

文章编号: 1005-5630(2021)06-0064-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2021.06.011

基于偏振分像的制冷器件晶粒双面等光程共焦成像缺陷检测装置

廖廷倮^{1,2,3}, 颜少彬¹, 黄启禄^{1,2,3}, 黄衍堂², 崔旭东¹

- (1. 泉州师范学院 光子技术研究中心, 福建 泉州 362000;
2. 泉州师范学院 福建省先进微纳光子技术与器件重点实验室, 福建 泉州 362000;
3. 泉州师范学院 福建省超精密光学工程技术与应用协同创新中心, 福建 泉州 362000)

摘要: 针对待测晶粒大的情况, 为解决晶粒双面检测时双面之间产生光程差导致的成像清晰度问题, 提出了一种基于偏振分光成像法的半导体制冷器件晶粒相邻双面同时成像缺陷检测的装置。利用偏振分光器与直角转像棱镜对采用偏振分束器与偏振相机的晶粒天面和侧面同时等光程共焦成像检测装置进行了光学设计, 完成了晶粒相邻双面同时等光程偏振成像缺陷检测的实验验证。结果表明, 该偏振分光成像检测技术可以实现晶粒相邻面的同时缺陷检测, 并能很好地满足相邻面等光程成像缺陷检测的性能要求。当晶粒相邻面等光程共焦时, 检测分辨率可达到 110 lp/mm 以上, 而当晶粒相邻面离焦(准共焦)仅 ± 0.20 mm 时, 分辨率则降至 45 lp/mm 以下。本检测装置具有双面成像清晰度好、成像光路共焦调整方便、检测装置结构简单可靠, 以及提高的缺陷检测性能等优点。

关键词: 机器视觉; 光学设计; 自动光学检测; 偏振分束器; 半导体制冷器晶粒

中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

An apparatus for inspecting adjacent surfaces defects of TEC component based on equal-optical-path polarization splitting imaging

LIAO Tingdi^{1,2,3}, YAN Shaobin¹, HUANG Qilu^{1,2,3}, HUANG Yantang², CUI Xudong¹

- (1. Research Center for Photonics Technology, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory for Advanced Micro-nano Photonics Technology and Devices, Quanzhou 362000, China;
3. Fujian Provincial Collaborative Innovation Center for Ultra-Precision Optical Engineering and applications, Quanzhou 362000, China)

Abstract: An apparatus for simultaneously inspecting adjacent surfaces defects of thermoelectric cooler (TEC) components based on polarization beam splitting imaging is proposed. The optical design of the apparatus for simultaneously inspecting adjacent surface defects of TEC components

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 福建省科技重大专项 (2019HZ020010)

作者简介: 廖廷倮 (1962—), 男, 教授, 研究方向为应用光学, 光学设计, 超精密光学加工与检测技术。
E-mail: tingdi_liao@qztc.edu.cn

is discussed. The proposed apparatus employs polarization beam splitter and polarization camera and meets the conditions of equal-optical-path imaging for both top and side surfaces. The experimental investigations on defects inspection with equal-optical-path polarization imaging system are conducted. The results indicate that the proposed inspection technique with polarization splitting equal-optical-path imaging is capable of simultaneously inspecting the adjacent surfaces defects and the optical apparatus can well meet the performance requirements for inspecting adjacent surfaces defect of TEC components. The inspection resolution can reach 110 lp/mm when equal-optical-path confocal imaging is met, but the inspection resolution reduces to below 45 lp/mm when the defocus is around ± 0.20 mm. It was noted that the developed technique has obvious advantages of rather good imaging quality, easy adjustment of imaging system, simplified and reliable optical configurations, and improved defect inspection performance.

Keywords: machine vision; optical design; automatic optical inspection; polarization beam splitter; thermoelectric cooler (TEC)

引言

机器视觉自动光学检测技术在光学与光电子器件等产品在线检测中具有广阔的应用前景^[1-9]。迄今, 已经被提出的半导体致冷晶粒双面(相邻或相对)同时成像检测装置与方法中, 双面同时成像检测装置的光程差与检测系统的结构尺寸有关, 当被检测晶粒结构尺寸较大时, 为解决晶粒双面同时检测及其光程差(或离焦)产生的成像清晰度问题, 检测装置需采用较大的直角转像棱镜与大景深远心成像镜头, 由此给检测带来一定的局限性^[10]。最近, 一种半导体制冷器件晶粒相邻面同时“准”共焦成像检测的新方法得到了研究与验证^[11]。该方法基于相邻双面的成像检测在立方合像棱镜上的“准”等光程成像原理, 使相邻双面成像检测的光程差 Δ 与系统结构参数无关, 只与晶粒相邻双面中心的间距有关。采用该方法的光学检测装置虽然实现了晶粒相邻面“准”等光程共焦成像检测, 但是相邻双面成像之间仍然存在光程差 Δ ^[11]。这个光程差 Δ 可以通过选择足够大景深的远心成像镜头来补偿, 但是当被检测晶粒增大时, 光程差 Δ 及物方视场也随之增大, 必须使用大视场、大景深的远心成像镜头, 相应地远心成像镜头的制造难度与成本会增加。因此, 获得晶粒相邻面等光程共焦成像检测的新技术途径很有必要。偏振成像技术^[12]与

传统光电成像检测技术相比, 不仅可获得被检测物体的强度信息, 还可获得偏振度信息; 不仅可以增加被检测物体的信息量, 还可以简化检测装置的结构。随着偏振成像技术与偏振成像器件的发展, 偏振成像检测技术及其应用得到广泛的研究^[13-14]。本文提出了一种基于偏振分像的方法, 利用偏振分束器与偏振传感器相机设计了用于半导体晶粒相邻两面同时等光程共焦偏振成像检测的新装置, 实现了半导体晶粒相邻两面同时等光程共焦偏振成像检测。该检测装置具有等光程共焦偏振成像的特性, 具有双面同时成像、清晰度高、成像光路共焦调整方便、检测装置结构简单可靠等优点, 为检测设备性能的提高提供了新的方法。

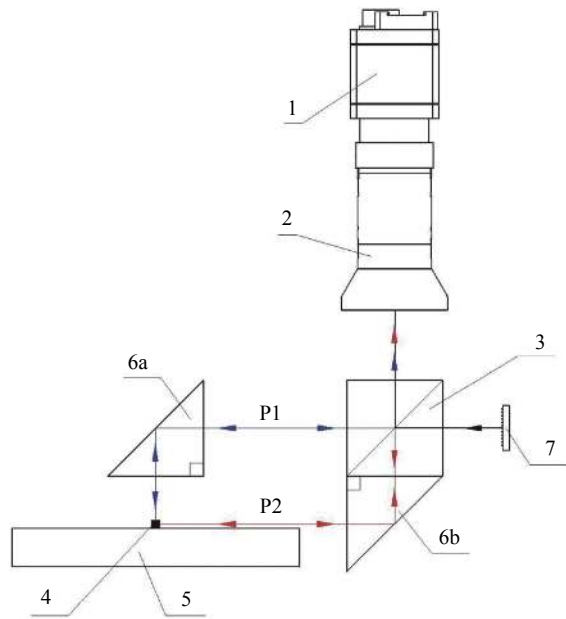
1 检测装置原理

图1所示为半导体制冷器件晶粒天面与侧面同时等光程共焦成像检测的光学装置。该检测装置在光学系统结构布局上类似传统的双光束等臂干涉仪系统, 可以实现晶粒相邻双面的等光程共焦成像检测。该装置由特定的 CMOS 相机偏振传感器 1, 远心成像镜头 2, 偏振立方分束器/偏振立方合像器 3, 半导体晶粒 4、透明玻璃载物转盘 5、直角转像棱镜 6a 和 6b、同轴外置照明光源 7 等构成。晶粒的照明光源 7 位于偏振立方分束器/合像器 3 的右侧, 在照明光路中用作偏

振分束的偏振立方分束器 3 在成像光路中的作用则为偏振立方合像器 3。晶粒的天面经直角转像棱镜 6a 与偏振立方合像器 3 的 90°反射后进入远心成像镜头 2，半导体晶粒的侧面经直角转像棱镜 6b 与偏振立方合像器 3 的透射后也进入远心成像镜头 2，且天面与侧面的像分别位于 CMOS 相机偏振传感器 1 中心的两侧。本检测装置采用了相邻双面的检测光路在偏振立方合像器 3 位置输出面上等光程共焦成像的原理，有相邻面的双像在偏振立方合像器 3 输出面时空间位置完全重合的特点，即满足晶粒双面等光程共焦成像条件 $\Delta=0$ 。（必须指出，本文中，“等光程共焦”是指晶粒的相邻双面经过光学系统所形成的两个像位于同一个传感器平面上，而且空间上完全重合，与传统的共焦扫描成像显微镜中的“共焦”是不同的。）

6a 为待测晶粒的天面照明；另一束反射线偏振光(reflected polarized, RP)经直角转像棱镜 6b 为待测晶粒的侧面照明。半导体制冷器件晶粒相邻两面经过两线偏振成像光路后分别在 CMOS 相机偏振传感器 1 上形成双面各自独立的像。

在机器视觉光学检测装置中，通常使用的是同轴照明光源^[1-2]。然而，同轴内置照明光源中所用的半透半反射立方分束器会导致照明光束的能量损失 50%。晶粒的照明光经过立方合像器后，照度又会进一步被减少 50%。因此，传统的同轴内置照明光源的能量利用率通常不超过 25%。本文所提出的基于偏振分像的检测装置使用了偏振分束器，避免了常规的机器视觉光学检测装置中因照明光束经过半透半反射立方分束器所产生的 50% 的能量损失，其光能利用率比常规的利用同轴内置照明检测装置的高了一倍。



1. CMOS 相机偏振传感器；2. 远心成像镜头；3. 偏振立方分束器/合束器；4. 半导体晶粒；5. 玻璃载物转盘；6a. 直角转向棱镜；6b. 直角转向棱镜；7. 同轴外置照明光源

图 1 半导体制冷器件晶粒天面与侧面同时等光程共焦偏振成像检测的光学装置

Fig. 1 Optical apparatus for simultaneously inspecting top and side surfaces defects of TEC components with polarization confocal imaging

本装置中，半导体晶粒的双面照明光束的偏振方向互为垂直，照明光源经过偏振立方分束器 3 时，被分为两束线偏振光：一束透射线偏振光(transmission polarized, TP)经直角转像棱镜

2 检测实验结果

2.1 实验装置设计

基于偏振分像法获得晶粒相邻双面等光程共焦成像检测的原理,设计并搭建了晶粒相邻双面同时等光程共焦偏振成像的检测装置。该检测装置可以同时对接晶粒的相邻两个面成像、检测缺陷。图 2 为半导体晶粒相邻双面等光程共焦偏振成像检测实验装置前置转像棱镜子系统光路。待测晶粒外形为长方体，其典型尺寸为 2.10 mm×1.32 mm×1.32 mm。所设计和加工的直角转像棱镜尺寸为 15 mm×15 mm×15 mm，偏振分束器尺寸为 15 mm×15 mm×15 mm。本实验选用德鸿视觉的 1.5 倍远心成像镜头 WTL110-1520。CMOS 偏振相机采用的是凌云光技术集团有限责任公司供应的加拿大制造的 FLIR BFS-U3-51S5P-C，该 CMOS 偏振相机的靶面大小为 2/3'(17mm)，像元大小为 3.45 μm，分辨率为 2 448 ×2 048。该偏振相机与普通 CMOS 相机不同之处是它集成了 4 个不同偏振探测特性的检偏器。偏振相机的传感器的功能结构如图 3 所示，图 3(a)-(d) 表示传感器分别由 0°、45°、90°、135°四个偏振方向传感器单元组成。这四个传感器单元分别探测并分别输出 0°、45°、90°、135°四个偏振方向的像。

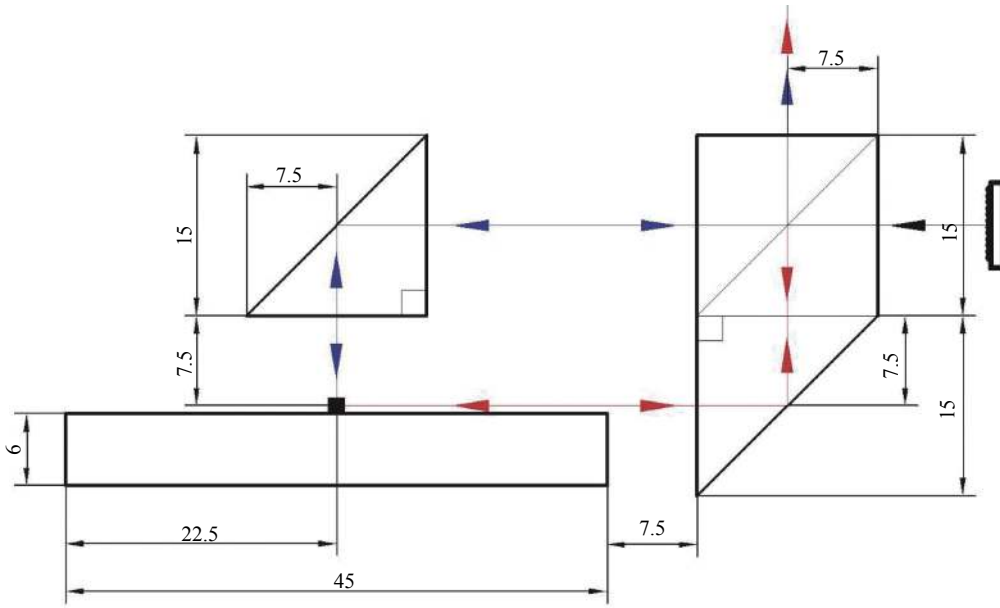


图 2 制冷器件晶粒双面等光程共焦偏振成像检测实验装置前置转像棱镜子系统光路

Fig. 2 Illustration of prism relay system for the apparatus for inspecting adjacent surfaces defects of TEC components with equal-optical-path polarization imaging

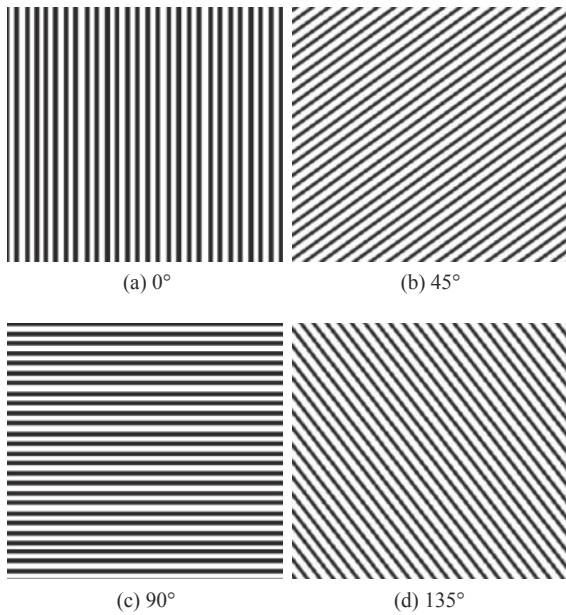


图 3 CMOS 偏振相机传感器的结构示意图

Fig. 3 Illustration of configuration of CMOS polarization imaging sensor (polarization camera)

2.2 双面等光程共焦成像检测

利用偏振成像检测装置得到的半导体晶粒相邻两面成像检测结果如图 4 所示。图 4(a) 为 0° 偏振方向传感器单元对应晶粒侧面的像, 图 4(b) 为 90° 偏振方向传感器单元对应晶粒天面的像,

图 4(c)和 (d) 为 45°与 135°偏振方向传感器单元对应晶粒侧面与天面的像的叠加。根据偏振光学原理, 0°与 90°偏振方向的光振幅也可以在 45°与 135°偏振方向上得到投影分量。由于晶粒相邻双面成像满足等光程共焦条件, 晶粒相邻双面

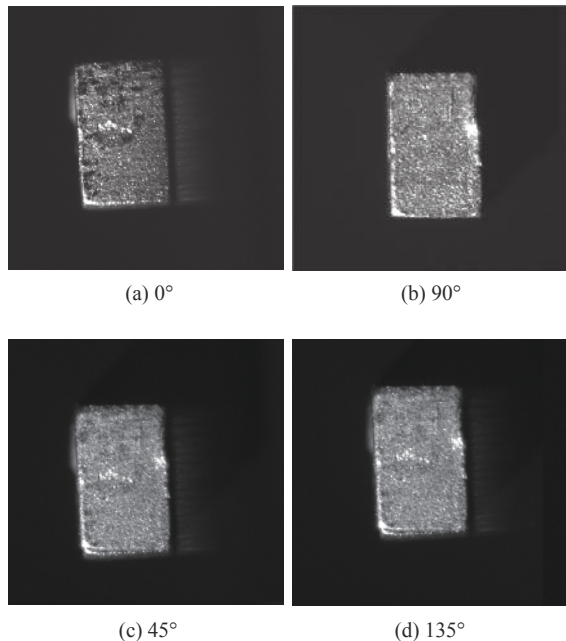


图 4 制冷晶粒相邻两面等光程共焦偏振成像缺陷检测
Fig. 4 Defect inspection of top and side surfaces of TEC components based on equal-optical-path polarization imaging

同时对焦，在偏振相机传感器面上可以同时获得晶粒天面与侧面的清晰成像。

2.3 双面准共焦成像的调节

对本装置进行调焦可以分别获得晶粒天面与侧面准共焦时、天面调焦而侧面离焦时的成像结果。当天面与侧面准共焦时，在相机的 45°与 135°传感器区同时得到晶粒天面与侧面的分开的像(像中心之间的间隔 $\delta=1.62\text{ mm}$)分别是 0°与 90°偏振方向的光振幅在 45°与 135°偏振方向上的投影分量。制冷晶粒相邻双面准共焦时偏振成像缺陷检测结果如图 5 所示，图 5(a)-(d)分别为 0°偏振方向单元(对应晶粒侧面的像)、90°偏振方向单元(对应晶粒天面的像)、45°与 135°偏振方向单元(对应晶粒侧面与天面像的叠加)。在离心成像镜头“等光程共焦物平面”前后相同间距范围内，晶粒相邻两个面的成像质量基本相同，但是清晰度明显降低了。图 6 为远心成像镜头对晶粒天面调焦而晶粒侧面离焦时晶粒相邻两个面的成像情况，物面离焦 $\pm 0.54\text{ mm}$ 。图 6(a)-(d)分别为 0°偏振方向单元(对应晶粒侧面的像)、90°偏振方向单元(对应晶粒天面的像)、45°与 135°偏振方向单元(对应晶粒侧面与天面像的叠加)，此时晶粒侧面的像完全模糊。为了定量说明等光程共焦成像与准共焦成像之间的差

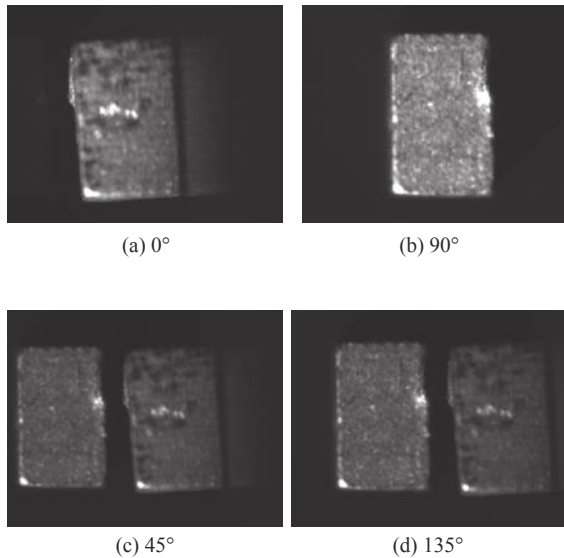


图 5 制冷晶粒相邻双面准共焦时偏振成像缺陷检测 ($\delta=1.62\text{ mm}$)

Fig. 5 Defect inspection of top and side surfaces of TEC components with quasi-confocal imaging ($\delta=1.62\text{ mm}$)

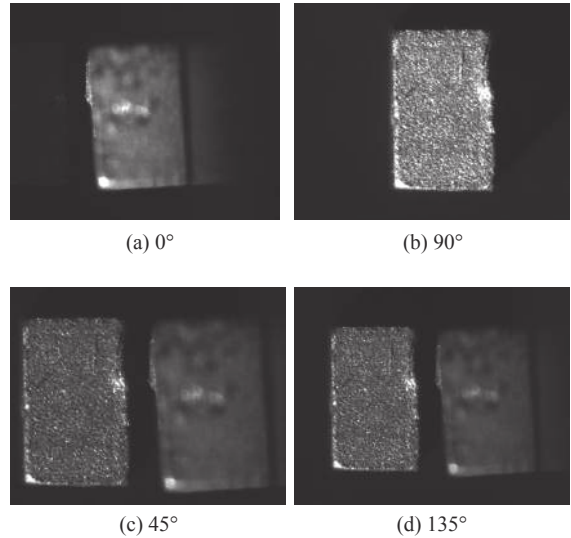


图 6 制冷器件晶粒相邻面偏振成像缺陷检测：当天面调焦时 ($\delta=1.62\text{ mm}$)

Fig. 6 Defect inspection of top and side surfaces of TEC components when the top surface is focused ($\delta=1.62\text{ mm}$)

别，我们用光学镜头的鉴别率板测试了实验所用远心成像镜头分辨率随物面(鉴别率板)离焦的变化。实验结果表明：当物面在“等光程共焦面”上时，分辨率可高达 114 lp/mm；而当物面离焦 $\pm 0.20\text{ mm}$ 时，分辨率则降低为 32~45 lp/mm，此时晶粒侧面的像已经完全模糊不清。实验中，晶粒侧面成像时会同时存在一个对称的镜像，这个镜像是晶粒侧面经透明玻璃载物台的表面反射并经镜头后所成的实像。

从上述分析可以得知，晶粒相邻双面等光程共焦偏振成像与准等光程(准共焦)成像之间的差异在于：在偏振相机的 45°与 135°偏振方向上是否可以得到晶粒相邻双面分离的像。当在偏振相机的 45°与 135°偏振方向上得到晶粒相邻双面完全重合的成像时，说明晶粒双面等光程共焦成像，否则，晶粒相邻双面为准等光程共焦成像。以此可以作为晶粒相邻双面偏振分离成像(0°与 90°偏振方向)是否满足等光程共焦成像的判定依据与方法。另一方面，由于远心成像镜头具有一定的成像景深以及人眼分辨率的判定局限，如果只根据 0°与 90°偏振方向的双面成像清晰度，通常不易判定晶粒相邻双面是否完全等光程共焦成像。

3 结 论

本文研究了一种基于偏振分像的半导体制冷

器件晶粒相邻两面同时等光程共焦成像检测, 设计并搭建了采用偏振分束器与偏振相机组成的晶粒相邻两面同时等光程共焦偏振成像检测的光学装置, 完成了晶粒相邻两面同时等光程共焦偏振成像检测的实验验证。研究表明, 该检测技术可以实现晶粒相邻两面同时偏振成像检测缺陷的功能, 能很好地满足半导体晶粒相邻两面成像缺陷检测的性能要求。

参考文献:

- [1] 卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815002.
- [2] 汤勃, 孔建益, 伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12): 1640 – 1663.
- [3] MAR N S S, YARLAGADDA P K D V, FOOKES C. Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(5): 949 – 962.
- [4] NEOGI N, MOHANTA D K, DUTTA P K. Review of vision-based steel surface inspection systems[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014, 2014(1): 50.
- [5] YANG S W, LIN C S, LIN S K, et al. Automatic defect recognition of TFT array process using gray level co-occurrence matrix[J]. *Optik*, 2014, 125(11): 2671 – 2676.
- [6] LIU Y, YU F H. Automatic inspection system of surface defects on optical IR-CUT filter based on machine vision[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 243 – 257.
- [7] 毛翠丽, 卢荣胜, 董敬涛, 等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. *计量学报*, 2018, 39(5): 628 – 640.
- [8] 史艳琼, 卢荣胜, 张腾达. 液晶显示屏背光源模组表面缺陷自动光学检测系统设计[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(5): 768 – 773.
- [9] 胡海兵, 徐挺, 张波, 等. OpenMP 与环形缓冲技术在 TFT-LCD 缺陷检测中的应用[J]. *计算机科学*, 2019, 46(S2): 562 – 566.
- [10] SU L L, WU P H, GUO Z W, et al. An optical apparatus for machine vision inspecting both top and bottom surfaces of the TEC components[C]//Proceedings of the SPIE 11338, AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology. Beijing: SPIE, 113383C.
- [11] 廖廷倮, 颜少彬, 段亚凡, 等. 制冷器件晶粒相邻面准共焦成像检测的光学装置[J]. *光学仪器*, 2021, 43(5): 90 – 94.
- [12] JOHNSON J L. Infrared polarization signature feasibility tests[R]. U. S. Army Mobility Equipment Research and Development Center, 1974.
- [13] 刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. *光学技术*, 2013, 39(1): 56 – 62.
- [14] 刘敬, 金伟其, 王亚慧, 等. 双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0511001.

(编辑: 钱紫衡)