

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210975

光伏电池电致发光偏振图像融合与缺陷检测*

汪方斌^{1,2,4} 张彦福^{1,2} 王峰³ 朱达荣^{1,2,4}

(1.安徽建筑大学机械与电气工程学院 合肥 230601; 2.安徽建筑大学建筑机械故障诊断与预警重点实验室 合肥 230601;
3.偏振光成像探测技术安徽省重点实验室 合肥 230031; 4.工程机械智能制造安徽省重点实验室 合肥 230601)

摘要: 针对电致发光图像边缘模糊、纹理不清晰造成光伏电池缺陷难以量化评估问题,提出一种基于电致发光偏振图像融合的晶硅光伏电池缺陷检测方法。首先,在分析晶硅光伏电池结构的基础上给出电致发光偏振成像的基本原理。然后,利用拉普拉斯金字塔对获取的红外光强图像与偏振度图像进行分解、引导滤波对高频细节成分进行增强,通过区域能量最大、区域能量加权平均规则对高低频部分进行融合。最后搭建短波红外偏振检测平台开展晶硅光伏电池缺陷检测实验。结果表明,偏振成像可以凸显光伏电池缺陷图像的轮廓边缘和纹理细节,融合图像中光伏电池缺陷特征更加突出,信息熵、标准差等客观评价指标显著提高,验证了方法的有效性。

关键词: 电致发光;红外偏振;光伏电池;缺陷检测;图像融合

中图分类号: TP391.9;O436 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4050

Photovoltaic cell electroluminescence polarization image fusion and defect detection

Wang Fangbin^{1,2,4} Zhang Yanfu^{1,2} Wang Feng³ Zhu Darong^{1,2,4}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Key Laboratory of Construction Machinery Fault Diagnosis and Early Warning Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 3. Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei 230031, China; 4. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Hefei 230601, China)

Abstract: The edge of electroluminescence image is fuzzy and the texture is not clear, which makes it difficult to quantitatively evaluate the defects of crystalline silicon photovoltaic cell. In order to solve this problem, a defect detection method based on electroluminescence polarization image fusion is proposed. First, based on the analysis of the crystalline silicon photovoltaic cell structure, the electroluminescence polarization imaging mechanism was introduced. Then, the Laplacian pyramid was used to decompose the obtained infrared intensity images and polarization images, and guide filter was used to enhance the high-frequency components. The high and low frequency parts were fused by the rule of regional energy maximum and regional energy weighted average. Finally, a short wave infrared polarization detection platform was established for photovoltaic cell inspection. The results show that polarization imaging can highlight the contour edges and texture detail of the photovoltaic cell defect image. The photovoltaic cell defect features in the fusion image are more prominent. The objective evaluation index such as information entropy and standard deviation are significantly improved, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Keywords: electroluminescence; infrared polarization; photovoltaic cell; defect detection; image fusion

0 引言

随着光伏产业的发展,太阳能电池片厚度已经降低到120 μm 以下,生产、运输、使用过程中,极易造成碎片、断

栅、隐裂等缺陷。这些缺陷不但会造成生产中的浪费,而且有可能影响太阳能电池的发电效率、造成内部温度过高和设备损坏,甚至会引起重大安全事故^[1-2]。因此,研究光伏电池实时、高效的缺陷检测方法具有重要的应用价值和实

收稿日期:2022-08-06

* 基金项目:安徽省自然科学基金(2008085UD09)、安徽省教育厅高校研究生科学研究项目(YJS20210512)、安徽省教育厅高校自然科学重点项日(KJ2020A0487,GXXT-2021-010)资助

际意义。

晶硅光伏电池现有的缺陷检测方法主要包括交直流测试法、电致发光 (electroluminescence, EL)、光致发光、激光太赫兹、脉冲电致红外热成像等^[3-6]。其中,电致发光检测方法因具有操作简便、检测速度快等优点,应用最为广泛,现已成为光伏行业标准检测方法之一^[7]。但该方法还存在一些不足,主要表现在:1)电致发光图像生成和传输过程中,不可避免地受到环境杂光及相机成像特点等因素引起的背景干扰、随机噪声的影响,造成图像模糊、成像质量变差^[8-9];2)缺陷边缘与正常部位之间发光强度差异不明显,光伏电池内部晶粒等结构的伪缺陷与某些缺陷相似造成检测存在干扰^[10],且传统电致发光图像主要反映了辐射强度等低频信息,难以提取缺陷表面的几何特征,缺陷的量化评估存在困难。为解决此问题,国内外专家学者对传统电致发光图像进行了一系列增强处理,如伪彩色化^[11]、电磁感应激励^[12]、傅里叶图像重建^[13]等,但上述方法主要依赖于单幅图像的已有信息,在背景噪声、环境辐射和缺陷对图像质量影响较大时,图像增强效果非常有限,仍然无法满足量化评估和准确识别的要求。

从物理上讲,电致发光检测技术利用的是光伏电池在外部电压正向偏置激励情况下 1 150 nm 左右峰值波长的短波红外光,其发光辐射不仅具有光强、光谱、相干性等性质,还会在传播过程中表现出一定的偏振特性^[14-15]。研究表明,出射光的偏振特征不仅与目标材料性质、表面粗糙度、辐射率等物理因素有关,还携带了目标缺陷表面的几何信息^[16]。因此,利用偏振成像技术可以增强红外图像边缘轮廓及纹理细节,同时可以将数据量从三维提高到七维,提高了在复杂环境和较大噪声条件下目标探测准确度。另一方面,偏振图像之间从不同维度反映了待测目标各种性质,存在很强的冗余性和互补性,通过融合可以实现优势互补,获得质量更高的融合图像^[17-18]。

基于此,本文利用电致发光过程中短波红外的偏振信息,提出了一种基于电致发光偏振图像融合的光伏电池缺陷检测方法。首先给出电致发光偏振成像原理、介绍本文所采用的融合算法,然后搭建短波红外分时成像系统获取含缺陷的单晶硅、多晶硅光伏电池红外偏振图像,再利用所提融合算法对红外光强图像与偏振度图像进行融合,最后分析实验结果并通过主客观评价指标验证方法的有效性。

1 电致发光偏振成像原理

晶硅光伏电池一般为 N+P 同质结结构,即在 P 型硅上添加一层经过重掺杂的 N 型半导体,背面为正极,正面为负极。为减少工作工程中光反射造成的能量损失,光伏电池表面通常会覆盖一层减反射膜。晶硅光伏电池结构如图 1 所示。

根据 PN 结的工作原理,光伏电池内部会因电子-空穴对的漂移与扩散运动平衡而产生内建电场,内部电流为零。

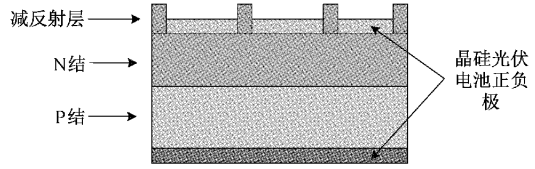


图 1 晶硅光伏电池结构图

当光伏电池正向电压偏置时,PN 结势垒区和扩散区注入了少数载流子,从而打破了载流子平衡,电子和空穴穿过 PN 结形成非平衡载流子。这些非平衡载流子与多数载流子发生复合并向外辐射出光子,此现象即为电致发光。

根据电致发光原理,光伏电池电致发光强度为:

$$S_{EL} = \int B(T, n, p) n_i^2(T) \exp\left(\frac{\Delta\eta(z)}{kT}\right) dz \quad (1)$$

式中: $B(T, n, p)$ 为光伏电池的内部载流子辐射复合率, n 为载流子浓度, $\Delta\eta(z)$ 为电池内部存在电场时电子和空穴电势差的变化, k 是玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, z 为光伏电池的厚度。

由式(1)可知,非平衡载流子的数量及复合方式决定了硅光伏电池电致发光强度。当光伏电池缺陷部位非平衡载流子密度比较低,发光辐射强度比较弱,利用电致发光原理成像时会在图像中形成较暗的区域并呈现出不同的形貌,因此可以利用电致发光进行晶硅光伏电池缺陷检测。但电致发光仅反映了光伏电池内部的物理特征,忽略了所携带的几何信息,因此难以对光伏电池电致发光图像呈现的缺陷部位进行准确分割和量化评估。基于上述考虑,本文设计了一种短波红外分时偏振成像系统来获取光伏电池电致发光的偏振信息,如图 2 所示。

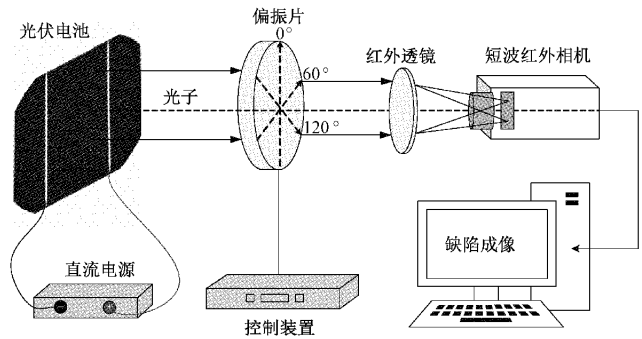


图 2 短波红外分时偏振成像系统

假设光伏电池电致发光出射光 L 的 Stokes 矢量为 $S = [I, Q, U, V]^T$, 其中 I 表示电致发光出射光总光强, Q 表示出射光在水平方向的线偏振分量, U 表示对角线方向的线偏振分量, V 表示左右旋的圆偏振光强之差。 V 在实际应用中很小,可以忽略。根据偏振成像的基本原理,当 L 通过方位角为 α 的偏振分析器时,探测器接收的能量为:

$$I(\alpha) = \frac{1}{2} (I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) \quad (2)$$

由式(2)可知,通过 3 个不同方位角的探测能量就可以

解算出光伏电池电致发光辐射的 Stokes 矢量。工程上为解算方便, 通常选取 α 为 0° 、 60° 、 120° , 由此可以获得光伏电池电致发光出射光的 Stokes 参量为:

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}[I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3}[2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)] \\ U = \frac{2\sqrt{2}}{3}[I(0^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases} \quad (3)$$

进而可以解算出电致发光出射光的偏振度 DOP 和偏振角 AOP :

$$\begin{cases} DOP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ AOP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)和(4)可以看出, 偏振成像从不同偏振方位角对光伏电池表面进行差异化信息观测, 可以获得光强、偏振度、偏振角等数据。光强反映了观测表面的反射特性与细节, 偏振度与偏振角体现了观测表面的粗糙度、纹理、理化

特性等, 从不同的维度反映观测表面的本征偏振特性, 具有很强的互补性和冗余性。因此, 通过图像融合的方式可以突出和强化光伏电池的特征信息、减小背景噪声干扰、提高光伏电池缺陷的检测能力。

2 光伏电池红外偏振图像融合

本文采用拉普拉斯金字塔与引导滤波相结合的方法对光伏电池红外光强图像与偏振度图像进行融合, 主要包括以下 4 个步骤:

步骤 1) 对红外光强图像 I 与偏振度图像 DOP 进行拉普拉斯金字塔分解, 获取图像高低频信息;

步骤 2) 对图像高频层(除顶层外的其他层)进行引导滤波增强;

步骤 3) 采用基于区域能量最大的融合规则对高频部分进行融合, 采用区域能量加权平均的融合规则对低频部分(顶层)融合;

步骤 4) 重构得到融合图像。

图像融合总体框架如图 3 所示。

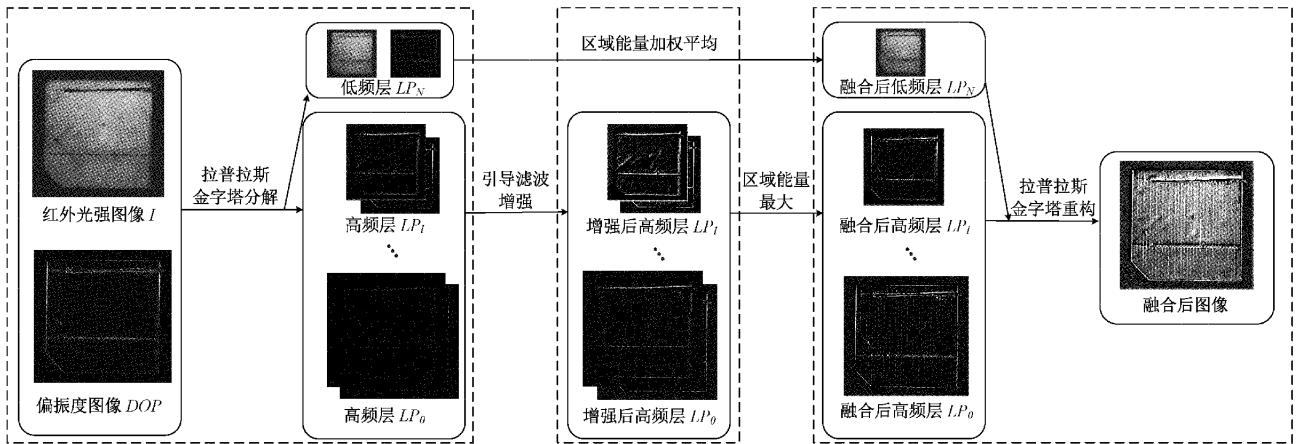


图 3 图像融合整体框架

2.1 拉普拉斯金字塔分解

拉普拉斯金字塔(Laplace pyramid, LP)是一种多尺度图像融合方法, 由将源图像分解为不同尺度、不同空间分辨率的金字塔层并分层融合^[19]。首先构建图像的高斯金字塔, 将红外光强图像 I 和偏振度图像 DOP 作为塔底 G_0 , 然后进行高斯低通滤波和下采样, 高斯金字塔第 l 层图像 G_l 为:

$$G_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) G_{l-1}(2i+m, 2j+n) \quad (5)$$

其中, $1 \leq l \leq N$, $0 < i < C_l$, $0 < j < R_l$ 。式中: N 为总层数; R_l 和 C_l 为 G_l 的行数和列数; ω 为高斯核函数。

拉普拉斯金字塔由高斯金字塔每两层差分得到。用高斯金字塔的每一层图像 G_l 减去其上一层图像上采样和高斯卷积后图像 G_{l+1}^* , 得到一系列的差值图像即为拉普拉斯金字塔 LP_l , 即:

$$LP_l = \begin{cases} G_l - G_{l+1}^*, & 0 \leq l < N \\ G_N, & l = N \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$G_{l+1}^*(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) G'_{l+1}\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) \quad (7)$$

式中: 当 $(i+m)$ 和 $(j+n)$ 为偶数时, $G'_{l+1} = G_{l+1}$, 其他情况下 G'_{l+1} 为 0。

红外光强图像 I 与偏振度图像 DOP 经分解后获得了一系列不同尺度的拉普拉斯金字塔图像 LP_0, LP_1, \dots, LP_N 。其中, 顶层 LP_N 反映了图像的低频特征, 其余各层体现了图像的高频细节信息。考虑到这些高频细节来自于高斯金字塔图像的差分, 为避免融合过程中造成图像的特征丢失, 本文对分解后的高频信息利用引导滤波(guide filter, GF)进行增强。

2.2 引导滤波增强

引导滤波是一种局部线性图像滤波器,基于局部线性模型原理,通过考虑引导图像的内容来计算过滤输出。设置引导滤波器输入图像为 LP_l 、引导图像采用 LP_l 、局部化滤波器窗口中心为 k 、窗口半径为 r ,则根据引导滤波的原理^[20],输出图像 GLP_l 为:

$$GLP_l = a_k LP_l + b_k \tag{8}$$

式中: a_k 与 b_k 为窗口 ω_k 内的线性常系数。

由此可以获得输入图像的增强图像 ELP_l :

$$ELP_l = \theta(LP_l - GLP_l) + GLP_l \tag{9}$$

式中: θ 为增强系数,其数值越大,高频层纹理细节越突出,但 θ 的增大也会放大图像的噪声,因此 θ 的取值很重要,根据大量实验验证和参考文献[21-22],本文选取 θ 值为 5。

2.3 融合过程

1) 高频融合。高频层主要反映了边缘、纹理等细节信息,这些信息不仅取决于单个像素点自身的像素值,而且与局部邻域相关。区域能量反映了图像在这一区域内信息量的大小,能避免单个异常像素点造成的影响。区域能量越大,这一区域所包含的信息越多,越可能是图像的边缘或待测目标。基于此,本文采用区域能量最大规则对高频部分进行融合。假设红外光强图像 I 与偏振度图像 DOP 拉普拉斯分解后的区域能量分别为 E_{LP}^I 与 E_{LP}^{DOP} , 表达式为:

$$\begin{cases} E_{LP}^I(i, j) = \sum_{\Delta i, \Delta j \in G} \omega_e [LP_l^I(i + \Delta i, j + \Delta j)]^2 \\ E_{LP}^{DOP}(i, j) = \sum_{\Delta i, \Delta j \in G} \omega_e [LP_l^{DOP}(i + \Delta i, j + \Delta j)]^2 \end{cases} \tag{10}$$

式中: G 为邻域的大小,一般选取 $[3 \times 3]$ 大小; ω_e 为权重矩阵。

根据以上融合规则,融合后的高频图像为:

$$LP_l^F(i, j) = \begin{cases} LP_l^I(i, j), & E_{LP}^I(i, j) > E_{LP}^{DOP}(i, j) \\ LP_l^{DOP}(i, j), & E_{LP}^I(i, j) \leq E_{LP}^{DOP}(i, j) \end{cases} \tag{11}$$

2) 低频融合。拉普拉斯金字塔低频层主要反映图像灰度与能量分布等信息,对应图像大致形貌和轮廓。为了能突出红外图像和偏振度图像各自的特点,避免图像中无关信息对融合图像造成干扰,低频层采用区域能量加权平均融合规则,权值根据区域能量占比的变化而自适应改变,表达式为:

$$LP_N^F(i, j) = \lambda LP_N^I(i, j) + (1 - \lambda) LP_N^{DOP}(i, j) \tag{12}$$

式中:

$$\lambda = \frac{E_{LP}^I(i, j)}{E_{LP}^I(i, j) + E_{LP}^{DOP}(i, j)} \tag{13}$$

3) 重构。高低频分层融合后,形成了融合图像的拉普拉斯金字塔 $LP_0^F, LP_1^F, \dots, LP_N^F$ 。由拉普拉斯金字塔重新构建高斯金字塔 $G_0^F, G_1^F, \dots, G_N^F$, 重构从顶层开始,得到的

塔底图像 G_0^F 即为最终的融合图像,重构公式由式(6)逆变换而来,表达式为:

$$G_l^F = \begin{cases} LP_N^F, & l = N \\ LP_l^F + G_{l+1}^{F*}, & 0 \leq l \leq N \end{cases} \tag{14}$$

其中,

$$G_{l+1}^{F*}(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) G_{l+1}^{F'} \left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \right) \tag{15}$$

式中:当 $(i+m)$ 和 $(j+n)$ 为偶数时, $G_{l+1}^{F'} = G_{l+1}^F$, 其他情况下 $G_{l+1}^{F'}$ 为 0。

3 实 验

3.1 实验系统

实验系统主要由短波红外相机、搭载短波红外线性偏振片的高精密转台、直流稳压电源、嵌入式 mini PC 及图像采集软件组成。短波红外相机型号为 Owl 640 S, 响应波长为 900~1 700 nm, 内部为 InGaAs 传感器;偏振片为 20LP-NIR 精密线栅偏振片,消光比为 1 000 : 1;激励电源为固纬 3030DD 直流电源,可以提供电压范围 0~30 V、电流范围 0~3 A 的恒流输出。主要实验设备如图 4 所示。



图 4 实验设备

实验对象为单晶硅太阳能电池片、多晶硅太阳能电池片,大小均为 52 mm × 52 mm,厚度约为 0.1 mm,性能稳定,进行实验前需要焊接焊带并预留引线,以便于直流电源的连接。所采用的光伏电池包含断栅、划痕、隐裂、表面污染等缺陷。

3.2 实验过程

实验前,将待测晶硅光伏电池固定在移动平台上,直流稳压电源与光伏电池正负极引线相连接;短波红外相机固定在三角架上,搭载短波红外线性偏振片的高精密转台放置在光学平台上,短波红外相机、偏振片光学中心在一条直线并垂直于待测光伏电池中心,相机镜头与光伏电池中心距离保持 25 cm。

实验过程中,首先对光伏电池进行电源激励,然后驱

动高精度转台带动偏振片高速旋转,短波红外相机同步采集数据,获取被测目标在偏振方位角 0° , 60° , 120° 时的图像,再利用式(3)和(4)解析获得 Stokes 参量及偏振度、偏振角图像。为避免环境噪声的干扰,实验在暗室中进行并保持室内温度 25°C 不变。

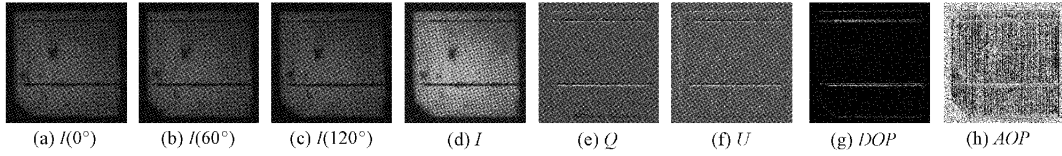


图 5 单晶硅光伏电池红外偏振图像

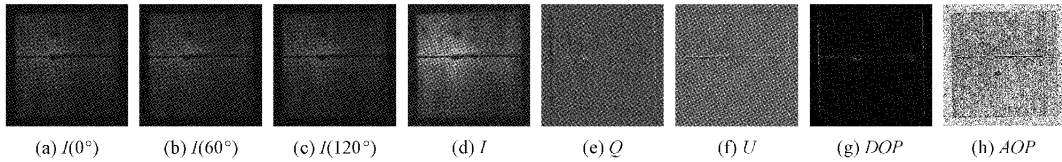


图 6 多晶硅光伏电池红外偏振图像

图 5、6 分别为含有不同缺陷的单晶硅光伏电池红外偏振图像与多晶硅光伏电池红外偏振图像。从左至右,依次为不同方位角图像 $I(0^\circ)$ 、 $I(60^\circ)$ 、 $I(120^\circ)$, Stokes 参量 I 、 Q 、 U 及偏振度图像 DOP 和偏振角图像 AOP 。

由图 5 和 6 可以看出,光强图像 I (相当于传统电致发光图像) 缺陷边缘模糊,部分微小缺陷难以分辨;不同偏振方位角图像 $I(0^\circ)$ 、 $I(60^\circ)$ 、 $I(120^\circ)$ 从不同角度反映了缺陷的几何信息,但不突出; Stokes 参量 Q 、 U 对缺陷边缘细节相对比较敏感;偏振度图像 DOP 和偏振角图像 AOP 能明显增强光伏电池纹理细节,内部的栅线结构等清晰可见,缺陷区域与正常区域对比度高。

4.2 融合结果分析

本文利用拉普拉斯金字塔与引导滤波相结合的算法对红外光强图 I 与偏振度图像 DOP 进行融合,为了验证本文所提算法的性能,与其他 3 种融合算法做了对比,分别为小波变换^[23]、传统的拉普拉斯金字塔^[24],非下采样剪切波变换与脉冲神经网络方法(NSST+PCNN)^[25]。融合结果如图 7、8 所示。

图 7、8 分别为含有不同缺陷的单晶硅光伏电池融合图像和多晶硅光伏电池融合图像。从图中可以看出,小波变换和 NSST+PCNN 方法图像整体亮度较低,拉普拉斯金字塔融合图像效果明显但纹理细节保留不充分,本文所提算法融合后图像光伏电池缺陷突出,划痕、断栅、脏污等缺陷特征明显,达到了较好的效果,整体视觉效果相对于传统电致发光检测方法(图 5 与 6 中的 I 图像)更好,且优于其他三种融合算法。

4.3 客观评价指标

为了更客观评价每幅图像的质量,本文选取信息熵(information entropy, IE)、平均梯度(average gradient, AG)、标准差(standard deviation, SD)、边缘强度(edge

4 实验结果及分析

4.1 偏振成像结果

根据以上搭建成像系统,实验获取的光伏电池短波红外偏振图像如图 5、6 所示。

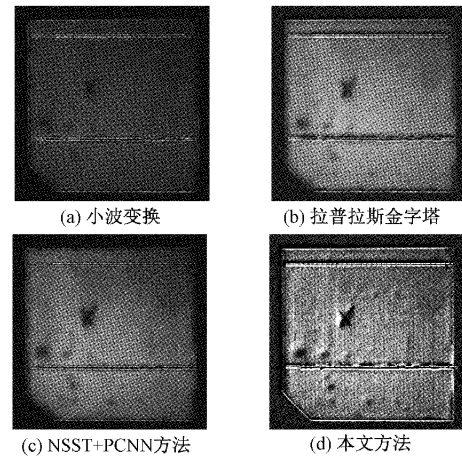


图 7 单晶硅光伏电池融合图像

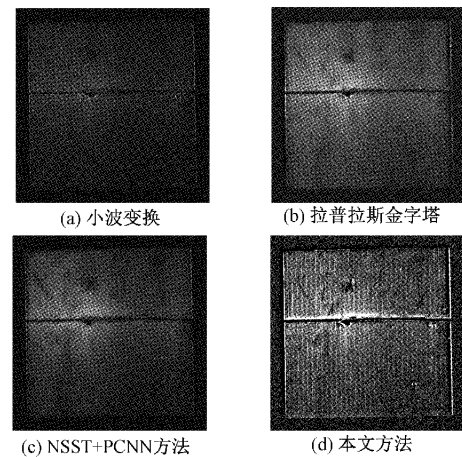


图 8 多晶硅光伏电池融合图像

intensity, EI) 4 个客观评价指标对图像进行定量化评估,如表 1 和 2 所示。

表 1 单晶硅客观评价指标

对应图像	信息熵	平均梯度	标准差	边缘强度
红外光强图像	5.600 6	4.632 9	48.204 8	22.945 6
偏振度图像	3.265 3	7.831	32.745 8	45.522 4
小波变换融合图像	5.526 5	7.566 3	29.988 8	40.358 4
拉普拉斯金字塔融合图像	6.060 7	8.468	53.490 8	49.456 2
NSST+PCNN 融合图像	6.023	7.997 8	50.545 7	45.410 8
本文方法融合图像	7.062 1	29.404 7	63.776	138.323 8

表 2 多晶硅客观评价指标

对应图像	信息熵	平均梯度	标准差	边缘强度
红外光强图像	5.462 7	4.402 1	30.785 5	19.654
偏振度图像	3.162	10.716 1	30.884	52.602 2
小波变换融合图像	5.330 2	10.712 1	23.090 2	48.357 6
拉普拉斯金字塔融合图像	6.053 3	10.930 6	39.293 5	54.632 4
NSST+PCNN 融合图像	5.572 6	10.688 7	36.036	51.071 5
本文方法融合图像	6.774 5	40.674 7	56.485 4	176.543 2

由表 1 和 2 可以看出,相较于红外光强图像 I , 偏振度图像 DOP 的平均梯度、边缘强度有所提高,说明 DOP 图像中包含更多的纹理细节信息。小波变换融合后图像信息熵不如光强图像 I , 总体效果不是太好;拉普拉斯金字塔融合图像能保留源图像的各自优势,整体客观评价指标有一定的提高;NSST+PCNN 能较好的保留信息熵、平均梯度,但边缘强度有所降低;本文所提算法融合后的图像信息熵、平均梯度、标准差、边缘强度都有了极大提升,明显优于传统电致发光方法和其他 3 种融合算法,与人眼主观观察一致。

5 结 论

本文在电致发光的基础上引入偏振成像技术,提出了一种基于电致发光偏振图像融合的晶硅光伏电池缺陷检测方法。研究表明,偏振成像技术的引入明显增强了光伏电池缺陷图像的纹理细节和轮廓边缘,大大提高了检测灵敏度和缺陷分辨率,实现了单晶硅和多晶硅光伏电池中划痕、断栅、脏污等多种类型缺陷的检测,融合图像的信息熵、平均梯度、标准差等客观评价指标显著提高,能对硅光伏电池的细微缺陷定量化评估。此外,该方法操作起来快速有效,易于工程实现。

后续的工作将针对光伏电池电致发光过程的偏振特性进一步研究,建立光伏电池电致发光偏振特征表征与缺陷评估模型等。

参考文献

[1] 王延年,刘宏涛,刘航宇,等. 基于改进 U-Net 的太阳能电池图像缺陷检测方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(14):117-121.

[2] 时亚涛,戴芳,杨畅民. 太阳能光伏电池缺陷检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4):157-164.

[3] 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.

[4] 卜迟武,刘涛,李锐,等. 光伏电池缺陷红外热成像检测与图像序列处理[J]. 光学学报, 2022, 42(7):118-124.

[5] ABDELHAMID M, SINGH R, OMAR M. Review of microcrack detection techniques for silicon solar cells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 4(1): 514-524.

[6] 刘璇. 太阳能光伏中的测试测量技术[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(4):4-6.

[7] 闫萍,王赶强. 电致发光成像测试晶体硅光伏组件缺陷的方法标准解读[J]. 信息技术与标准化, 2020(9): 29-31.

[8] DEITSCH S, BUERHOP-LUTZ C, SOVETKIN E, et al. Segmentation of photovoltaic module cells in uncalibrated electroluminescence images[J]. Machine Vision and Applications, 2021, 32(4): 1-23.

[9] DHIMISH M, HOLMES V. Solar cells micro crack detection technique using state-of-the-art electroluminescence imaging[J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2019, 4(4): 499-508.

[10] 陈海永,赵鹏,闫皓炜. 融合注意力的多尺度 Faster RCNN 的裂纹检测[J]. 光电工程, 2021, 48(1):64-74.

[11] LIN K M, LIN H H, DANDAGE H K, et al. Pseudo colorization of electroluminescence images of multi-

- crystalline silicon solar cells for defect inspection[J]. *Modern Physics Letters B*, 2019, 33(14-15):1940010.
- [12] 杜博伦, 何赟泽, 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.
- [13] TSAI D M, WU S C, LI W C. Defect detection of solar cells in electroluminescence images using Fourier image reconstruction[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 99: 250-262.
- [14] LIN T W, ROWE L P, KACZKOWSKI A J, et al. Polarization-resolved imaging for both photoelastic and photoluminescence characterization of photovoltaic silicon wafers [J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(8): 1339-1350.
- [15] PELOSO M P, LEW J S, CHATURVEDI P, et al. Polarisation analysis of luminescence for the characterisation of defects in silicon wafer solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2012, 20(6): 661-669.
- [16] 周强国, 黄志明, 周炜. 偏振成像技术的研究进展及应用[J]. *红外技术*, 2021, 43(9):817-828.
- [17] 陈卫, 孙晓兵, 乔延利, 等. 基于 FWA 的红外偏振图像智能融合方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(4): 523-532.
- [18] 赵鹏翔, 刘宾, 潘晋孝. 基于 Stokes 矢量的多视角水下偏振成像算法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(3):77-82.
- [19] 向江华, 刘缠牢. 基于多光谱图像融合的光学表面疵病检测[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(3):131-135.
- [20] 羊肇俊, 曾理. 基于加权最小二乘滤波和引导滤波的铸件 DR 图像融合[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(6): 211-220.
- [21] 甘玲, 张倩雯. 结合 NSCT 与引导滤波的图像融合方法[J]. *红外技术*, 2018, 40(5):444-448, 454.
- [22] 朱达荣, 许露, 汪方斌, 等. 基于区域能量的 NSST 域偏振图像融合算法[J]. *安徽建筑大学学报*, 2017, 25(4): 43-48.
- [23] 虞文俊, 顾国华, 杨蔚. 基于小波变换的红外偏振图像融合算法[J]. *激光技术*, 2013, 37(3):289-292.
- [24] 江海军, 陈力. 拉普拉斯金字塔融合在红外无损检测技术中的应用[J]. *红外技术*, 2019, 41(12):1151-1155.
- [25] TAN W, TIWARI P, PANDEY H M, et al. Multimodal medical image fusion algorithm in the era of big data[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020(3): 1-21.

作者简介

汪方斌, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为偏振成像探测、图像处理与人工智能、故障诊断与预警技术等。

E-mail: wangfb@ahjzu.edu.cn

张彦福, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏电池缺陷检测和图像处理。

E-mail: zhangyanfubao@163.com