

基于线阵InGaAs相机的亮环境下光伏电池板缺陷检测方法

徐晗 钱芸生 张益军 郎怡政 黄益东

Defect detection method of photovoltaic panel in bright environment based on linear array InGaAs camera

XU Han, QIAN Yunsheng, ZHANG Yijun, LANG Yizheng, HUANG Yidong

引用本文:

徐晗, 钱芸生, 张益军, 等. 基于线阵InGaAs相机的亮环境下光伏电池板缺陷检测方法[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 156–162. DOI: 10.5768/JAO202546.0103005

XU Han, QIAN Yunsheng, ZHANG Yijun, et al. Defect detection method of photovoltaic panel in bright environment based on linear array InGaAs camera[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 156–162. DOI: 10.5768/JAO202546.0103005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0103005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于深度神经网络的太阳能电池组件缺陷检测算法研究

Research on detection algorithm of solar cell component defects based on deep neural network

应用光学. 2020, 41(2): 327–336 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202006>

基于轻量化卷积神经网络的光伏电池片缺陷检测方法研究

Defects detection method of photovoltaic cells based on lightweight convolutional neural network

应用光学. 2022, 43(1): 87–94 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103003>

多特征融合的太阳能电池片缺陷检测

Defect detection of solar cells based on multi-feature fusion

应用光学. 2023, 44(3): 605–613 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0303005>

基于频域纹理消除的结构性纹理缺陷检测方法

Structural texture defects detection method based on frequency domain texture elimination

应用光学. 2020, 41(4): 876–880 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0405004>

基于光学相干测振系统的微悬臂梁缺陷检测

Defect detection of micro-cantilever beams based on optical coherence vibrometer system

应用光学. 2021, 42(2): 304–309 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203003>

基于频域变换的MEMS声学薄膜缺陷检测算法

Defect detection algorithm of MEMS acoustic film based on frequency domain transformation

应用光学. 2021, 42(6): 1086–1091 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0156-07

引用格式: 徐晗, 钱芸生, 张益军, 等. 基于线阵 InGaAs 相机的亮环境下光伏电池板缺陷检测方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 156-162.

XU Han, QIAN Yunsheng, ZHANG Yijun, et al. Defect detection method of photovoltaic panel in bright environment based on linear array InGaAs camera[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 156-162.



在线阅读

基于线阵 InGaAs 相机的亮环境下光伏 电池板缺陷检测方法

徐 晗, 钱芸生, 张益军, 郎怡政, 黄益东

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 亮环境下太阳光容易淹没光伏电池板光致发光 (photoluminescence, PL) 现象的缺陷信息, 使检测设备无法直接感知缺陷。针对此问题, 提出了一种基于时域误差的检测方法, 能够有效降低亮环境下太阳光的干扰。该方法利用快速 PWM (pulse width modulation) 斩波恒流电源输出高频调制电流信号, 驱动 850 nm 光源输出调制光激励光伏电池板, 使用短波红外线阵 InGaAs 相机捕捉具有调制特性的图像序列, 经现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 从图像序列中提取光伏电池板的缺陷信息。实验结果表明, 该方法能够在 2.9 lx~(12 580±5) lx 的照度范围内有效地检测缺陷图案信息, 实现亮环境下光伏电池板的连续性缺陷检测。

关键词: 光致发光; 线阵 InGaAs 相机; 亮环境; 缺陷检测

中图分类号: TN219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0103005

Defect detection method of photovoltaic panel in bright environment based on linear array InGaAs camera

XU Han, QIAN Yunsheng, ZHANG Yijun, LANG Yizheng, HUANG Yidong

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and
Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In bright environments, sunlight can easily drown out the defect information of photoluminescence (PL) phenomenon of photovoltaic panels, so that the inspection equipment cannot directly perceive the defects. To solve this problem, a detection method based on time domain error was proposed, which could effectively reduce the interference of sunlight in bright environments. In this method, the fast pulse width modulation (PWM) chopping constant current power supply was used to output the high-frequency modulated current signal, the 850 nm light source was driven to output the modulated light to excite the photovoltaic panel, the short-wave linear infrared array InGaAs camera was used to capture the image sequence with modulation characteristics, and the defect information of the photovoltaic panel was extracted from the image sequence by field programmable gate array (FPGA). Experimental results show that the proposed method can effectively detect defect pattern information in the illumination range from 2.9 lx to (12 580±5) lx, and realize the

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金 (61771245)

作者简介: 徐晗 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事 FPGA 开发、光电信息检测和图像信号处理等研究。

E-mail: 13777569135@163.com

通信作者: 钱芸生 (1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电成像器件、系统与相关检测技术等研究。

E-mail: yshqian@njjust.edu.cn

continuous defect detection of photovoltaic panels in bright environments.

Key words: photoluminescence; linear array InGaAs camera; bright environment; defect detection

引言

在新能源开发技术领域,光伏发电能够解决能源危机、减少环境污染以及实现可持续发展,其作为一种绿色环保的新能源技术得到了社会的广泛认可^[1]。然而光伏电池板上的缺陷严重影响其使用寿命和日常生产生活安全,因此缺陷检测的市场需求越来越大^[2]。光致发光(photoluminescence, PL)^[3-4]缺陷检测技术无需对光伏电池板通电,对户外光伏电池板原有接线线路也无需做任何变动,在安全性、便捷性、可操作性上有着不可替代的优势^[5]。因此,PL技术在光伏电池板的缺陷检测中引起了广泛关注^[6]。

PL检测技术利用图像传感器将光伏电池板的辐射光经光电转换输出为数字图像,从而进行缺陷检测^[7]。由于亮环境下太阳光的辐射波段与PL辐射光波段存在重合部分,亮环境下难以观察光伏电池板的PL现象^[8]。随着环境光强度增加,光伏电池板的缺陷信息将被彻底淹没^[9]。因此目前成熟的光伏电池板PL缺陷检测需在暗环境下进行^[10]。一方面,由于户外分布式光伏电池板从室外转移至室内暗环境的过程较为繁琐,增加了移动时导致光伏电池板损坏的可能性,大幅降低检测效率并增加人工成本。另一方面,倘若在夜晚进行室外缺陷检测存在时间和环境上的限制,进而限制了PL检测技术在光伏电池板大规模检测中的应用潜力^[11]。因此在亮环境下进行光伏电池板PL缺陷检测成为亟待解决的问题。

DaySy设备由德国GMC-I光伏检测公司生产,搭载分辨率为1600万像素的硅基CCD相机,光源均匀照射光伏电池板,激励面均匀性高达97%,每日可高效地检测3000块小型光伏电池板,但其检测环境仍为密闭暗箱。BHOOPATHY R^[12]与KUNZ O^[13]团队均使用分辨率640×512 pixel的面阵InGaAs相机进行PL缺陷检测,前者在上位机端求取调制周期内激励前后图像的差值,后者拍摄两个不同红外波段PL图像,由上位机计算差分图像。两者均有效减小环境光的干扰,但均未在硬件端实时处理。同时工业上进行室外大面积光伏电池板PL缺陷检测,对光源的均匀性和功耗问题有较高的要求。因此当使用线阵相机时,可以将线阵光源作为辅助光源,相比面阵光源,更容易

实现打光的均匀性,并能够解决高强度匀光面阵光源难以制作以及面阵光源长时间工作功耗过高的困扰^[14]。另外线阵相机相比面阵相机而言成本更低,分辨率具有更高扩展性。同时光伏电池板辐射出近红外光,在近红外波段相对于Si材料而言,InGaAs材料具有更高的量子效率^[15]。而在可见光波段,InGaAs材料的量子效率极低,使用InGaAs相机能够进一步提高光伏电池板缺陷检测系统对亮环境下环境光的适应性^[16]。

针对在亮环境下光伏电池板PL缺陷检测难以实现的问题,本文拟使用0~1 kHz频率可调的稳定调制电流信号驱动850 nm光源,从而激励光伏电池板辐射出近红外光,由线阵InGaAs相机^[17]获取图像信号,并通过现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实时处理缺陷信息。当环境照度在2.9 lx~(12 580±5) lx范围内变化时,此方法能够有效抑制环境光的干扰,可为亮环境下大面积光伏电池板的连续性缺陷检测提供一种有效手段。

1 PL检测技术

半导体材料的PL效应是当物体受到外部光源的照射时,入射的光子能量高于材料本身的带隙能量时,半导体材料会处于激发态,此时入射的光子会被吸收,载流子被激发到更高的能级,即在导带顶和价带底分别形成电子和空穴。此时,它是一个不稳定的准平衡状态,在相应能级上停留极短的时间后,电子会向价带的最小值进行能量和动量的弛豫。在弛豫过程之后,载流子被去激发并返回到较低的能级,电子和空穴复合产生的能量以光子的形式向外释放。

光伏电池板的主要制备材料是硅,其带隙宽度为1.12 eV。通过式(1),当对光伏电池板外加光源激励时,推断出硅光伏电池板所辐射光波段的中心波长约为1100 nm。由于光伏电池板中杂质的存在,辐射光波段的实际中心波长约为1150 nm^[18]。无缺陷处的辐射光强度强于有缺陷处,使用光电传感器捕获存在强弱差异的光波段,数字图像上显示缺陷图样。

$$\lambda = \frac{hc}{E(\text{eV})} \quad (1)$$

式中: $E(\text{eV})$ 为禁带宽度; h 为普朗克常数; c 为光在真空中的传播速度; λ 是半导体化合物的辐射波长。

当进行 PL 检测时, 光伏电池板上不同程度的缺陷点对光照变化具有不同的响应能力。无缺陷点对外界光照变化具有较强的响应能力, 而严重缺陷点则几乎无响应, 在数字图像上表现为亮暗变化。通过相机直接获取 PL 成像装置在不同环境照度下的原始图像, 可以发现在暗室 20 lx 左右时, 呈现出黑斑、黑团和隐裂等缺陷的细节图像, 具有较高的对比度, 如图 1 所示, 其中图 1(a)为黑斑图样, 图 1(b)为黑团图样, 图 1(c)为隐裂图样。其中黑斑和黑团是由于硅棒的熔化温度与热场温度不匹配, 过大的热应力导致硅片中的位错。产生隐裂的因素有很多, 可能是光伏电池板在挤压、碰撞等外力作用下形成。当进行亮环境下光伏电池板 PL 检测, 随着照度的不断增加, 图像对比度降低, 细节全部丢失, 无法进行后续的缺陷提取处理。

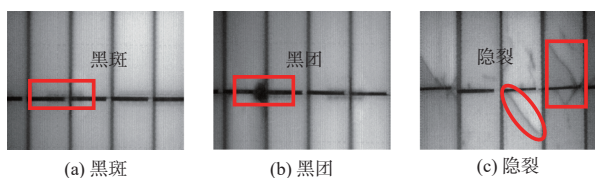


图 1 PL 检测采集图样

Fig. 1 PL detection and acquisition patterns

不同外界环境光照下的隐裂图样如图 2 所示。当外界环境光照度仅为 560 lx 左右时, PL 现象仍略微存在, 如图 2(a)所示。当外界环境光照度为 $(2\ 220 \pm 5)$ lx 左右时, PL 现象已被环境光淹没, 如图 2(b)所示。当照度为 $(12\ 580 \pm 5)$ lx, 对比度严重下降, 光伏电池板的缺陷信息已经被完全淹没, 如图 2(c)所示。

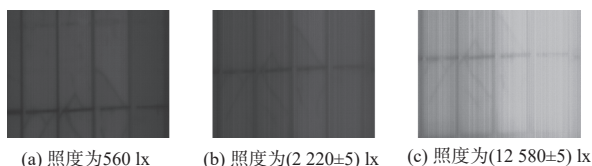


图 2 不同外界环境光照下的隐裂图样

Fig. 2 Hidden crack patterns under different external ambient lighting

出现上诉情况的原因是在亮环境下进行 PL 检测时, 光伏电池板发射中心波长为 1 150 nm 的近红外光, 而在白天环境中环境光也存在相同的波

段。通过实验分析, 在短时间内, 环境光经过近红外镜头和滤光片之后被视为直流分量, 图像噪声增加, 信噪比降低。与暗室 PL 检测相比, 直流分量在数字图像上表现为灰度值整体增加, 对比度整体降低。随着外界光照度的增加, 光伏电池板的缺陷信息将被完全掩盖。

2 亮环境下光伏电池板 PL 检测

2.1 亮环境下光伏电池板 PL 检测装置

实验室阶段亮环境下光伏电池板 PL 检测装置如图 3 所示, 技术成熟之后将由无人机搭载相机进行室外亮环境下缺陷检测。本装置主要由 512×1 分辨率的线阵 InGaAs 相机(装有近红外镜头和 $(1\ 150 \pm 50)$ nm 带通滤光片, 镜头采用 TAWOV 公司的 GF5018M SWIR 镜头)、光伏电池板、850 nm LED 阵列、快速 PWM 斩波恒流电源、传送带以及上位机等组成。其中 850 nm 光源的选取是在控制功率和 LED 珠数相同的前提下, 对 390 nm UV LED、480 nm 蓝光 LED 和 850 nm 近红外 LED 进行光激发实验, 整理原始 PL 图像灰度分布信息。结果表明, 850 nm LED 对光伏电池板具有优越的激励效果。因此, 检测装置选择了中心波长为 850 nm 的 LED 阵列。

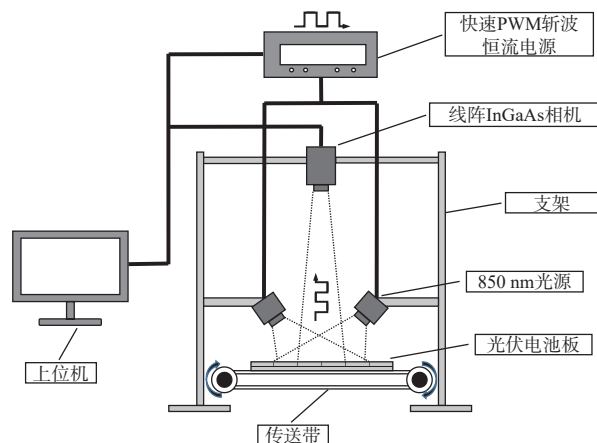


图 3 亮环境下光伏电池板 PL 检测装置

Fig. 3 PL detection system for photovoltaic panels in bright environment

利用斩波恒流电源输出调制电流信号, 驱动实验阶段使用的 850 nm 面阵光源输出调制光激发光伏电池板, 光伏电池板发出 1 150 nm 的光波段, 线阵 InGaAs 相机采集光信号, 通过 CameraLink 接口将图像传送至上位机内部, 经过数据处理得到光伏电池板缺陷图像, 利用数字图像处理技术进行

缺陷图像的预处理,得到缺陷信息。此时线阵 InGaAs 相机捕获白天环境光与光伏电池板辐射出的周期调制光的叠加信号,其中白天环境光只引起图像灰度值的整体增加。

2.2 亮环境下光伏电池板 PL 检测算法模型

本算法模型在 $2.9 \text{ lx} \sim (12\ 580 \pm 5) \text{ lx}$ 照度下,采用调制光开展 PL 检测。无缺陷点的灰度值随着调制激励光源明暗周期性变化而产生一定幅值跳变,缺陷点的灰度值跳变幅值较小或无变化。总体可认为光伏电池板某处的受损程度越小,该处灰度值跳变幅值越大。通过获取具有调制信息的灰度图像序列,不同程度缺陷点的像素灰度值呈现如图 4 所示的跳变状态。

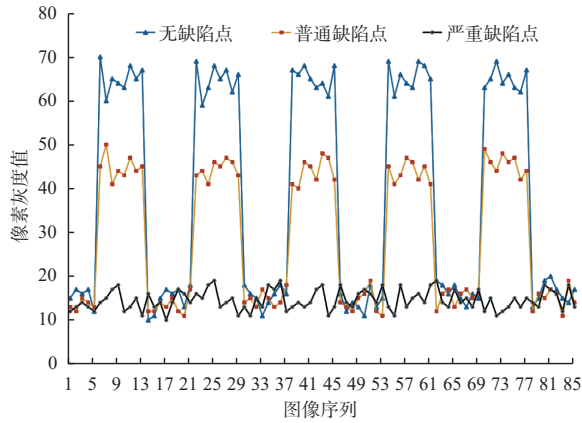


图 4 灰度值与图像序列的关系

Fig. 4 Relationship between grayscale values and image sequences

在图 4 图像序列中,大致均匀分布着高低振幅激励光信号所传输的灰度信息。一个调制周期内,不同位置上的像素灰度值变化取决于缺陷严重程度。无缺陷点像素灰度值同缺陷点有较大的差别,此差别较好地表征了光伏电池板的缺陷信息。对于同一个像素位置,以相对平均值的误差值来表征该像素的缺陷程度。随着图像序列的偏移,该误差值更加稳定。图像中每个像素相对于其平均值的时域误差值 $G_e(n)$ 如式(2)所示:

$$G_e(n) = X(n) - \frac{\sum_{i=1}^N X(n)}{N} \quad (2)$$

式中: $X(n)$ 为每个像素在时域上的灰度值; n 为图像编号; N 为样本个数。

该算法最终对偏差值进行运算,获得平均值 $G_M(X)$,该平均值可以表征图像中每个像素点相对于平均值的跳跃程度。为了便于算法的后续硬件

逻辑描述,逻辑运算应尽可能简单,采用平均绝对误差(mean absolute error, MAE)的数学表达式进行逻辑运算,如式(3)所示:

$$G_{MAE}(X) = \frac{\sum_{i=1}^N |G_e(n)|}{N} \quad (3)$$

3 亮环境下光伏电池板 PL 检测算法硬件实现

亮环境下光伏电池板 PL 检测算法的硬件实现,关键在于匹配成像精度、传送带速度、相机行频和快速 PWM 斩波恒流电源的调制频率,使相机成像清晰。

相机需达到一定的成像精度,满足工程上的应用。成像精度计算如式(4)所示:

$$P = \frac{L}{D} \quad (4)$$

式中: P 为成像精度; L 为物体实际物理长度; D 为物体在图像中所占像素数。

由成像精度确定物体对应的运动行频,如式(5)所示:

$$V_w = \frac{V_c}{P} \quad (5)$$

式中: V_w 为光伏电池板运动行频; V_c 为传送带速度。

当相机行频高于物体运动行频时,光伏电池板每行多次成像,此时图像拉伸,成像次数计算公式如式(6)所示:

$$N = \frac{V_x}{V_w} = \frac{V_x \times P}{V_c} \quad (6)$$

式中: V_x 为相机行频; N 为光伏电池板每行成像次数。

在实际成像时,每 N 行图像所携带的图像信息大致相同,忽略其变化。将 N 行图像进行处理,获得亮环境下缺陷图样。与此同时,线阵相机成像速率与物体运动速率相匹配,避免成像拉伸或压缩。

当缓存 N 行图像序列时, N 至少为一次光调制周期内相机采集的图像行数,调制斩波电源的调制频率需满足式(7):

$$f_{\text{power}} \geq \frac{V_x}{N} \quad (7)$$

式中 f_{power} 为斩波电源的调制频率。

相机直接采集调制辐射信号,呈现激励信号与不激励信号相间分布图像,如图 5 所示。

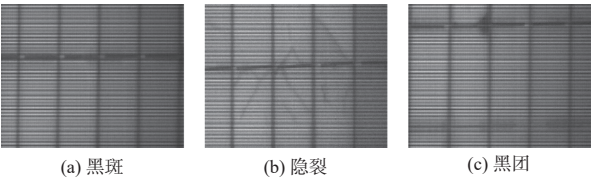


图 5 调制信号下相机直接采集图样

Fig. 5 Patterns collected by camera directly under modulation signals

对于光伏电池板的缺陷成像需要达到一定的积分时间,使得相机清晰成像。对于本次成像实

验的光伏电池板,通过 FPGA 调节线阵相机的积分时间以及控制其他时序的输出,使得相机输出行频 V_x 为 400 line/s。通过调节传送带电机的各个参数,确定传送带匀速运动的速度 V_c 为 20 mm/s。调节光伏电池板与线阵 InGaAs 相机的距离,调节镜头焦距,使得成像精度为 0.2 mm/pixel,为了方便硬件端的乘法和除法, N 选用 2、4 或 8。当 N 选用 4 时,最终可以确定斩波电源的调制频率应设置到 100 Hz。各个参数的匹配如表 1 所示。

表 1 参数匹配表

Table 1 Parameters matching

成像精度/(mm·pixel ⁻¹)	传送带速度/(mm·s ⁻¹)	物体运动行频/(lines·s ⁻¹)	相机行频/(lines·s ⁻¹)	每行成像次数/次	调制频率/(Hz)
0.5	100	200	400	2	200
0.5	50	100	400	4	100
1.0	50	50	400	8	50
0.2	20	100	400	4	100
0.2	40	200	400	2	200

通过确定传送带速度,相机行频和斩波电源调制频率,从而对每 4 行图像序列完成平均绝对误差的硬件端处理。对于一次运算数据量较多时,可将数据在 DDR(double data rate sdram)中缓存。而对于每一次算法处理数据量较少的情况,缺陷提取算法硬件端实现的逻辑设计可由 3 部分组成:建立 4×1 的滑动窗口,进行平均绝对误差算法计算以及控制最终的数据有效信号输出。

4×1 窗口的构建需基于 RAM 创建移位寄存器数组(shift register)。当缓存 3 行加 1 个像素点,由于相机存在 512 个像元,即取地址在 0、512、1 024 和 1 536 处的 4 个像素以构建 4×1 窗口。新数据进入移位寄存器,窗口内数据打拍更新,在图像上呈现为步长为 1 的滑动窗口。窗口构建示意图如图 6 所示。

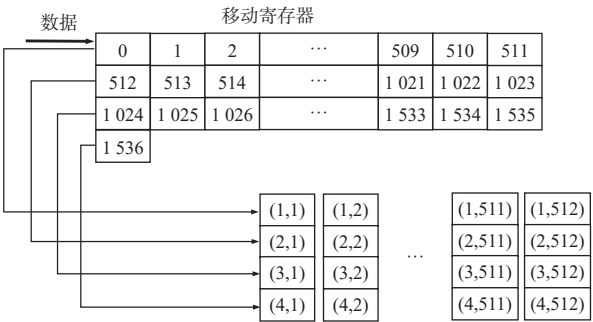


图 6 4×1 窗口构建示意图

Fig. 6 Schematic diagram of 4×1 window construction

将窗口内一系列的数据进行缺陷显示的调制算法,每经过一个时钟周期,4×1 窗口的数据进行更新。数据并行处理:数据(1-4)由并行的 4 个数据通道传输,并完成平均绝对误差运算。由于算法逻辑表达式复杂,为避免出现时序违例,插入三级寄存器以优化时序,分别对应在取数据(1-4)均值后、取数据(1-4)偏差值后、取偏差值的均值后。在硬件端的乘法使用左移运算符,除法使用右移运算符,从而简化逻辑。数据并行处理的示意图如图 7 所示。

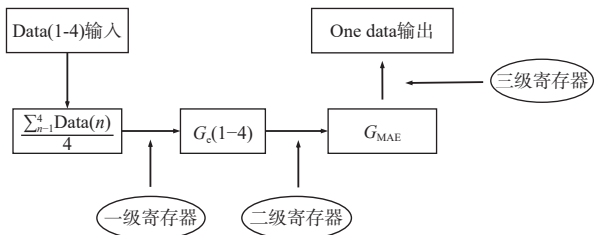


图 7 数据并行处理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of data parallel processing

对于数据有效信号,相对应需要进行有效信号与数据对齐。数据有效信号需随着有效数据的位置进行变化。倘若有效信号直接进行打拍操作,将浪费过多 FPGA 的触发器(flip flop, FF)资源。因此使用寄存器数组 [3:0] sel_r 的作为选择信号,初值赋为 4'b0 001,对有效信号进行选择。通过将一行数据的初始有效信号 valid,与其下一拍信号

valid_next 进行逻辑运算, 产生脉冲信号 pulse, 进行选择信号的移位。每当一个脉冲信号来临, 即一行的数据到来, 选择信号左移一位。选择出最终的数据有效信号 valid_finish。有效信号选取流程图如图 8 所示。

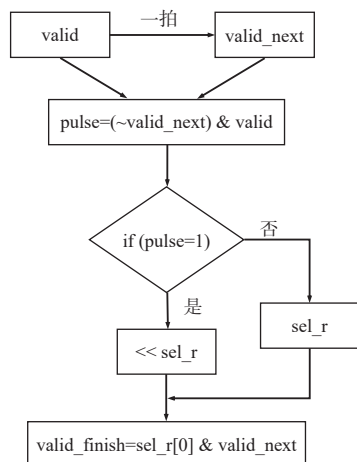


图 8 有效信号选取流程图

Fig. 8 Flow chart of effective signal selection

4 实验结果

通过上位机控制快速 PWM 斩波恒流电源以 100 Hz 的调制频率驱动光源, 并控制传送带电机转速使传送带以 20 mm/s 匀速运动。调整线阵 InGaAs 相机的采集频率为 400 lines/s, 即相机每秒捕获 400 行图像序列。其中, 每 4 个图像序列对应一个光调制周期。由国家计量技术规范 JJF2061-2023《一级标准光伏组件校准规范》可知, 缺陷检测时温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\leq 75\%$, 环境清洁通风, 无影响仪器正常工作的磁场、机械振动, 检查光伏电池板中是否存在肉眼无法观察的隐裂、虚焊、断栅等缺陷。本文检测装置符合国家计量标准实验条件, 在室内有外界光照下进行实验, 通过可调功率卤钨灯模拟太阳光以及幕布遮挡模拟较低环境光照度, 采集亮环境下多组不同环境光照度的图像序列, 基于时域误差的多帧图像处理, 最终检测结果能够获取肉眼无法观察的隐裂等缺陷图样。算法前后对比效果如图 9 所示。

图 9 中选取的是具有代表性的 4 个光照条件下的对比图样。当环境照度为图 9(a) 中的 560 lx, 亮环境下环境光中的直流分量对光伏电池板的辐射光的干扰较小, 原始图像仍然能够分辨缺陷信息。经过算法处理后, 图像质量得到改善, 图像中

的隐裂显示的更加细腻; 当环境照度达到图 9(b) 中的 $(2\ 200 \pm 5)$ lx, 原始图像只能呈现微弱缺陷信息; 当环境照度达到图 9(c) 中的 $(7\ 600 \pm 5)$ lx, 缺陷信息几乎不显示; 当环境照度达到图 9(d) 中的 $(12\ 580 \pm 5)$ lx 时, 隐裂已经完全被环境光覆盖, 而算法后的对比度与信噪比得到明显提升。经过对调制图像序列的多行处理, 成功提取了光伏电池板的缺陷, 缺陷显著性不亚于图 1 中 20 lx 的暗环境采集图样。实现了亮环境下 PL 缺陷检测。随着亮环境下环境光照度增加, 经过算法处理后, 图像中引入少量的白点噪声, 通过添加中值滤波算法有效地抑制噪声。与此同时, 算法处理前物体运动速率小于线阵相机成像速率, 出现图像拉伸的现象, 算法处理后两个速率匹配, 从而正常成像。由于多次重复采集图像时, 对应的光伏电池板的位置有所不同, 因此对比图中的缺陷信息存在位置不完全对等情况。

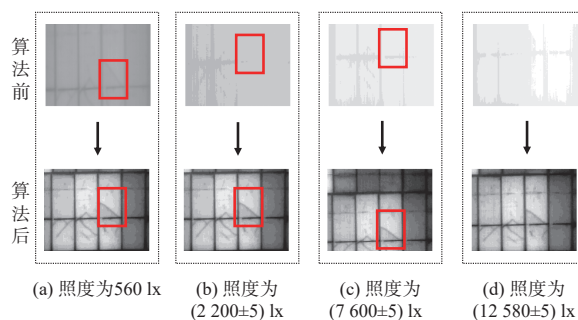


图 9 不同光照下算法实时提取对比图

Fig. 9 Comparison diagram of algorithm extracted in real time under different lighting

5 结论

现阶段, 由于亮环境下环境光将覆盖光伏电池板 PL 辐射波段, 因此光伏电池板的 PL 缺陷检测仍需在暗室中进行。通过分析亮环境下环境光的直流特性, 提出了一种亮环境下缺陷检测方法, 实现了亮环境下缺陷显示, 为后续进行室外亮环境下缺陷检测提供了原理性验证。该方法使用快速 PWM 斩波恒流电源输出 100 Hz 调制电流信号, 驱动近红外光源输出调制光激励光伏电池板, 并基于平均绝对误差算法从图像序列中提取缺陷信息。实验结果表明, 在 $2.9\text{ lx} \sim (12\ 580 \pm 5)\text{ lx}$ 环境照度下, 缺陷图样对比度得到明显提升, 能够满足人眼对缺陷的识别, 该方法适用于亮环境下光伏电池板的 PL 缺陷检测。同时使用线阵 InGaAs 相

机进行检测,为工业上实现亮环境下大面积光伏电池板的连续性 PL 缺陷检测提供了可行性。

参考文献:

- [1] 陈冉. 基于图像处理的太阳能电池无损检测技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
CHEN Ran. Research on nondestructive testing technology of solar cells based on image processing[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [2] 朱雨萌. 电致发光测试在晶硅电池组件检测认证中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
ZHU Yumeng. Study on the application of electroluminescence test in the detection and certification of crystalline silicon battery components[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [3] ZAFIROVSKA I, JUHL M K, WEBER J W, et al. Detection of finger interruptions in silicon solar cells using line scan photoluminescence imaging[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2017, 7(6): 1496-1502.
- [4] 时亚涛. 基于图像重建的晶体硅光伏电池隐性缺陷检测[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
SHI Yatao. Detection of hidden defects in crystalline silicon photovoltaic cells based on image reconstruction[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [5] JOHNSTON S, GUTHREY H, YAN F, et al. Correlating multicrystalline silicon defect types using photoluminescence, defect-band emission, and lock-in thermography imaging techniques[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(1): 348-354.
- [6] 孙智权, 周奇, 陈震, 等. 基于 CMOS 图像传感器的太阳能电池缺陷检测系统设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(1): 60-63.
SUN Zhiquan, ZHOU Qi, CHEN Zhen, et al. Design of solar cell defects detection system based on CMOS image sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(1): 60-63.
- [7] 范程华. 太阳能电池片表面缺陷高效检测系统研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
FAN Chenghua. Research on efficient detection system for surface defects of solar cells[D]. Hefei: Anhui University, 2019.
- [8] DONG M C, QIAN Y S, WANG H G, et al. Photoluminescence detection method for silicon photovoltaic modules at high light level[J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(3): 033102.
- [9] WU S, ZHANG Y, QIAN Y, et al. Defect detection system for silicon solar panels under all-day irradiation[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(28): 8875-8881.
- [10] BENATTO R D A G, MANTEL C, SPATARU S, et al. Drone-based daylight electroluminescence imaging of PV modules[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, 10(3): 872-877.
- [11] REY G, POPLAVSKYY D, NAGLE T, et al. Line scanning photoluminescence imaging to study the effects of heat stress in thin-film modules[C]//2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Calgary: IEEE, 2020: 384-388.
- [12] BHOOPATHY R, KUNZ O, JUHL M, et al. Outdoor photoluminescence imaging of photovoltaic modules with sunlight excitation[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2018, 26(1): 69-73.
- [13] KUNZ O, REY G, BHOOPATHY R, et al. Outdoor PL imaging of crystalline silicon modules at constant operating point[C]//2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Calgary: IEEE, 2020: 2140-2143.
- [14] DOLL B, HEPP J, HOFFMANN M, et al. Photoluminescence for defect detection on full-sized photovoltaic modules[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2021, 11(6): 1419-1429.
- [15] POTMA E O, KNEZ D, ETTEMBERG M, et al. High-speed 2D and 3D mid-IR imaging with an InGaAs camera[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(9): 096108.
- [16] 池林辉. 基于 InGaAs 相机的高照度下太阳能电池板缺陷检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
CHI Linhui. Research on defect detection technology of solar panel under high illumination based on InGaAs camera[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [17] 张超, 蔡云翔, 彭怀敏. 基于 InGaAs 线性阵列探测器及扫描振镜的短波红外成像系统[J]. *电子世界*, 2020(14): 175-176.
ZHANG Chao, CAI Yunxiang, PENG Huaimin. Short-wave infrared imaging system based on InGaAs linear array detector and scanning microscope[J]. *Electronics World*, 2020(14): 175-176.
- [18] OLSEN E, FLØ A S. Spectral and spatially resolved imaging of photoluminescence in multicrystalline silicon wafers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(1): 011903.