

# 基于线阵 InGaAs 相机的光伏电池板光致发光成像系统研究<sup>\*</sup>

黄益东 钱芸生 张益军 徐晗

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

**摘要:** 现有光伏电池板缺陷检测多采用电致发光激励以及面阵相机检测等方法,存在操作复杂、效率低等问题,为此开展基于线阵 InGaAs 相机的光伏电池板光致发光成像系统研究。首先,设计线阵 InGaAs 相机硬件框架与逻辑框架,以 FPGA 驱动线阵 InGaAs 相机完成数据采集与图像显示。通过固定模式噪声去除算法与直方图双向均衡算法,去除了缺陷图像中固定模式噪声,同时提升了图像的对比度和清晰度。最后通过搭建整体成像系统,通过光致发光成像对不同种类的光伏电池板的多种缺陷进行成像实验,检测精度达到 0.2 mm/pixel。实验结果表明该系统可以完成对单晶硅与多晶硅光伏电池板中隐裂、黑斑、坏片、混档和脏污等缺陷的检测。

**关键词:** 光致发光;FPGA;缺陷检测;InGaAs 传感器;光伏电池板

中图分类号: TN219 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1060

## Research on photoluminescence imaging system for photovoltaic panels based on linear array InGaAs camera

Huang Yidong Qian Yunsheng Zhang Yijun Xu Han

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

**Abstract:** The existing defect detection methods for photovoltaic panels mostly use methods such as electroluminescence excitation and area array camera, which have problems such as complex operation and low efficiency. Therefore, research on photoluminescence imaging system for photovoltaic panels based on linear array InGaAs camera is carried out. Firstly, design the hardware and logic framework of the linear InGaAs camera, and use FPGA to drive the linear InGaAs camera to complete data acquisition and image display. By using fixed mode noise removal algorithm and histogram bidirectional equalization algorithm, fixed mode noise in defect images was removed, while improving the contrast and clarity of the images. Finally, by building an overall imaging system and conducting imaging experiments on various defects of different types of photovoltaic panels through photoluminescence imaging, with a detection accuracy of 0.2 mm/pixel. The experimental results show that the system can detect defects such as hidden cracks, black spots, damaged chips, mixed grades, and dirt in monocrystalline silicon and polycrystalline silicon photovoltaic panels.

**Keywords:** photoluminescence;FPGA;defect detection;InGaAs sensor;photovoltaic panel

## 0 引言

可再生能源的重要性日益凸显,太阳能作为一种清洁、可再生的能源已被社会广泛认可。光伏发电是对太阳能资源的有效利用,通常由光伏电池板将光能转换成电能<sup>[1]</sup>。随着光伏发电技术的不断进步,对光伏电池板的要求逐渐提高。在光伏电池板的生产、装配、使用过程中,会出现各

种缺陷,造成其转换效率和使用寿命的衰减。因此,如何对光伏电池板中的缺陷进行准确且高效的检测是光伏发电中至关重要的问题<sup>[2]</sup>。

在光伏电池板缺陷检测领域,最常见的方法主要有共振超声振动法、红外成像法、电致发光法和光致发光法。2020年,Jang等<sup>[3]</sup>开发了一种非接触式、高速、扫描式激光超声系统,该系统使用高重复率激光器产生超声波,激光多

普勒测振仪在一发一收模式下同时传感和扫描两束激光束,通过提取裂纹诱导的非线性超声调制分量,成功检测出宽度小于 10  $\mu\text{m}$  的微裂纹,但共振超声振动法仅适用于裂纹缺陷的检测,使用场景比较单一。2019 年, Akram 等<sup>[4]</sup>提出一种改进的红外成像方案,通过改变单个光伏电池的电气行为来调节光伏电池板的温度,以获得不同的温度条件,能在室内和室外情况下都获取到缺陷信息,并且对缺陷的定量影响进行估计,但由于不同材料的反射率不同,红外成像法易受其他物体表面反射的干扰,很难获取高精度的图像。2018 年, Rajput 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于电致发光法的光伏电池板性能分析方法,用于定量测量单个光伏电池板的电气性能参数,对于两个具有不同程度缺陷的光伏电池板,实现了单个光伏电池板的串联电阻和暗饱和电流密度的定量估计,并计算光伏电池板的潜在改进,但电致发光法需要对光伏电池板进行通电操作,其检测效率不高。

光致发光成像方法为光伏电池板缺陷检测提供了一种高效的解决方案<sup>[6]</sup>,光致发光成像方法利用特定波长的光源激励光伏电池板,使其发出波长在 800~1 300 nm 之间的荧光,缺陷处的荧光强度弱于无缺陷处,因此可以通过相机等光电传感器采集光伏电池板发出的荧光以判断电池板是否存在缺陷<sup>[7]</sup>。InGaAs 材料器件在光通讯领域应用广泛,并以其性能优良、稳定、可在常温工作、低成本等优势在短波红外(short-wave infrared, SWIR)焦平面(focal plane array, FPA)探测器应用领域备受青睐。传统的互补金属氧化物半导体器件(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)或电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)大多为硅基材料制成,在 800~1 300 nm 的短波红外区间内,硅材料器件的量子效率远不及 InGaAs 材料器件<sup>[8]</sup>。按照扫描类型可以将光伏电池板的检测方案分为两类:面扫描和线扫描,两者均能记录被采集物体的亮度和位置信息,但线扫描所需的像素成本与激励光源成本远低于面扫描,且更适用于对光伏电池板进行持续检测<sup>[9]</sup>。

针对光伏电池板缺陷检测领域中各类方法在检测范围、检测精度和检测效率上的不足,以及硅基材料器件量子效率相对较低以及面扫描的高成本等问题,本文基于线阵 InGaAs 相机,并以线阵 LED 光源作为激励源,从而设计光伏电池板光致发光成像系统。以可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)完成相机的驱动,通过相机中的电路对图像传感器输出的信号进行实时采集和处理,并通过数字图像处理算法提高成像质量,最终以 Cameralink 格式呈现光伏电池板的光致发光缺陷图像。同时通过实验对不同材质的光伏电池板中多种缺陷进行检测,从而验证成像系统的有效性。

## 1 整体方案设计

### 1.1 光致发光成像原理

半导体材料的光致发光效应基于光子能量的吸收传递

和载流子的跃迁辐射来实现。当入射光子的能量高于半导体材料本身的带隙能量时,半导体会处于一种激发电态,这时入射的光子会被吸收,同时在导带底和价带顶中分别形成电子和空穴。在相应能级上停留极短的时间后,电子会向着价带的最小值(即本征态)进行能量和动量的弛豫,最终和空穴复合,再次以光子的形式向外辐射<sup>[10]</sup>。

光致发光可按延迟时间分为两类:荧光和磷光,通常荧光在激发光源消失后同时消失,而磷光则在激发光源消失后的一定时间内仍然存在。荧光和磷光产生过程的电子能级转换示意图如图 1 所示,其中 S0 为电子基态单重态,S1 为单重激发电态,T1 为三重激发电态。处于 S0 的分子吸收能量后,若在跃迁过程中不发生自旋方向的改变,则分子处于 S1;若此时分子发生了系统间交叉,则会进入具有不同自旋态的较低能量电子态 T1。在 S1 上的电子,通过振动弛豫先降低到激发电态的最低振动能级,再通过发射光子返回 S0,就会产生持续  $10^{-5} \sim 10^{-8}$  s 的荧光。而位于 T1 的分子,通过振动弛豫先降低到最低振动能级,随后当分子释放出光子而降低能量到 S0 时,就会产生持续  $10^{-4} \sim 10^4$  s 的磷光<sup>[11]</sup>。

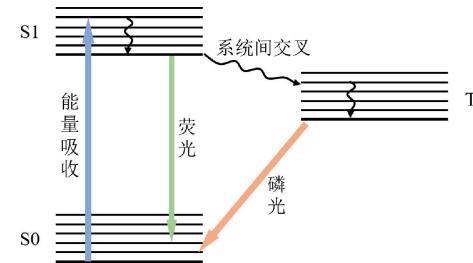


图 1 荧光和磷光发生过程的电子能级转换示意图

光伏电池板所用的半导体材料多为硅,其禁带宽度为 1.12 eV,其光致发光的中心波长可由式(1)得出:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为硅材料光致发光的中心波长,  $h$  为普朗克常量,  $c$  为真空中的光速,  $E_g$  为禁带宽度。因此可以得知硅材料光致发光的峰值波长为 1 100 nm,而由于光伏电池板中存在杂质掺杂,其实际峰值波长会达到 1 150 nm<sup>[12]</sup>。

光伏电池板在未受到外部激励时,其可见表面仅有如破损、碎裂或划痕等显性缺陷,无法直接获取内部隐性缺陷的情况。因此通过对光伏电池板进行光致发光激励,使其产生荧光,缺陷处的少数载流子密度较小,即其荧光强度弱于无缺陷处,而后通过对该波段响应较强的 InGaAs 相机捕获光伏电池板发出的荧光信息以判断是否存在缺陷<sup>[13]</sup>。

### 1.2 系统整体设计

光伏电池板光致发光成像系统主要包括线阵 InGaAs 相机、成像光学系统、程控电源、线阵光源、可调速传送带、待测光伏电池板和测试上位机等部分,成像系统结构框图如图 2 所示。

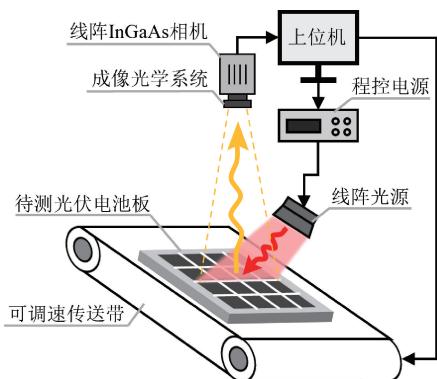


图 2 成像系统结构框图

不同于文献[14],本系统采用了对光伏电池板激励能力最强的 850 nm LED 构成的线阵光源而非激光光源,以更低的成本实现了更均匀的光致发光激励。此外,本系统采用相同像素下成本更低的线阵 InGaAs 相机而非面阵 CCD 相机收集光伏电池板光致发光产生的光信号,通过采集多列一维信号,并将其转化为二维缺陷图像在上位机中显示。成像光学系统由 GF5018M SWIR 镜头和 1 150 ± 50 nm 带通滤光片组成,可在为线阵 InGaAs 相机汇集光信号的同时滤除其余波段光的干扰。可调速传送带负责运输待测光伏电池板,配合线阵 InGaAs 相机对整块光伏电池板进行扫描成像。测试上位机负责控制系统中各个部件的启停,同时通过 Cameralink 采集卡接收线阵 InGaAs 相机采集到的缺陷图像信息并实时显示。

## 2 线阵 InGaAs 相机设计

### 2.1 硬件设计框架

本系统设计的关键点在线阵 InGaAs 相机的设计与

驱动。为了捕获光伏电池板受激励发出的特定波长的近红外光,选用 Spectrum in Motion France 的一款型号为 TLS512 的 InGaAs 线性图像传感器作为本系统的图像传感器。该传感器分辨率为  $1 \times 512$ ,在 900~1 700 nm 波段的光谱响应大于 65%,最大时钟为 20 MHz,最大扫描速率 78 000 lens/s,两路模拟信号输出,由 4 路外部信号 CTIARST,CDSRST,RD,SYNC 控制,其中 RD 信号的时间决定了曝光时间。InGaAs 图像传感器是相机的核心其性能参数在一定程度上会影响其他器件的选型与硬件电路的设计,传感器主要性能参数如表 1 所示。

表 1 TLS512 传感器主要性能参数

性能参数	参数数值
传感器材料	InGaAs
像素数量/pixel	$1 \times 512$
像素尺寸/ $\mu\text{m}$	$12.5 \times 12.5$
时钟频率/MHz	0~20
光谱范围/ $\mu\text{m}$	0.9~1.7
输出方式	2 路模拟信号(1.1~2.5 V)
暗电流/pA	0.29
读出噪声/mV	1.5
工作温度/°C	-10~70

线阵 InGaAs 相机硬件电路围绕 TLS512 线阵 InGaAs 图像传感器,主要分为 5 个部分电路的设计:线阵 InGaAs 传感器电路,电压转换电路,信号处理电路,FPGA 子卡和图像显示电路,线阵 InGaAs 相机结构框图如图 3 所示。

线阵 InGaAs 传感器电路由线阵 InGaAs 传感器以及外围电路组成,负责将成像光学系统中的光信号转换为模

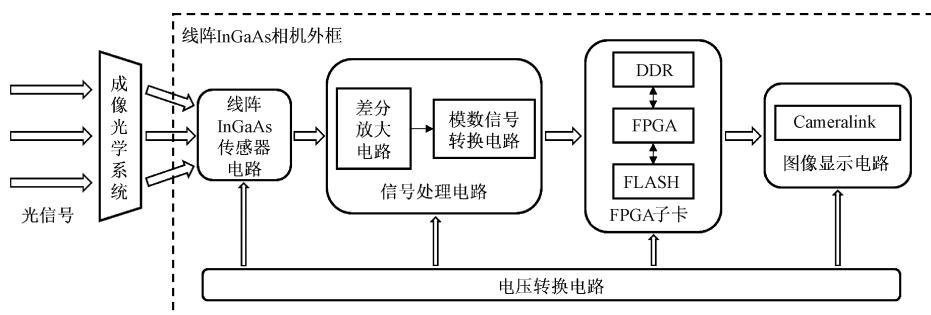


图 3 线阵 InGaAs 相机硬件电路框图

拟电信号。电压转换电路由多种电源芯片组成,负责驱动各部分硬件电路。信号处理电路由电压跟随器、差分放大器和数模转换器组成,负责对线阵 InGaAs 传感器电路产生的模拟信号进行预处理,并将其转换为数字信号。FPGA 子卡由 FPGA 芯片、存储芯片和外围电路组成,负责接收数字信号并进行存储和图像处理。图像显示电路将 FPGA 输出的图像数据传输到上位机,以 Cameralink 格式进行显示。线阵 InGaAs 相机实物图如图 4 所示。



图 4 线阵 InGaAs 相机实物图

## 2.2 逻辑设计框架

逻辑设计框架以 FPGA 芯片为核心处理器完成了相机的驱动与图像的显示,主要包括了传感器驱动模块、模

数转换(analog to digital, AD)驱动模块、数据接收模块、数据缓存模块和 Cameralink 显示模块。逻辑设计框图如图 5 所示。

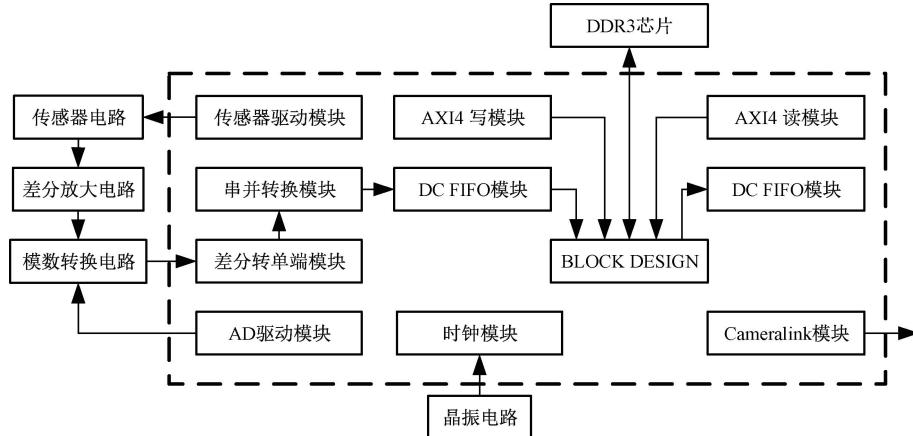


图 5 逻辑设计框图

整体数字逻辑设计以传感器驱动模块作为出发点,首先按照 TLS512 传感器数据手册对其 4 路数字驱动信号进行驱动,传感器正常工作后会以两路模拟信号的形式输出图像数据,经过差分放大电路进入模数转换电路。AD 芯片由 AD 驱动模块进行驱动与配置,在完成训练模式的数据对齐测试后,AD 芯片将两路模拟信号转换为两路 14 位低压差分信号(low-voltage differential signaling, LVDS)串行差分数字信号传输至 FPGA 内部。数据接收模块负责对 LVDS 信号进行差分转单端与串并转换操作,从而将数据缓存到异步先进先出存储器(first in first out, FIFO)中,实现数据的初步接收<sup>[15]</sup>。在数据缓存模块,数字信号在被补充为 16 位信号后进入写端 FIFO 完成位宽转换、跨时钟域等操作,然后使用高级可扩展接口(advanced extensible interface 4, AXI4)总线配置内存接口生成器(memory interface generator, MIG)实现第三代双倍数据率同步动态随机存取存储器(double data rate, DDR3)的读写操作,进而实现图像数据在 DDR3 中的缓存与处理<sup>[16]</sup>。CameraLink 显示模块则通过 DS90CR287 芯片编码芯片将图像数据传递到上位机的采集卡中,进而实现图像在上位机的实时显示。

## 2.3 固定模式噪声去除算法

固定模式噪声的主要来源是图像传感器暗电流的不均匀性,这种不均匀性表现在即使在无光照的情况下,暗电流会积分成为暗电荷并储存在像素内的电荷储存节点,从而变了暗环境下的输出电压,在全黑状态的图像上则表现为不均匀的灰度值变化<sup>[17]</sup>。含固定模式噪声的图像可视为固定模式噪声堆叠在正常图像之上,因此若要获取正常的图像,需要去除图像中的固定模式噪声部分。

在本模块中,根据线阵 InGaAs 相机的成像特点提出了固定模式噪声去除算法,该算法通过对实时图像数据与

固定模式噪声数据进行线性求差运算实现固定模式噪声的去除。通过 AXI4 总线协议控制 MIG 核,在 DDR3 芯片中开辟 5 个地址空间,通过 sel 信号选择写入的地址,其中一个地址用于存储实时图像数据,四个地址用于存储全黑状态下的图像数据,每个地址的大小为  $512 \times 400 \times 2$  Byte。对全黑状态下的 4 幅图像各个像素间进行求平均操作以降低帧间噪声的影响,从而得到更精确的固定模式噪声数据。最后对实时图像数据与固定模式噪声数据进行线性求差运算,得到去除固定模式噪声后的正常图像。固定模式噪声去除逻辑框图如图 6 所示。

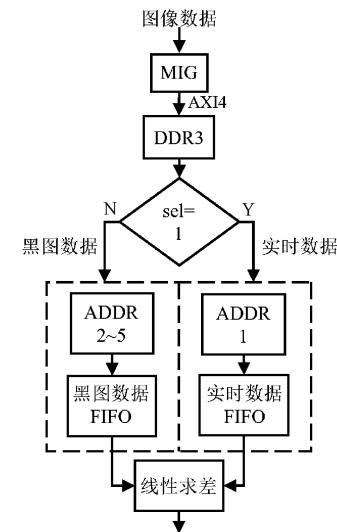


图 6 固定模式噪声去除逻辑框图

在进行数据的写操作时,若 FIFO 中的 prog\_empty 信号处于低电平状态,表示其中的数据满足写操作的需求,此时拉高 AXI4 地址通道的 AXI4\_AWVALID 信号以发起握手请求,若接收到的 MIG 中返回的 AXI4\_AWREADY

信号为高电平,则视为完成一次地址握手操作,在将地址位增加一个 BURST 的长度后,进行下一次地址握手操作。在地址握手与数据握手均完成后,进行数据的写入操作,此时通过确定 sel 信号的电平来选择写入的地址,若 sel 为低电平时,关闭光圈与遮盖镜头,获取到无外界光干扰的全黑图像数据,将其循环写入 ADDR2~5 中直至 sel 信号发生跳变;若 sel 为高电平时,相机正常成像,将实时的图像数据写入 ADDR1 中。

在地址握手与数据握手均完成后,进行数据的写入操作,此时通过确定 sel 信号的电平来选择写入的地址,若 sel 为低电平时,关闭光圈与遮盖镜头,获取到无外界光干扰的全黑图像数据,将其循环写入 ADDR2~5 中直至 sel 信号发生跳变;若 sel 为高电平时,相机正常成像,将实时的图像数据写入 ADDR1 中。写数据操作地址间的跳转由 AXI4 总线中 AWADDR 通道的信号控制,由式(2)构成。

$$AXI\_awaddr\_r = AXI\_addr\_bias + araddr\_offset + araddr\_burst \quad (2)$$

其中,  $AXI\_addr\_bias$  表示起始地址,  $araddr\_offset$  表示不同图像起始地址的偏移量,  $araddr\_burst$  代表一次突发操作代表的地址量。存储全黑状态下的图像数据地址  $AXI\_addr\_bias$  设置为  $0x8000\_0000$ ;每幅图像的地址偏移量为  $araddr\_offset = 512 \times 400 \times 2$  Byte, 即每个地址间  $araddr\_offset$  依次递增。

在进行数据的读操作时,四帧全黑状态下的图像数据  $black\_data$  与一帧实时图像数据  $noraml\_data$  从 DDR 中读出后,由于速率与位宽的不匹配,数据需进入异步 FIFO 进行跨时钟域与位宽转换操作后才能进入图像显示模块,当 FIFO 的  $prog\_full$  信号拉低时,进行一次数据的读操作。其中,在对全黑状态图像数据与实时图像数据进行线性求差前,需先将 4 片全黑状态图像地址上的数据进行求平均操作,为 4 个 FIFO 设置相同的读写时钟参数与读写使能信号,实现四帧图像数据的对齐,当 FIFO 的  $fifo\_rd\_en$  信号有效时,将四路数据同时输出,并进行累加。将累加的全黑状态图像数据右移两位,得到其平均像素数据  $average\_black\_data$ 。最终用实时图像数据  $noraml\_data$  与全黑状态下的平均像素数据  $average\_black\_data$  进行求差,即可输出正常图像。固定模式噪声算法处理对比图如图 7 所示。

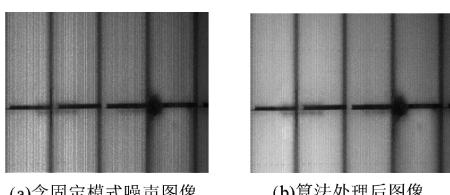


图 7 固定模式噪声算法处理对比图

## 2.4 直方图双向均衡算法

本系统所采集的红外缺陷图像整体灰度值集中在一

个小范围内,且灰度级数较少,图像整体偏暗,因此需要在系统中对图像的灰度值进行处理,从灰度密度和灰度间距对图像进行处理,从而优化图像质量<sup>[18]</sup>。此处先将 14 位有效数据转换为 8 位数据,其灰度区间从 0~16 383 变为 0~255,从而降低资源消耗。

首先对图像的直方图进行统计,再从灰度密度的角度对原始图像进行均衡化处理,如式(3)所示。

$$D_m = \frac{E-1}{S} \sum_{i=0}^m H(i), \quad m = 0, 1, \dots, E-1 \quad (3)$$

其中,  $D_m$  表示均衡化后的直方图像素值,  $E$  表示图像灰度级数,  $S$  表示图像的像素总数,  $H(i)$  表示图像的原始直方图。随后通过对非零像素级数进行累加操作,从而获取包含有效图像数据的灰度级数,如式(4)所示。

$$L_0 = 0, L_m = \begin{cases} L_{m-1}, & P_m = P_{m-1} \\ L_{m-1} + 1, & P_m \neq P_{m-1} \end{cases} \quad m = 1, 2, \dots, E-1 \quad (4)$$

其中,  $P_m$  表示第  $m$  个灰度级之前所代表的累计像素数量,若相邻两个灰度级之间累计像素数量不同,则视为当前灰度级存在有效数据,从而增加  $L_m$  的值;  $L_{E-1}$  即为最终统计得到的有效灰度级数<sup>[19]</sup>。在整体灰度范围内,对有效像素灰度级按照等距原则进行排列,得到映射函数如式(5)所示。

$$V_m = L_m \times \frac{E-1}{L_{E-1}}, \quad m = 0, 1, \dots, E-1 \quad (5)$$

其中,  $V_m$  表示第  $m$  个灰度级别代表的新的灰度值,根据映射函数  $V_m$  可将处理后的图像灰度按照相等间距排列。

直方图双向均衡算法的逻辑设计主要由直方图统计模块、直方图均衡模块、灰度级数统计模块、有效灰度排列模块和灰度映射模块组成,如图 8 所示。

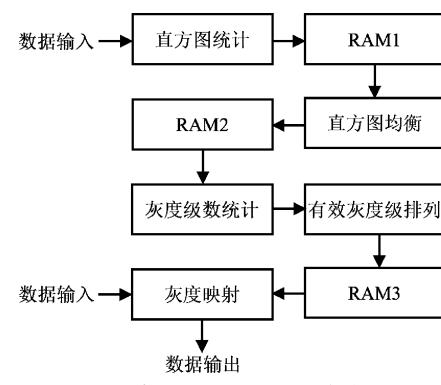


图 8 直方图双向均衡逻辑框图

将输入图像数据的直方图数据存放于 RAM1 中,本系统中图像分辨率为  $512 \times 400$ ,共有 204 800 个像素点,每个像素数据为 8 位, RAM1 的每个地址对应该灰度值的像素数量,因此设置 RAM1 的位宽为 18,深度为 256。随后对 RAM1 中的直方图数据进行均衡化操作,将得到的数据存入 RAM2 中的有效灰度级数,并对其进行排

列后,将得到的灰度映射关系存储到 RAM3 中,有效灰度排列采用查找表实现,通过预先对 256 个灰度级的间距进行缓存,有效减少了资源的使用。最终输入的图像数据通过 RAM3 提供的灰度映射表,在灰度映射模块中映射为新的灰度值,将 8 位数据重新转化为 14 位后以 Cameralink 格式输出图像。直方图双向均衡算法处理对比图如图 9 所示。

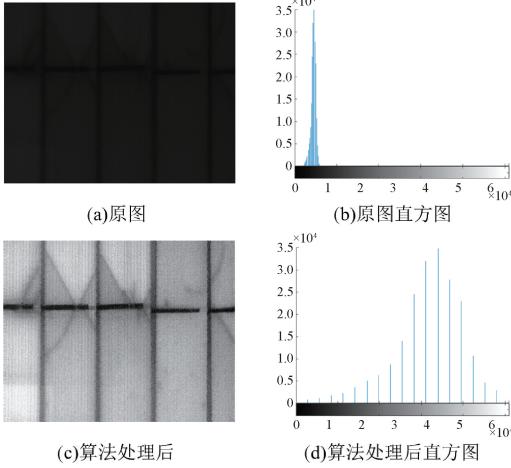


图 9 直方图双向均衡算法处理对比图

### 3 成像系统实验测试

#### 3.1 成像系统实验平台搭建

根据上述的硬件电路框架与逻辑设计,完成了线阵 InGaAs 相机的整体设计以及整体检测系统的搭建,包括线阵 InGaAs 相机、成像光学系统、程控电源、线阵光源、可调速传送带、待测光伏电池板和测试上位机等部件。成像系统实验平台实物图如图 10 所示。



图 10 成像系统实验平台实物图

实验测试中,相机工作模式选择 G1 高增益模式,曝光时间为 2.4 ms,行频为 400 lens/s,图像尺寸为  $512 \times 400$ 。相机整机工作时以 7.4 V 直流供电,工作电流 0.24 A,功耗为 1.776 W。线阵光源由 850 nm LED 阵列构成,由程控 TDK 电源以 31 V 电压,2.8 A 电流驱动,功率为 86.8 W。可调速传送带由 40 W 调速电机驱动,电机转速为 776 r/min,

此时图像中横向与纵向分辨率相匹配,相机分辨率达到 0.2 mm/pixel。

#### 3.2 光伏电池板成像实验

为验证本系统的缺陷检测效果,针对不同材质的光伏电池板中的多种缺陷进行成像实验。分别选取尺寸为 350 mm  $\times$  230 mm 的单晶硅光伏电池板和尺寸为 350 mm  $\times$  260 mm 的多晶硅光伏电池板作为待测实验样本,如图 11 所示。

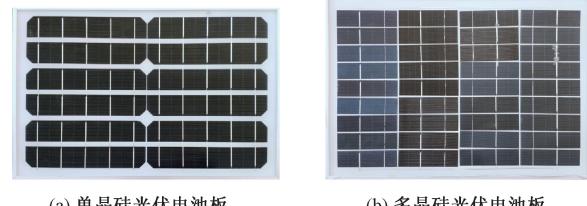


图 11 待测光伏电池板

通过光伏电池板中进行局部检测,得到多种缺陷,主要包括了隐裂、黑斑、坏片、混档和脏污等,如图 12 所示。

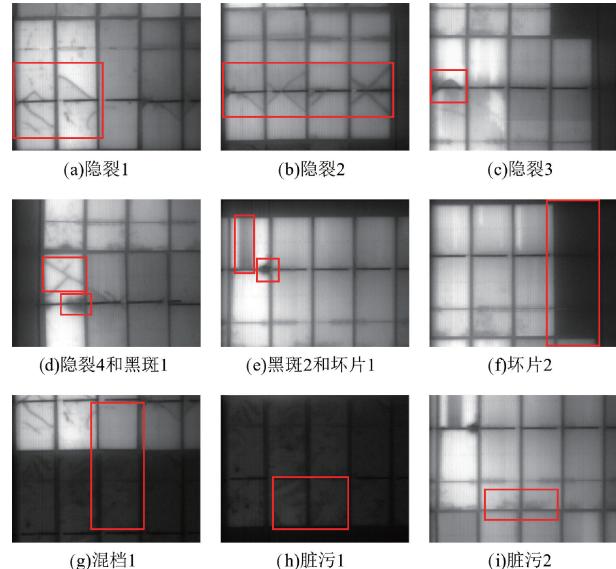


图 12 光伏电池板缺陷图像

在光伏电池板中存在多处由于生产与装配过程中的外力因素导致的隐裂缺陷,在图像中表现为方向随机的黑线;同时其存在两处因制备或生产过程中引入的黑斑缺陷,在图像中表现为斑点状黑色区域;此外还存在两处由于短路和无功率电池片引起的坏片,在图像中表现为矩形的黑色区域;并且其混用了不同转换效率的电池片,在图像中表现为明暗不同的区域;光伏电池板中还存在多处在硅片生产过程中由于外界接触导致的脏污。

从上图可以看出,缺陷图像经固定模式噪声去除算法与直方图双向均衡算法处理后,图像噪声得到明显抑制,且具有较高对比度,整体图像质量较好。文献[20]中在 4 秒内完成了对尺寸为 156 mm  $\times$  156 mm 的光伏电池板的

成像检测,其相机曝光时间为 28 ms,而本系统在 5 秒内可以完成对尺寸为 350 mm×260 mm 的光伏电池板的成像检测,并且能以 2.4 ms 的曝光时间实现对多种类型缺陷的成像检测,本系统在检测效率与检测效果上均占优势。根据实验结果可知,本系统完成了对单晶硅与单晶硅光伏电池板中隐裂、黑斑、坏片、混档和脏污缺陷的成像检测,实现了基于线阵 InGaAs 相机的光伏电池板光致发光成像系统的基本功能。

## 4 结 论

为解决当前光伏电池板缺陷检测操作复杂、效率低的问题,以 FPGA 驱动线阵 InGaAs 相机,设计了一套基于线阵 InGaAs 相机的光伏电池板缺陷检测系统。该系统由线阵 InGaAs 相机、成像光学系统、程控电源、线阵光源、可调速传送带、待测光伏电池板和测试上位机组成,具有上位机控制、图像数据采集、CameraLink 图像显示等功能,检测精度达到 0.2 mm/pixel。通过固定模式噪声去除算法与直方图双向均衡算法,去除了缺陷图像中固定模式噪声,提升了图像的对比度和清晰度。该系统经过实验测试,可以完成对单晶硅与多晶硅光伏电池板中隐裂、黑斑、坏片、混档和脏污等缺陷的检测。进一步的工作将从算法处理速度和系统检测速度的角度对系统进行优化。本文的结果为光伏电池板缺陷检测的规模化和快速化发展提供了一种有效参考手段。

## 参考文献

- [1] 王青,江华,张天宇,等. 2022 年上半年中国光伏产业发展现状及面临的问题分析[J]. 太阳能, 2022, (10): 5-12.
- [2] 赖天舒,刘怀广,汤勃,等. 多特征融合的太阳能电池片缺陷检测[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 605-613.
- [3] JANG J, LIU P, KIM B, et al. Silicon wafer crack detection using nonlinear ultrasonic modulation induced by high repetition rate pulse laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 129: 106074.1-106074.8.
- [4] AKRAM M W, LI G, JIN Y, et al. Improved outdoor thermography and processing of infrared images for defect detection in PV modules[J]. Solar Energy, 2019, 190: 549-560.
- [5] RAJPUT A S, HO J W, ZHANG Y, et al. Quantitative estimation of electrical performance parameters of individual solar cells in silicon photovoltaic modules using electroluminescence imaging[J]. Solar Energy, 2018, 173: 201-208.
- [6] BINETTI S, LE D A, SASSELLA A. Photoluminescence and infrared spectroscopy for the study of defects in silicon for photovoltaic applications[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 130: 696-703.
- [7] 伊欣同,单亚峰. 基于改进 Faster R-CNN 的光伏电池板缺陷检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 40-47.
- [8] GUADA M, MORETÓN Á, RODRÍGUEZ-CONDE S, et al. Daylight luminescence system for silicon solar panels based on a bias switching method[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(11): 3839-3853.
- [9] 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.
- [10] 张玮华. 太阳能电池硅片缺陷自动检测分类方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [11] 马小龙. 基于光致发光的类单晶硅片缺陷检测技术研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2021.
- [12] STRUMPEL C, MCCANN M, BEAUCARNE G, et al. Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency—An overview of available materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(4): 238-249.
- [13] OLSEN E, FLØ A S. Spectral and spatially resolved imaging of photoluminescence in multicrystalline silicon wafers[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(1): 011903-1-011903-3.
- [14] TEO T W, ABDULLAH M Z. In-line photoluminescence imaging of crystalline silicon solar cells for micro-crack detection [C]. 2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques(IST), IEEE, 2016: 66-70.
- [15] 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]. 江苏: 南京理工大学, 2020.
- [16] 马飞,刘琦,包斌. 基于 FPGA 的 AXI4 总线时序设计与实现[J]. 电子技术应用, 2015, 41(6): 13-15, 19.
- [17] XIE S, THEUWISSEN A J P. Suppression of spatial and temporal noise in a CMOS image sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(1): 162-170.
- [18] 朱林林,王国中,滕国伟,等. 基于图像增强处理的 CDVS 匹配算法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4): 123-128.
- [19] 陈尧,尹丽菊,咸日常,等. 基于 NSCT 和改进 Pal\_King 算法的电力设备红外图像增强方法[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(11): 236-241, 287.
- [20] GISELE A, CHI M, JENSEN O B, et al. Photoluminescence imaging induced by laser line scan: Study for outdoor field inspections[C]. 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), IEEE, 2018: 395-399.

## 作者简介

- 黄益东,硕士研究生,主要从事光电信息探测与 FPGA 开发。  
E-mail: huangyd093@163.com
- 钱芸生(通信作者),教授,博士生导师,主要从事光电成像器件、系统与相关测试技术研究。  
E-mail: yshqian@njust.edu.cn