

基于激光光散射层貌术的蓝宝石内部缺陷检测系统

刘 洋¹ 徐文东¹ 赵成强¹ 胡永璐¹ 刘 涛¹ 王 闯²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
² 国家纳米科学中心, 北京 100190

摘要 蓝宝石是制作发光二极管(LED)衬底的基本材料,其质量直接影响高亮度 LED 衬底的晶片制造成品率,对于棒状蓝宝石晶体内部缺陷的检测定位能极大地降低生产成本,提高成品率。针对蓝宝石衬底加工要求,在机器视觉技术的基础上,利用 LabVIEW 及 NI 公司的图像采集卡和数据采集卡搭建了一个基于激光光散射层貌术的蓝宝石内部缺陷检测定位系统。系统利用高强度的线状激光照射下缺陷产生的光散射效应对蓝宝石晶体进行逐层扫描和图像采集,运用图像增强、图像分割及图像提取等图像处理手段对采集到的图像进行缺陷提取和分析,实现了对蓝宝石内部缺陷的检测和定位,具有很高的实时性和可视化效果。实验结果表明,该系统能有效地识别出蓝宝石晶体中的散射颗粒缺陷,并对其在棒状蓝宝石晶体深度方向上准确定位。

关键词 激光光学; 机器视觉; 缺陷检测; 散射; 图像分析

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0902007

A Detecting System of Sapphire Internal Defects Based on Laser Light Scattering Tomography

Liu Yang¹ Xu Wendong¹ Zhao Chengqiang¹ Hu Yonglu¹ Liu Tao¹ Wang Chuang²

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China

Abstract As the basic material of light emitting diode (LED) substrate, the quality of sapphire directly affects the production yield of high-brightness LED substrate chips. The detection and positioning of internal defects in sapphire crystal bar can greatly reduce the production cost and improve the yield. Based on machine vision technique, an internal defect detection and positioning system are built for sapphire on the basis of laser light scattering tomography taking the processing requirements on sapphire substrate into consideration. LabVIEW and image acquisition card and data acquisition card from NI Company are adopted in this system. The detection and positioning of internal defects in sapphire crystal is realized by scanning the sapphire crystal layer by layer through the light scattering effect generated by the irradiation of high-intensity linear laser on defects. A lot of image processing methods such as image enhancement, image segmentation and image extraction are adopted to extract and analyze the defects, enhancing the real-time performance and visibility of this system. The experimental results show that this system can identify the scattering particle defects in sapphire crystal effectively, and position them in depth direction accurately.

Key words laser optics; machine vision; defect detection; scattering; image analysis

OCIS codes 140.3460; 150.0155; 110.2970; 100.2960

1 引 言

作为目前全球最受关注的新一代光源,发光二极管(LED)因其适用性好、亮度高、低热量、长寿命、环保无毒、可回收再利用等优点,被称为 21 世纪最

具有发展前景的绿色照明光源。作为 LED 生产的基本材料,蓝宝石衬底因其生产技术成熟、稳定性好、价格适中等显著优点广泛运用于 LED 的工业生产中。但是由于蓝宝石具有仅次于金刚石的超高硬

收稿日期: 2014-03-26; **收到修改稿日期**: 2014-04-21

作者简介: 刘 洋(1988—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: visionly@foxmail.com

导师简介: 徐文东(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光直写与关联成像等方面的研究。

E-mail: xuwendong@mail.siom.as.cn

度,导致蓝宝石加工成本极高^[1-5]。本文主要目的就是対棒状蓝宝石晶体(直径 $\phi=50\text{ mm}$,长度 $L=150\text{ mm}$)内部的散射颗粒缺陷(包括气泡、杂质等,俗称点子)进行检测定位,这些缺陷的存在会严重影响 LED 晶片制造和氮化镓(GaN)生长的金属有机化学气相沉积(MOCVD)过程。对于这些缺陷的准确定位有利于在切片过程中避开这些缺陷,保证材料的充分利用,降低后期加工的工作量,以达到降低生产成本,提高生产效率和成品率的目的。目前工业生产中普遍使用 GT 公司开发的光学均匀性(OHT)分级技术中的人工高亮度光照检测手段对蓝宝石内部散射颗粒缺陷识别定位,检测效率和精度较低。为了满足工业生产的需求,降低蓝宝石衬底生产成本,本检测系统需要具备高精度和高速度的检测特点,并能达到百微米级的定位精度。

机器视觉具有测量精度高,响应速度快等特点,在缺陷检测领域得到了广泛的应用^[6-7]。本文采用激光光散射层貌术代替了普遍使用的高强度光照法,将机器视觉和扫描技术相结合,采用极细的线状激光对晶体进行逐层扫描,与 X 射线形貌术相比,具有无需切割,可观测任意厚度样品的优点^[8-9]。本系统结合了高强度光照法和机器视觉的优势,在保证检测精度的同时实现了蓝宝石内部缺陷的在线检测,大大提高了检测效率,具有很高的工程实用价值。

2 总体设计及硬件实现

目前工业生产中普遍采用的高强度光照检测法步骤如下:利用折射率匹配液提高晶棒透度后,用高强度光穿透整个晶棒,并由经过培训的技术人员识别晶棒上的气泡、裂纹以及杂质缺陷,并标记相应的缺陷位置,依据缺陷的出现频率和大小分布对材料分级,由于人眼难以对空间距离进行准确判断,该方法的精度和效率都受到极大限制。本文针对高强度光照法的缺点进行了改进,利用极细的高亮度激光将蓝宝石晶棒分层,把对空间上蓝宝石缺陷的定位转变为对光束所在位置的定位,并用机器视觉代替了人眼识别,减少了误差并提高了效率。

本文搭建的蓝宝石内部缺陷检测系统如图 1 所示,其工作流程分为如下两个步骤:1) 逐层扫描采集图像。步进电机根据程序驱动升降台分别带动激光器和相机上下移动对棒状蓝宝石晶体进行逐层扫描,将通过电荷耦合器件(CCD)观察到的图片按序保存到系统中;2) 图像分析和缺陷识别。高亮度的激光照射到晶体内部缺陷上时会产生相应的缺陷散射光斑,将采集到的图像进行处理和分析后可识别出缺陷,通过分析图片的序号可以获得缺陷的深度信息,并将相应的缺陷信息保存到系统中并显示。

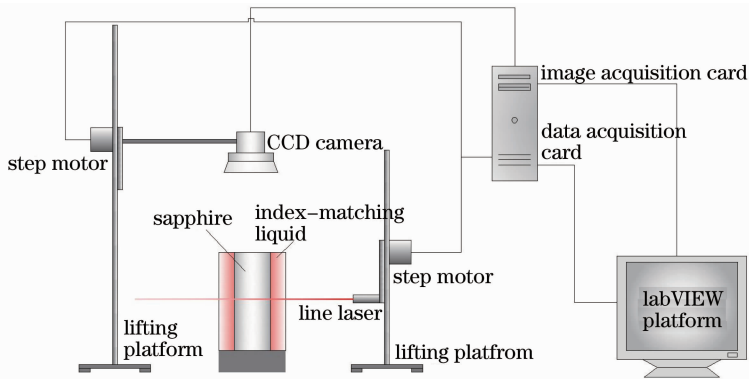


图 1 蓝宝石内部缺陷检测系统结构图

Fig. 1 Schematic of sapphire internal defect detection system

如图 1 所示,蓝宝石内部缺陷检测系统硬件设备主要由两个电控升降台、高亮度的线状激光光源和相机等组成。光源和相机分别安装在两个电控升降台上从下往上扫描,采用了 Pike F421B 型 CCD 相机,其最高分辨率为 $2048\text{ pixel}\times 2048\text{ pixel}$,像素尺寸为 $7.4\text{ }\mu\text{m}\times 7.4\text{ }\mu\text{m}$,传感器尺寸为 $15.15\text{ mm}\times 15.15\text{ mm}$;镜头采用 Navitar HR F2/35 mm,焦距为 35 mm;光源则采用了具有线光斑的半导体激光

器,其输出功率为 200 mW,光束最细处宽度为 0.5 mm。激光光束照射在蓝宝石上可获得内部散射颗粒的特征信息,用于内部缺陷的提取和检测。

考虑到蓝宝石直径,选择了 $F=60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的视野大小,由此可以得到初始的工作距离

$$f = (C \times W_d) / F \Rightarrow W_d = (35 \times 60) / 15.15 \approx 140\text{ mm}$$

式中 f 为镜头焦距, C 为摄像机成像传感器装置的

尺寸, W_d 为工作距离, 指的是摄像机镜头与被观察物体或区域之间的距离, 如图 2 所示。

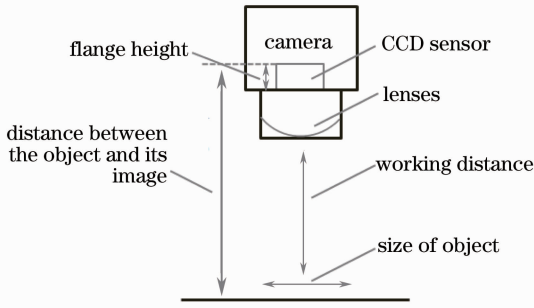


图 2 工作距离示意图

Fig. 2 Schematic of working distance

由于蓝宝石具有很高的折射率($n_1 = 1.768$), 采用了和其折射率相近的 1-溴萘(分子式 $C_{10}H_7Br$, 折射率为 1.6570)作为折射率匹配液来提高未抛光蓝

宝石晶棒的透度, 如图 1 所示。同时由于蓝宝石高折射率的影响, 为了在逐层扫描的过程中能够实时准确对焦, 需要实时标定工作距离 W_d , 以保持光程 l 不变。在均匀介质中, 光程 l 定义为几何路程 s 与介质折射率 n 的乘积 $l = n \cdot s$ 。由此可以推出光源位移 s_1 、光程 l_1 与镜头位移 s_2 、光程 l_2 应当在每次采集图片时保持如下关系:

$$l_1 = l_2 \Rightarrow n_1 \cdot s_1 = n_2 \cdot s_2 \Rightarrow s_2 = n_1 \cdot s_1 / n_2 = 1.768s_1, \quad (1)$$

式中空气折射率 $n_2 = 1$, 当光源的移动距离为蓝宝石晶棒的长度即 $s_1 = L = 150 \text{ mm}$ 时, 相机的移动距离为 $s_2 = 1.768s_1 = 265.2 \text{ mm}$ 。经过综合考虑, 选用了北京微纳光科仪器有限公司的 WN230TA200M 和 WN230TA400M 型电动移动台, 行程分别为 200 mm 和 400 mm, 具有良好的重复定位精度和绝对定位精度, 主要参数如表 1 所示。

表 1 升降台主要参数

Table 1 Main parameters of the lifting platform

Type	Travel / mm	Lead / mm	Resolution / μm	Maximum speed / (mm/s)	Repeatability / μm	Absolute accuracy / μm	Straightness / μm
WN230TA200M	200	4	20	40	5	8	6
WN230TA400M	400	5	25	50	5	8	8

同时由(1)式可知, 要保持准确对焦, 当光源总位移为 y_1 时, 镜头的理论总位移 $y_2 = 1.768y_1$, 但是由于步进电机运动距离是以步距为基数的离散值, 所以本文采用取整的方式对理论移动距离进行修正, 为了避免按进给量取整带来的累积误差, 采用按激光器总位移四舍五入的取整方式来修正镜头位移, 即

$$y'_2 = 25 \cdot \lfloor (1.768 \times y_1) / 25 + 0.5 \rfloor, \quad (2)$$

式中 $\lfloor x \rfloor$ 表示不大于 x 的最小整数, $\lfloor x + 0.5 \rfloor$ 表示对 x 四舍五入取整, 由此可以得到修正后的镜头第 n

次进给量 D_n 为

$$D_n = y'_{2n} - y'_{2n-1}, \quad (3)$$

式中 y'_{2n} 代表第 n 次采集时镜头的理论位移且有 $y'_{2_0} = 0$, 由(3)式可以根据光源升降台每次的进给量得到相机升降台的进给量, 该过程通过编程实现。在由下到上的逐层扫描过程中, 工作距离逐渐增大, 视野也随之增大。

3 软件部分

软件系统采用图形化编程语言 LabVIEW 来进

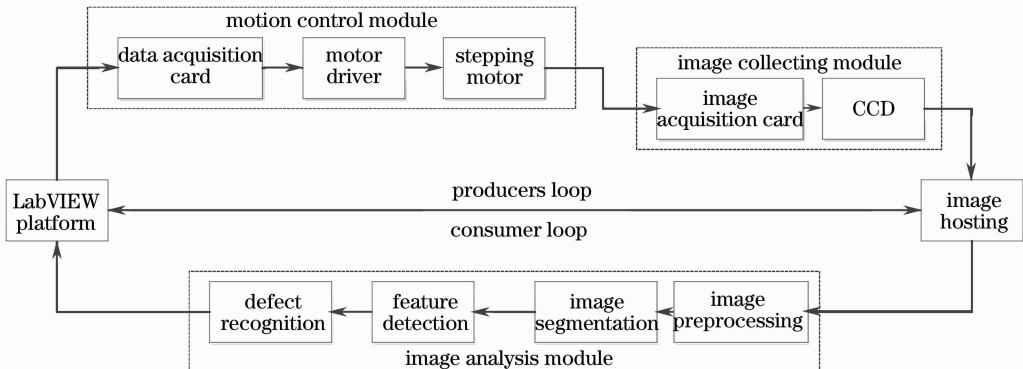


图 3 系统工作流程图

Fig. 3 System workflow chart

行运动控制、图像采集和图像处理分析。系统工作流程如图 3 所示,该软件系统主要分为运动控制模块,图像采集模块和图像分析模块。

为了提高运行效率,运动控制模块和图像采集模块采用串行处理方式,图形采集模块和图像分析模块采用并行处理方式,即生产者/消费者结构。该结构是多个程序并行执行和基于队列的循环之间的数据传输,具有提高程序运行的效率和程序设计的灵活性的优势,同时满足了数据缓存的需要以防止数据丢失^[10-11]。

3.1 运动控制

由于要对整个棒状蓝宝石晶体进行检测并确定散射颗粒的深度信息,因此在每次采集图片之前需要控制升降台完成进给,该过程通过 While 循环和 Case 结构来实现,当循环条件为真时,运行运动控制模块,当循环条件为假时,运行图像采集模块,CCD 能采集到的图片如图 4 所示。

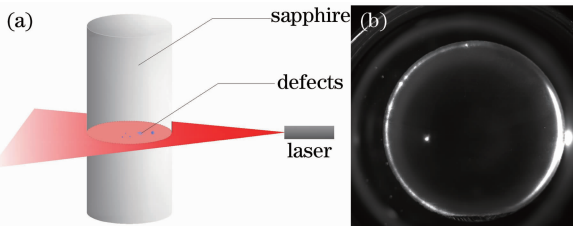


图 4 缺陷检测系统。(a) 示意图;(b) 视场下的图片

Fig. 4 Defect detection system. (a) Sketch map;
(b) captured image

在不对电脉冲进行细分的情况下,光源升降台最小进给量为 20 μm ,为了使本系统具有更加广泛

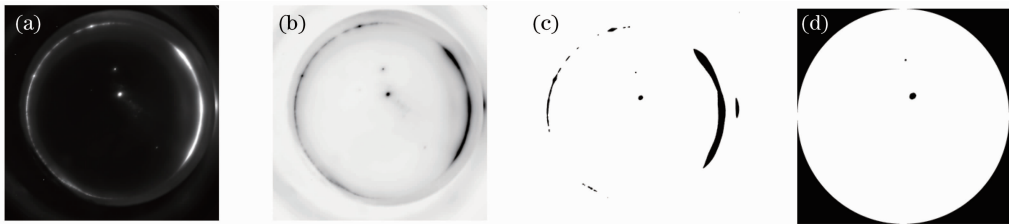


图 5 图像处理和过程。(a) 初始图片;(b) 预处理结果;(c) 图像分割结果;(d) 特征提取结果

Fig. 5 Image processing and analysis. (a) Original image; (b) preprocessing; (c) image segmentation;
(d) feature extraction

4 实验及分析

检测系统经过安装调试后,初始化检测软件,设定图片和数据保存位置,然后根据需要设定光源升降台进给量和行程。本系统采用 PCI-6259 型数据采集卡发出脉冲信号驱动光源升降台,考虑到系统需求和检测效率设置光源进给量为 0.1 mm。检测系统启动

的实用性,可以根据需要来更改总行程和进给量。

3.2 图像采集和图像分析

图像采集是由原始景物获得图像的过程,主要是通过图像采集卡来获得图像。为了从采集到的图像中获得图像信息,则需要对图片进行相应的信息提取。本文采取了如图 3 所示的图像分析步骤^[12-13]。

图像预处理的目的是校正采集图像过程中产生的失真,减少图片噪声,改善图片质量。由于获得的检测目标与背景有很大反差,采用了常规的线性灰度变换使得图像反转。图像滤波则采用了典型的非线性滤波方式中值滤波,能够有效地清除孤立的噪声像素点,同时保证了图像的细节。图像分割是指把图像分成各具特性的区域并提炼出感兴趣的目标的技术和过程。阈值分割法是最常见的并行的直接检测区域的分割方法,由于本系统获得的图像中检测目标和背景的像素在灰度值上有较大差别,因此可以使用全局阈值,并采用极小值点阈值法来确定阈值。

经过图像分割后,图像的主要信息集中在一个或几个少数的关键区域中,由于光束照射在晶体壁上也会有大量的散射光斑,因此图像上仍含有大量的冗余信息。为了提高图像分析的效率和准确度,采用提取感兴趣区域(ROD)的方法,即定义一个标准的轮廓将图像的一部分进行重点处理和分析,能有效地排除外部光斑带来的影响。检测到缺陷目标后,利用子 VI: IMAQ Particle Analysis VI 还可以得到相应的缺陷参数,图像分析处理的结果如图 5 所示。

之后对蓝宝石晶棒逐层扫描照相,保存相应的缺陷图片,经过分析得出缺陷所在位置深度信息。

为了保证测量精度,应当设置好光源初始位置,保证光束刚好不照射到蓝宝石晶体上,光束应保持水平方向照射并垂直照射在蓝宝石晶棒上。检测过程中,由于激光光束宽度(0.5 mm)大于进给量

(0.1 mm),因此在激光器移动过程中,当光束上边缘照射到缺陷至光束下边缘离开缺陷的过程中,缺陷都会发光,这会使得记录到的缺陷出现在连续的多张图片上,直接记录会造成检测到的缺陷在深度方向上的位置被放大,不过这种放大是有规律的,可以通过软

件系统进行相应的校正,校正后对蓝宝石内部缺陷的定位精度直接关联于光源升降台的进给量。

对一蓝宝石晶棒样品的内部缺陷进行实际检测定位,记录了检测到的缺陷层的深度信息,表2给出了检测到的前4个缺陷层位置的6次结果。

表2 系统检测结果

Table 2 Measurement results

No.	Position of defect layers /mm						Mean	Standard deviation
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th		
1	7.2	7.1	7.2	7.2	7.1	7.1	7.15	0.05
2	11.2	11.1	11.2	11.2	11.1	11.1	11.15	0.05
3	11.7	11.7	11.8	11.7	11.7	11.8	11.73333	0.04714
4	11.9	11.8	11.9	11.8	11.8	11.9	11.85	0.05

人工检测定位第一个缺陷位置大约在7 mm深度位置,与本系统检测结果相吻合。从多次实验结果可以看出,本系统重复检测精度较高,主要误差来自于初始位置的设定,在实际生产检测中为了保证测量精度,要求光源升降台起始位置与蓝宝石底面在同一水平线上,安装时要仔细调整,确保初始位置的准确度。

实验证明,该系统能够准确地对蓝宝石内部散射颗粒缺陷在深度方向上定位,定位精度达到了系统设计的要求,同时可通过设置进给量来进一步提高定位精度。

5 结 论

将机器视觉和层貌术结合运用在LED蓝宝石衬底的生产过程中,针对蓝宝石晶棒内部散射颗粒缺陷研制了专用的缺陷检测定位系统。通过对蓝宝石逐层扫描采集到与深度相应的二维图像,然后运用图像处理分析手段实现对蓝宝石内部缺陷的定位。实验结果表明,该系统能有效地识别出蓝宝石晶体中的散射颗粒缺陷,并对其在棒状蓝宝石晶体深度方向上准确定位,定位精度可达到0.1 mm,满足了工业生产的需求,同时提升了检测效率,大大降低了蓝宝石衬底的生产成本,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Chen Quan, Luo Xiaobing, Zhou Shengjun, *et al.*. Dynamic junction temperature measurement for high power light emitting diodes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(8): 084904.
- Daniel A Steigerwald, Jerome C Bhat, Dave Collins, *et al.*. Illumination with solid state lighting technology[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2002, 8(2): 310-320.
- Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin, *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(7): 963-971.
- 罗毅,张贤鹏,王霖,等. 半导体照明中的非成像光学及其

- 应用[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 963-971.
- Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222002.
- 李林,王光珍,王丽莉,等. 实现均匀照明的LED系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222002.
- Fan Hongzhong, Cao Min, Li Shuzhi, *et al.*. Application and investigation of near-field goniophotometer measurements in LED optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1222001.
- 范红忠,曹民,李抒智,等. 光源近场测量在LED光学设计中的应用与研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1222001.
- Lu Qinghua, Xu Chongchuan, Wang Hua, *et al.*. Research on dimension measurement of large size ceramic floor tiles based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0312004.
- 卢清华,许重川,王华,等. 基于机器视觉的大幅面陶瓷地砖尺寸测量研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0312004.
- S Joayum, J F Manuel, S Cristina, *et al.*. Computer vision techniques applied to the quality control of ceramic plates[C]. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2009. 1-6.
- N Nango, T Ogawa, T Irisawa. Minimum size of oxygen precipitates in czochralski silicon wafers detected by improved light scattering tomography[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(8): 5898-5902.
- Deng Peizhen, Qiao Jingwen, Qian Zhenying. Study of defects in Nd:YAG crystals by laser light scattering tomography[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 1987, 15(2): 168-174.
- 邓珮珍,乔景文,钱振英. 用激光光散射层貌术研究Nd:YAG晶体中的缺陷[J]. *硅酸盐学报*, 1987, 15(2): 168-174.
- Huang Jian, Hu Shunxing, Cao Kaifa, *et al.*. Design of three dimensional scanning control system for air pollution monitoring lidar based on LabVIEW[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(2): 124-129.
- 黄见,胡顺星,曹开法,等. 基于LabVIEW的测污激光雷达三维扫描控制系统的设计[J]. *大气与环境光学学报*, 2013, 8(2): 124-129.
- Zhang Handong, Ji Wenzhi. The database access technology based on LabVIEW in data acquisition system[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2009, (4): 63-66.
- 张捍东,纪文志. 数据采集系统中的LabVIEW数据库访问技术[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2009, (4): 63-66.
- Zhang Libao, Li Hao. Detection of interest image region based on adaptive radius search[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0714001.
- 张立保,李浩. 基于自适应半径搜索的图像感兴趣区域检测[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0714001.
- Zhang Yujin. *Image Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 162-165.
- 章毓晋. *图像分析*[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. 162-165.