的边缘称为梯度边缘,然后将梯度边缘与初始边缘相结合,进行综合处理以对初始边缘中的断点进行连接。具体思路是:扫描初始边缘中的非边缘点,若此像素点在梯度边缘中被标记为边缘点,则将此像素点在初始边缘中定义为边缘点,直到将初始边缘中所有非边缘点扫描完毕。以下为具体步骤:

(1) 获得梯度直方图。利用 Sobel 梯度算子计算消噪后图像中每一个像素点的梯度值,得到梯度直方图。

(2) 自适应选阈值。使用 3 类最大类间方差法自适应地选出 2 个阈值,将较大阈值作为梯度边缘提取的阈值。

(3) 提取梯度边缘。使用大阈值提取图像的边缘作为梯度边缘。

(4) 边缘连接。自上而下、自左向右扫描初始边缘,若某一点  $P[i,j]$  为非边缘点,扫描梯度边缘中对应的像素点  $T[i,j]$ ,若  $T[i,j]$  为边缘点,将  $P[i,j]$  定义为边缘点,若  $T[i,j]$  为非边缘点,则寻找下一个非边缘点。此程序不断循环,直到初始边缘中所有非边缘点被扫描完毕。

### 3.2 伪边缘去除

伪边缘的出现主要有以下 3 个原因:(1) 阈值分割过程中由于分块,在每个子块的边界处出现伪边缘。(2) 在每一个子块内可能会出现过度分割,导致初始边缘中会存在一些伪边缘。(3) 提取梯度边缘过程中,一些梯度较大的噪点也会被误认为边缘而被提取出来。本文通过 2 种手段去除这些伪边缘:对于孤立的伪边缘点,可以直接通过去点操作将其移除;对于部分连续封闭的伪边缘,若面积小于一定数值则予以去除。具体步骤如下:

(1) 对连接后的边缘图像自上而下、自左向右进行扫描,当扫描到一个未被标记的边缘点将其作为种子点并标记。

(2) 扫描被标记的种子点其周围 8 个像素点,若存在边缘点,则将它们作为种子点并标记。

(3) 扫描新的种子点周围 8 个像素点,返回步骤(2),直到没有可以被标记的种子点,则认为一个区域统计结束,记录下这个区域被标记像素点的个数。返回步骤(1)重复进行,直到图像扫描完毕。

(4) 若一个区域被标记的像素点个数小于 100 个,本文将其认为是伪边缘,并将其去除。

## 4 实验结果及分析

本文对图像进行处理和分析的实验平台是: Intel Core i3-3220(3.30 GHz),内存 3.0 GB 的计算机平台。

实验工具:BCB6。为了证明本文方法在不同特征的图像中都有较好的结果,选取 3 种不同特征的典型多晶硅图像为实验对象。由于大尺寸图像不便于观察图像优化效果,这里展示 300 像素  $\times$  300 像素的硅片图像的实验结果。

首先展示本文方法与 Otsu 法及文献[13]中方法分割结果的区别。

对比图 1(b)和图 1(d),可以看出 Otsu 法因过度分割而产生了许多碎块,而本文方法产生的碎块则少得多。这是因为 Otsu 法所取阈值个数偏多,产生了过度分割。本文方法结合了双峰法,充分利用了频域信息以选取正确阈值个数与取值,大大减少了过度分割的情况。比较图 1(c)和图 1(d),可以看出文献[13]中的方法因过度分割而产生许多碎块,而且对于复杂目标图像,还会导致不完全分割。这是因为文献[13]中的方法使用了固定的经验值来去除伪波峰及伪波谷以确定最佳阈值个数,对于不同特征的图像适应性不同。而本文方法是根据图像特征自适应地选取参数,从而找到了准确的阈值个数和取值,使得在每个子块内都能够得到较好的分割结果。



图 1 分割结果对比

接下来展示本文边缘优化方法的中间结果与最终结果。本文方法主要通过将双峰法与 Otsu 相结合的方法对原始图像(图 2(a))分割后得到的初始边缘(图 2(b))与自适应阈值的梯度算法提取的梯度边缘(图 2(c))进行综合处理,以实现边缘的优化(图 2(d))。

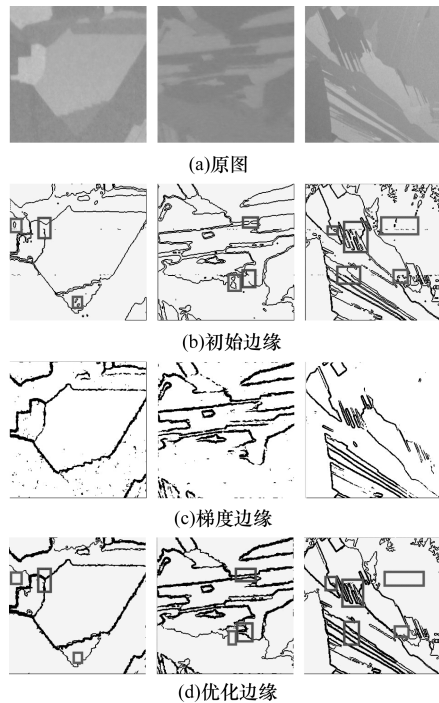


图2 边缘优化过程

对比图 2(b) 和图 2(d) 可以看出, 初始边缘中由于不完全分割出现了边缘断点, 本文将梯度边缘与初始边缘结合, 可以很好地将边缘断点进行连接。对于一些孤立的伪边缘点以及一些连续封闭但面积较小的伪边缘, 本文可以相对有效地去除。

本文方法的有效性可以通过对比本文方法与文献[10]改进的抗噪形态学边缘检测算法及蚁群算法得到的结果得到证实。

图 3(a) 是原图, 图 3(b) 是文献[10]改进的形态学边缘检测算法提取出的边缘, 图 3(c) 是使用蚁群算法对边缘进行连接的结果, 图 3(d) 是本文方法得到的边缘。通过使用改进的抗噪形态学边缘检测算法提取出的边缘与本文方法提取出的边缘进行对比, 可以看到使用改进的抗噪形态学边缘检测算法有些边缘无法正确检测出来, 有些检测出来的边缘会存在很多断点, 边缘连续性不好。改进的抗噪形态学边缘检测算法对于低对比度图像的去噪效果也不好, 仍有很多噪点没有滤除。这是由于形态学边缘检测算法是用具有一定形态的结构元素去量度、提取图像中对应的边缘, 因此检测出的边缘细节不完整。通过对蚁群算法和本文方法边缘连接的结果进行比较, 从图中可以看出蚁群算法对于一些复杂目标图像不能很好地根据原图边缘方向进行断点连接。从图中可以看出蚁群算法还会导致连接后出现伪边缘。这是因为蚁群算法没有结合原图边缘的方向信息进行边缘连接。而本文方法结合了原图的空间信息, 将初始边缘与梯度边缘相结合对边缘进行优化, 从而保证图像中的真正边缘被提取出来, 提取出的边缘效果较好。

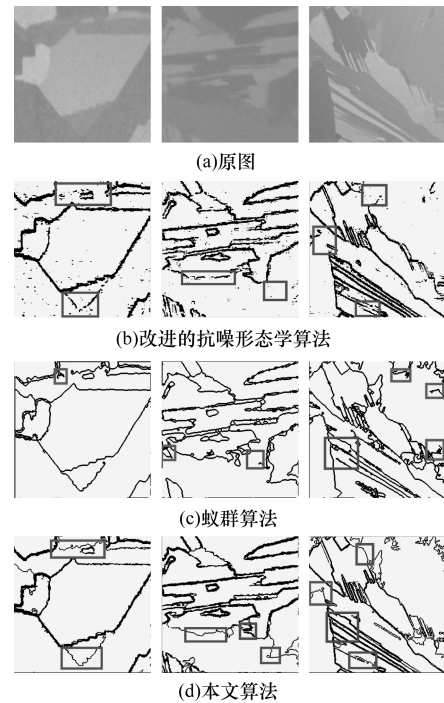


图3 最终提取出的边缘结果对比

## 5 结束语

为实现多晶硅晶畴的自动化准确检测, 本文提出一种结合空间梯度信息对边缘断点进行连接的优化算法。在图像分割过程中, 所取阈值能够根据图像特征自适应地选取, 使得在每个子块内都能得到较好的分割结果; 在边缘优化过程中, 将初始边缘与梯度边缘进行结合处理以实现边缘断点的连接, 并通过去点操作和去除面积较小的区域去除伪边缘, 从而进一步提升了边缘提取的效果。将本文方法与改进的抗噪形态学边缘检测算法及蚁群算法得到的结果进行对比, 实验结果表明, 本文方法简单而且对于不同目标特征的多晶硅图像边缘提取效果更好, 这使多晶硅晶畴自动检测算法得到了进一步优化, 可以拓宽应用到遥感、医学诊断、目标识别与跟踪等研究领域的低对比度图像中。为最大可能保证晶畴区域的连通性, 下一步不仅要结合空间梯度信息进行边缘优化, 还要结合边缘的方向信息进行边缘断点的连接。

## 参考文献

- [1] 吴 斌, 汪建华, 满卫东, 等. 多晶硅薄膜太阳能电池的研究现状[J]. 世界科技研究与发展, 2008, 30(6): 688-693.
- [2] 许 端, 董文锋, 潘自凯, 等. 基于数学形态学与小波变换的边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(S2): 165-167.
- [3] Xiong Yu, Li Jun, Zuo Xiaoqing, et al. Research on an Edge Detection Algorithm of Remote Sensing Image Based on Wavelet Enhancement and Morphology[J]. Journal of Computers, 2014, 9(5): 1247-1252.

(下转第 242 页)

Gaussian 滤波器获得最佳的评价水平。基于优化的 Gaussian 滤波器加权因子,对峰值信噪比(PSNR)评价算法及奇异值分解(M\_SVD)评价算法分别进行改进。实验结果表明,改进 PSNR 算法的 SROCC,CC 和 RMSE 指标分别提高了 3.78%、2.40% 和 2.02%,达到或超过了 SSIM 算法;改进 M\_SVD 算法的对应指标分别提升了 1.78%、0.67% 和 4.99%。可见,改进算法保持了较好的评价稳定性和评价实时性。下一步将结合人类视觉系统的感知特性,探讨融合图像质量局部评价结果的优化算法。

#### 参 考 文 献

- [1] 蒋刚毅,黄大江,王旭,等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报,2010,32(1):219-226.
- [2] 杨春玲,汪凡. 基于结构相似度的 CT 域图像质量评价方法[J]. 计算机工程,2010,36(14):190-192.
- [3] 张允赛,陈忠君. 基于视觉敏感度的 JPEG 图像质量评价[J]. 计算机工程,2011,37(19):191-193.
- [4] 米曾真. 小波域中 CSF 频率与方向加权的图像质量评价方法[J]. 电子学报,2014,42(7):1273-1276.
- [5] Sheikh H R, Sabir M F, Bovik A C. A Statistical Evaluation of Recent Full Reference Image Quality Assessment Algorithms[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2006,15(11):3441-3452.
- [6] Wang Zhou, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image Quality Assessment; From Error Visibility to Structural Similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2004,13(4):600-612.
- [7] Shnayderman A, Gusev A, Eskicioglu A M. An SVD-based Grayscale Image Quality Measure for Local and Global Assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2006,15(2):422-429.
- [8] Sheikh H R, Bovik A C, Veciana G D. An Information Fidelity Criterion for Image Quality Assessment Using Natural Scene Statistics[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2005,14(12):2117-2128.
- [9] Zhang Lin, Shen Ying, Li Hongyu. VSI: A Visual Saliency-induced Index for Perceptual Image Quality Assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2014,23(10):4270-4281.
- [10] Ding Yong, Wang Shaoze, Zhang Dong. Full-reference Image Quality Assessment Using Statistical Local Correlation[J]. Electronics Letters,2014,50(2):79-81.
- [11] Sheikh H R, Bovik A C. Image Information and Visual Quality [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2006,15(2):430-444.
- [12] Hu Anzhou, Rong Zhang, Dong Yin, et al. Image Quality Assessment Using a SVD-based Structural Projection[J]. Signal Processing: Image Communication,2014,29(3):293-302.
- [13] Zhang Lin, Zhang Lei, Mou Xuanqin, et al. FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2011,20(8):2378-2386.
- [14] Qi Huan, Jiao Shuhong, Lin Weisi, et al. Content-based Image Quality Assessment Using Semantic Information and Luminance Differences [J]. Electronics Letters,2014,50(20):1435-1436.
- [15] Xue Wufeng, Zhang Lei, Mou Xuanqin, et al. Gradient Magnitude Similarity Deviation: A Highly Efficient Perceptual Image Quality Index [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2014,23(2):684-695.
- [16] Larson E C, Chandler D M. Most Apparent Distortion: Full-reference Image Quality Assessment and the Role of Strategy [J]. Journal of Electronic Imaging,2010,19(1):143-153.
- [4] Lgor Z, Dietmar S, Karsten L. A Morphological Approach for Distinguishing Texture and Individual Features in Images [J]. Pattern Recognition Letters,2014,47(10):129-138.
- [5] 钟顺虹,何建农. 基于自适应双阈值的 SUSAN 算法[J]. 计算机工程,2012,38(3):206-209.
- [6] Gupta C, Gupta S. Edge Detection of an Image Based on Ant Colony Optimization Technique [J]. International Journal of Science and Research,2013,2(6):114-120.
- [7] Liu Xiaochen, Fang Suping. A Convenient and Robust Edge Detection Method Based on Ant Colony Optimization[J]. Optics Communications,2015,353(8):147-157.
- [8] Koner S, Acharyya S. Ant Colony Optimization Variants in Image Edge Detection [C]//Proceedings of International Conference on Communications and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press,2014:1228-1232.
- [9] Sayed E, Khafagy Y. Automated Edge Detection Using Convolutional Neural Network [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications,2013,10(4):11-17.
- [10] 邓彩霞,王贵彬,杨鑫蕊. 改进的抗噪形态学边缘检测算法[J]. 数据采集与处理,2013,28(6):739-745.
- [11] Han Lu, Han Aili. An Improved Edge Detection Algorithm Based on Morphological Operators and Gradient [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience,2015,12(7):1121-1125.
- [12] Kirsch R. Computer Detection of the Constituent Structure of Biological Image [J]. Computers and Biomedical Research,1971,4(3):315-328.
- [13] 黄世涛,阎志军,王丹. 基于阈值分割的多晶硅晶畴检测方法[J]. 现代计算机,2011(24):28-32.
- [14] Hajjar A, Chen T. A VLSI Architecture for Real-time Edge Linking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1999,21(1):89-94.
- [15] Hu Hui, He Juhou, He Xiuqing. Edge Linking Method Based on Fuzzy Theory and Ant Colony Algorithm [J]. Computer Engineering and Applications,2014,50(3):168-172.
- [16] 何志良. 基于蚁群算法的图像边缘提取改进方法[J]. 计算机应用,2014,34(S2):295-297.

编辑 陆燕菲

编辑 顾逸斐

(上接第 236 页)