

# 基于硅光伏电池电磁感应激励与光热图像融合的缺陷检测方法

李祺颖<sup>1</sup>, 何赞泽<sup>1,\*</sup>, 杜博伦<sup>1</sup>

(1.湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 针对现有光伏电池无损检测技术难以同时满足高分辨率、非接触、快速、高灵敏度、评估参数多和定量检测等需求的问题, 本文提出一种对硅光伏电池施加电磁感应激励后产生的光热辐射图像进行特征融合, 进而实现缺陷检测的方法。该方法首先通过电磁感应激励模块在硅光伏电池内部产生磁场、电涡流和温度场, 影响内部载流子平衡产生光热辐射, 然后通过短波红外相机和热像仪进行光热图像采集, 最后基于稀疏表示的自适应图像融合算法获得具有清晰的硅光伏电池缺陷特征的融合图像, 并与IFM算法和Swtimfuse算法的图像融合效果进行了对比, 结果表明稀疏表示算法具有更好的图像融合效果。

**关键词:** 硅光伏电池; 缺陷检测; 电磁感应激励; 图像融合

## Defect detection method based on electromagnetic induction excitation and photothermal image fusion of silicon photovoltaic cells

Li Qiyang<sup>1</sup>, He Yunze<sup>1,\*</sup>, Du Bolun<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In view of the problems that the existing nondestructive testing technologies of photovoltaic cells cannot simultaneously meet the requirements of high resolution, non-contact, fast, high sensitivity, multiple evaluation parameters and quantitative testing, this paper proposes a method of defect detection based on feature fusion of optical and thermal radiation images generated by applying electromagnetic induction excitation to silicon photovoltaic cells. Firstly, magnetic field, eddy current and temperature field are generated in silicon photovoltaic cells by electromagnetic induction excitation module, which affects the internal carrier balance and generates optical and thermal radiation. Then, the short-wave infrared camera and thermal imager were used to collect the optical and thermal images. Finally, the image fusion images with clear defect characteristics of silicon photovoltaic cells were obtained by the adaptive image fusion algorithm based on sparse representation. Moreover, the comparison results with the image fusion effect of IFM algorithm and Swtimfuse algorithm showed that the sparse representation algorithm had better image fusion effect.

**Keywords:** Silicon photovoltaic cells; Defect detection; Electromagnetic induction excitation; Image fusion

## 1 研究背景

现有光伏电池无损检测技术很难同时满足高分辨率、非接触、快速、高灵敏度、评估参数多和定量检测等要求<sup>[1]</sup>。基于上述问题，本文研究了电磁感应对光伏电池检测用电致发光（EL）和电致热成像（ET）技术的改性，提出硅光伏电池的电磁感应激励光热成像检测技术，并利用图像融合算法提高了缺陷检测准确率<sup>[2]</sup>。

## 2 研究内容

基于光伏电池电磁感应涡流生热、热传导、热辐射、电致发光、光子辐射等物理过程与缺陷的交互机理，本文在传统电致发光、电致热成像检测的基础上添加电磁感应激励，实现了单晶硅光伏电池断栅、划痕、断角、杂质掺杂、表面涂层污染、隐裂、黑芯片和多晶硅光伏电池划痕、碎片等不同类型缺陷的可视化检测，表明电磁感应激励能够大幅提高 EL 和 ET 对缺陷的检测能力<sup>[3]</sup>。

单一的电磁感应激励也能使光伏电池产生光热辐射，因此针对传统被动式检测技术低分辨率、低灵敏度和评估参数少的缺点，本文提出主动式电磁激励红外辐射硅光伏电池缺陷检测方法如图 1 所示。基于光伏电池电磁感应产生涡流，影响电池内部载流子平衡产生光热辐射，通过短波红外相机和热像仪采集光热图像进行缺陷检测<sup>[4]</sup>。

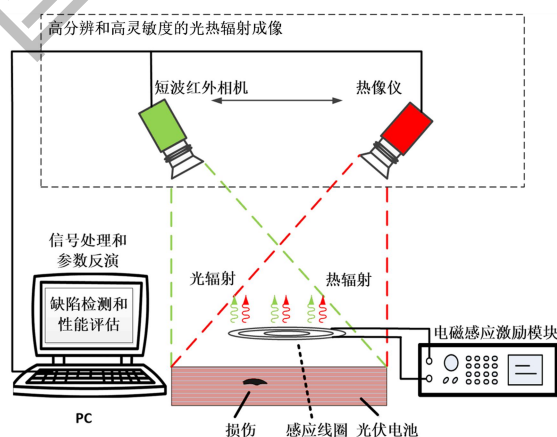


图 1 光伏电池的电磁感应光热辐射缺陷检测方法示意图

Figure 1 Schematic diagram of electromagnetic induction photothermal radiation defect detection method for photovoltaic cells

为了提高光热图像信息的利用率和缺陷检测的准确率，本文提出了一种基于稀疏表示

(Sparse representation, SR) 的自适应图像融合算法。首先根据训练得到的稀疏字典采用正交匹配追踪 (Orthogonal matching pursuit, OMP) 算法得到两组稀疏系数, 然后根据稀疏特征进行融合规则自适应选取, 从而得到融合图像的稀疏系数, 最后结合稀疏字典及融合系数进行重构得到融合图像。且在融合过程中采用稀疏表示能够很好地去掉噪声, 最终获得了具有清晰的硅光伏电池缺陷特征的融合图像。对比了稀疏表示 (SR)、IFM 算法和 Swtinfuse 算法的图像融合结果如图 2 所示。可以发现, 稀疏表示融合结果与源图像热像图颜色最接近, 色彩失真最小, 同时缺陷细节信息也最接近电致发光, 融合效果最清晰, 目视效果最好<sup>[5]</sup>。

### 3 结论

电磁感应激励下硅光伏电池的电致热成像和电致发光检测技术可以实现单晶硅光伏电池和多晶硅光伏电池多种不同类型的缺陷可视化检测, 表明电磁感应激励可以大幅提高 EL 和 ET 对缺陷的检测能力。

单一电磁感应激励下的光伏电池检测, 也可以使光伏电池产生光辐射和热辐射, 并且具有非接触的优点。同时采用热像仪、短波红外相机等设备可以对光伏电池产生的光热辐射进行非接触快速成像以及高灵敏度测量成像。最后, 基于稀疏表示的自适应图像融合算法可以将短波相机和热像仪采集的图像数据进行特征融合, 发挥各自不同波段的检测优势, 利用两种波段的检测数据集成互补, 提高缺陷检测准确率。

源图像		融合图像		
热成像	短波红外成像	IFM算法融合	SR算法融合	Swtinfuse算法融合

原图像: 图像为 512x512 像素, 实验中分块的大小为 88。  
 第 1 个光伏电池存在栅线缺陷; 第 2 个光伏电池存在栅线和热斑缺陷; 第 3 个光伏电池存在缺陷和划痕缺陷; 第 4 个光伏电池存在表面杂质; 第 5 个光伏电池存在黑芯片缺陷;

融合图像: 为了使融合之后的图像同时具有热成像和电致发光缺陷特征, 能够表征更多缺陷信息。

结论: 对比三种融合算法的图像融合效果, 主观和客观评价均显示本文采用的稀疏表示算法效果最好。

图 2 源图像及融合图像对比图

Figure2 Comparison of source image and fusion image

### 参考文献

[1] Du B, Yang R, He Y, et al. Nondestructive inspection, testing and evaluation for Si-based, thin

film and multi-junction solar cells: An overview[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, 78: 1117-1151.

[2] 杨瑞珍,杜博伦,何赞泽,黄守道,张宏.晶体硅光伏电池电磁感应激励红外热辐射缺陷检测与成像技术[J].电工技术学报,2018,33(S2):321-330.

[3] 杜博伦,何赞泽,杨瑞珍等.电磁感应对硅光伏电池可视化检测技术的改性[J].仪器仪表学报,2018,39(10):158-165.

[4] Yang R, He Y. Optically and non-optically excited thermography for composites: A review[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 75: 26-50.

[5] Du B, He Y, Duan J, etc. Intelligent classification of silicon photovoltaic cell defects based on eddy current thermography and convolution neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 1-1.

中国仪器仪表学报