

# CIGS 薄膜太陽能板之光致發光 自動光學檢測系統開發

## An Automatic Inspection System Development Based on Photoluminescence for CIGS Thin Film Solar Panels

林志豪、陳銘福、陳柏睿、蔡和霖、連俊傑

Chih-Hao Lin, Ming-Fu Chen, Po-Jui Chen, Ho-Lin Tsay, Chun-Chieh Lien

太陽能電池是作為光電能源轉換的重要基本元件，而光電轉換效率與製造成本是最重要的兩大關鍵因素。CIGS 薄膜太陽能電池可以節省大量原料又具可撓特性，寬廣的吸收光譜範圍與 18% 以上的光電轉換效率，被認為具有很好的發展潛力。設計開發之 CIGS 薄膜太陽能板之光致發光 (photoluminescence, PL) 自動光學量檢測系統設備包含 PL 光譜量測與 PL 光學檢測兩套系統，並可與太陽能板產線整合來進行 CIGS 薄膜太陽能板的線上全檢。系統設備可對最大尺寸為長 1220 mm × 寬 620 mm 的薄膜太陽能板進行快速螢光光譜掃描、螢光影像拍攝及量檢測資料處理分析，每片太陽能板可在 60 秒的節拍時間 (takt time) 內完成進出料及螢光全波段光譜量測或高解析影像的擷取，然後在出料的時間內完成檢測分析，同時輸出資料至機器學習系統並預測終端產品發電效能，符合生產線速度需求，兩套 PL 量檢測系統的穩健性與檢測精確性也通過產線驗證，提供上銀光電公司的太陽能電池產線之線上全檢測服務，除可提前檢出不良品外，並可依檢測分析與研判結果即時調整製程與設備。

Solar cells are the important fundamental components for photovoltaic energy conversion. Photovoltaic conversion efficiency and manufacturing cost for solar cells are the most critical factors. Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) thin-film solar cells can save lots of raw materials and have flexible properties, a wide absorption spectrum range and more than 18% photovoltaic conversion efficiency. Thus CIGS thin-film solar cells are considered to have good development potential. Developed automatic optical inspection system based on photoluminescence (PL) for CIGS thin film solar panels includes a PL spectra measuring subsystem and a PL optical inspection subsystem. And the system is integrated with the production line system to provide full inspection for CIGS solar panels. The system measures CIGS thin film solar panels with a length of 1220 mm and a width of 620 mm for PL spectra, PL images, and data processing. The system can load solar panels in and out and measure PL spectra or acquire PL images within a takt time of 60 seconds. At the same time as loading out the solar panel, the measured data are processed and transferred to the machine learning system to predict the photovoltaic conversion efficiency. Stability and accuracy of the system were validated in the mass production phase. The in-line full inspection service for solar

panel production line was built as well. The system helps not only for filtering out the NG products but also for real-time adjusting the manufacturing process and equipment by the comprehensive analysis results.

## 一、前言

太陽能電池產業依技術不同，可分為矽晶與薄膜等兩大類。矽晶類是採半導體製程的製造方式，因為技術比較成熟以及大量製造，使得相對生產成本仍然比較低，目前佔市場的大部分。薄膜類則是採鍍膜方式，它的特點是反應層很薄，只有幾微米，目前 CIGS 型態是其中最具效率和成本優勢的薄膜太陽能電池。在全球 CIGS 太陽能板市場需求與現況方面，因為具有光譜吸收範圍較寬、可應用於可撓式基板及製造與應用彈性比較大等優勢，極具太陽能市場需求潛力。主要商機是在維護綠色環境、建物整合太陽能及太陽能電廠部署等領域。

因薄膜太陽能電池可以製鍍幾層微米級厚度的太陽光吸收層薄膜製程，極具良好的太陽能吸收與光電轉換效率，其光電轉換率可大於 18%<sup>(1)</sup>，相較於半導體製程太陽能電池，薄膜製程方式可節省大量原材料、應用於可撓式基板<sup>(2)</sup>、在太陽光照較弱及早晨與傍晚時段(較高比率近紅外光)仍可發電<sup>(3)</sup>等特性，故而被認為是極具發展潛力的綠色能源<sup>(4)</sup>之一。CIGS 薄膜太陽能電池由玻璃基板、金屬鉬背電極、CIGS 吸收層、ZnS 緩衝層及透明導電薄膜(TCO)等所構成，其中 CIGS (copper indium gallium selenide) 的吸收層薄膜結構具有 350 nm – 1250 nm 的吸收光譜範圍及高光吸收係數 ( $> 10^5/\text{cm}$ )<sup>(5)</sup>，而相較於吸收光譜範圍在 400 nm – 700 nm 的矽晶半導體製程太陽能電池，CIGS 太陽能電池在早晨和傍晚時段則具有較佳的發電效能。

本檢測設備開發計畫為依客戶需求來研發可使用於 CIGS 薄膜太陽能電池製程中，建置太陽能板光致發光之光學檢測 (optical inspection) 與光譜量測 (spectral measurement) 之線上檢測系統機台，光致發光為薄膜材料檢測常用的工具，CIGS 薄膜發出的螢光波長約 1000 nm – 1300 nm<sup>(6)</sup>，螢光光譜的半高全寬<sup>(7)</sup>等參數可用於分析能帶間隙狀況，進而推估太陽光吸收能力。本設備可在完成 CIGS 主動層的薄膜製程之後，以本文所開發的光致發光之螢光強度與波長分佈之檢測設備，對整片太陽能板進行製程品質的即時檢測，可即時提供太陽能板製程之結果分佈及品質狀況，作為製程參數調整改善、設備參數、耗損狀態與更換的依據，以提升太陽能電池的生產品質與發電效能及競爭力。本設備可在 1 分鐘內完成一片板材的進出料及螢光之影像與波長的資料擷取與儲存，除了可提前驗出不良品，防止浪費後續上電極等製程與相關檢測<sup>(8)</sup>的成本外，還可依檢測分析與研判結果調整製程與設備。

完成客製化開發的太陽能板 PL 線上即時全檢測的 AOI 設備，是台灣儀器科技研究中心(儀科中心)結合台灣傳動產業第一大廠:上銀集團所開發，在台灣是首創且已導入專精於無錫製程之硒化銅銦鎘 (CIGS) 薄膜太陽能電池模組生產上銀光電公司的生產線。檢測設備已於 2020 年初和生產線完成系統整測及壓力測試，確認設備的功能與性能符合要求，持續提供上銀光電公司的 CIGS 太陽能電池生產線的線上全檢測需求。

本量檢測系統機台與產線系統完成整測之後，可應用於以 PL 螢光特性進行線上板材品質檢測，取得 PL 光譜分佈及 PL 螢光強度分佈與表面污染微粒檢測等資訊，以利於鍍膜製程之品質評估與篩檢，為監控產線階段成品品質的一項重要檢測設備，並可取得產線品質數據及做為建立 IoT 4.0 管理架構之基礎設施，搭配後端的資料庫與數據分析工具，可提高

生產效能及具備產線智能化之能力。一般而言，自動光學檢測系統設備均不便宜，但本系統從系統架構設計與關鍵組件選用上，已考量在可符合系統性能規格狀況下，儘量降低硬體數量與成本，使得量檢測系統具有最大的性價比及維修便利性。

## 二、系統需求規格分析與架構設計

### 1. 系統操作場景與架構

本系統依使用者之量檢測需求分為兩個獨立的量檢測站位開發：

**(1) CIGS 板材 PL 光譜量測機台：**PL 光譜量測機台主要使用於板材 PL 螢光光譜的量測與分析，由兩大系統組成：(1) 板材 PL 光譜量測系統：量測系統主要由 PL 光譜量測裝置 (8\*SWIR 光譜儀 + 激發光照明模組)、光譜資料之處理與儲存系統及光譜量測分析軟體等構成。(2) 光譜量測之定位移動平台：定位移動平台須具備可配合量測系統擷取光譜之功能及性能與精度等需求之移動與定位以及板材進出料與精密定位等功能。

**(2) CIGS 板材 PL 光學檢測機台：**PL 光學檢測機台主要使用於板材 PL 螢光分佈量測及污染物檢測，亦由兩大系統組成：(1) 板材 PL 光學檢測系統：檢測系統主要由 PL 光機取像裝置 (SWIR 面型相機與鏡頭 + 匹配照明範圍之激發光源模組)、影像資料之處理與儲存系統及光學檢測軟體等構成。(2) 光學檢測之定位移動平台：定位移動平台須具備可配合檢測系統取像之功能、性能與精度等需求之移動與定位以及板材進出料與精密定位等功能。

設備開發合作模式則為：(1) 儀科中心：負責光學檢測系統開發，包含系統規劃設計、陣列光機取像系統、檢測演算法與軟體及人機介面等。(2) 上銀科技：負責自動化平台開發，包含精密定位移動平台及上下料機械手臂。(3) 上銀光電：負責設備使用需求規格及設備系統效能與壓力測試等。(4) 由三方協同合作完成線上設備的系統整合測試與驗證。

考量能完整而正確的定義量測系統的架構及其需求規格與介面，故須清楚地描述系統的操作場景與外部介面，系統架構與操作場景如圖 1。

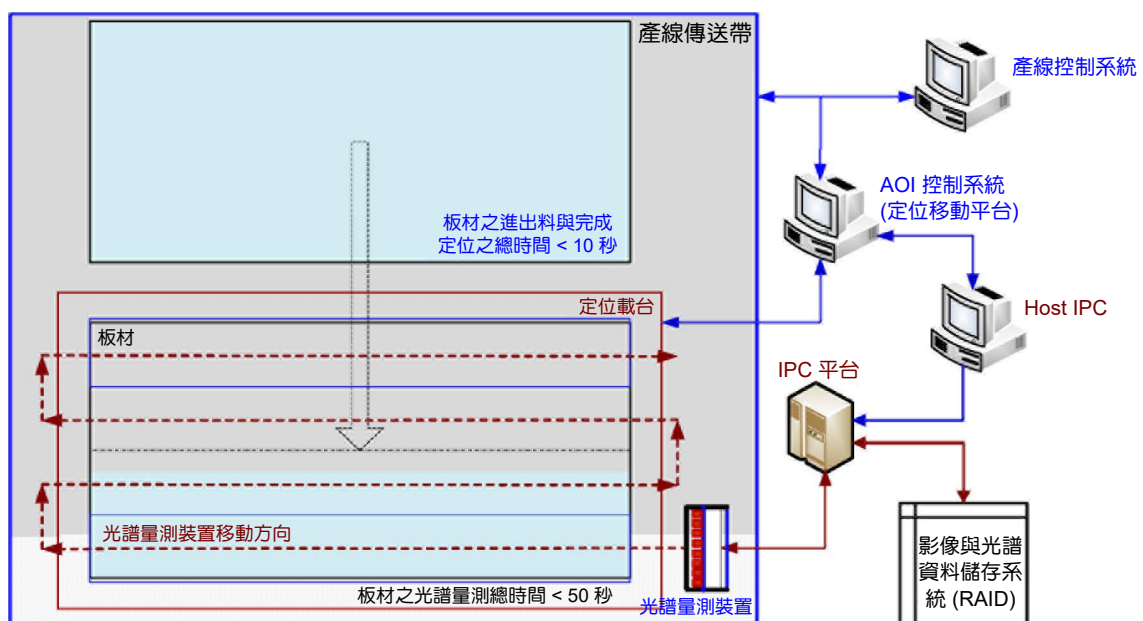


圖 1. CIGS 板材 PL 光譜量測之線上量測系統架構與操作場景。

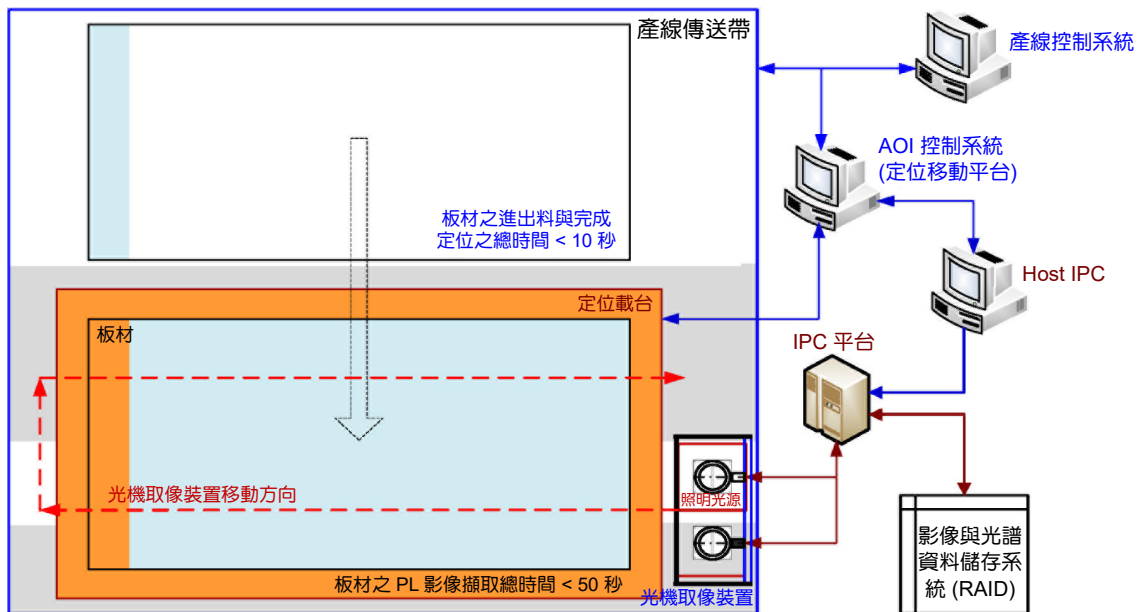


圖 2. CIGS 板材 PL 光學檢測之線上量測系統架構與操作場景。

**CIGS 板材 PL 光譜量測機台：**板材從產線的上一站傳送至 PL 光譜量測站位之後，進出料系統立即將待測板材移入量測區，並進行板材精密定位，完成後即進行全板材之 PL 螢光光譜資料量取與儲存等程序，完成之後亦立即進行資料處理與分析及品質評估參數解算，以做為板材鍍膜品質評估及製程改善之依據。

**CIGS 板材 PL 光學檢測機台：**板材從產線的上一站傳送至 PL 光學檢測站位之後，進出料系統立即將待測板材移入量測區，並進行板材精密定位，完成後即進行全板材之 PL 螢光影像擷取與儲存等程序，然後進行 PL 螢光影像校正處理與資料分析及污染物檢測等程序，以做為板材鍍膜品質評估及製程改善之根據。

兩個量檢測站位可共用一台 IPC，其廠牌與型號和已建置完成並使用於產線的另一 AOI 系統機台之 IPC 相同，且系統架構也設計為可與另一 AOI 系統之磁碟陣列儲存系統共用，故可大幅降低量檢測站之硬體建置與維修及備品之成本。

## 2. 系統需求規格與分析

依所提出之 CIGS 板材 PL 光譜量檢測之使用者需求，經初步規劃與分析後，以尺寸 620 × 1220 mm (W × L) 之待測板材為量測標的物，其系統需求規格分述如下：

### 2.1 板材 PL 光譜量測機台

- (1) 量測項目：板材 PL 光譜波長分佈量測及 PL 光譜分佈評估參數解算，項目包含 (A) 單點：光譜範圍中心波長、波寬 (3σ)、光譜輻射強度；(B) 全部量測點／板材：中心波長之平均值與標準差、波寬之平均值與標準差、光譜輻射強度之平均值與標準差。
- (2) 光譜量檢測效能：(A) 待測板材進出料與定位效能：總時間 < 10 秒；(B) 光譜量測裝置之量取效能：總時間 < 50 秒。(C) 檢測效能：每片板材之量測解算時間須 < 60 秒。

### 2.2 板材 PL 光學檢測機台

- (1) 檢測項目：以板材 PL 螢光強度分佈評估鍍膜品質；板材表面污染物之檢測。

- (2) PL 螢光量檢測之需求規格：(A) PL 螢光強度分佈量測 (評估參數)：以 PL 螢光影像輻射度之平均值 ( $m_{PL}$ ) 與標準差 ( $\sigma_{PL}$ ) 評估板材鍍膜品質。(Based on：(1) 全板材範圍，(2) 每幅影像之板材範圍，(3) 標定區域範圍)；(B)  $m_{PL}$  與  $\sigma_{PL}$  之篩檢標準可以操作介面加以設定；(C) 板材表面污染物檢測：尺寸  $> 750 \times 750 \mu\text{m}$  ( $3 \times 3 \text{ pixels}$ ) 者須檢出。
- (3) 光學取像效能：(A) 待測板材進出料與定位效能：總時間  $< 10$  秒；(B) 光機取像裝置之取像效能：總時間  $< 50$  秒。
- (4) 檢測效能：每片板材檢測解算時間須  $< 60$  秒。

### 3. 系統設計與分析

依上述的系統需求規格進行規劃與分析之後，CIGS 板材 PL 線上量檢測系統由 CIGS 板材 PL 光譜量測機台 (板材 PL 螢光光譜量測與分析) 及 CIGS 板材 PL 光學檢測機台 (板材 PL 螢光分佈量測與評估及污染物檢測) 構成。兩者之系統基本架構很類似，以 PL 譜量測裝置或 PL 光機取像裝置、資料處理與儲存系統、精密定位移動平台、系統量檢測軟體及系統操作管理軟體等次系統所構成，CIGS 板材 PL 光譜量測與光學檢測之線上量測系統的功能方塊與介面之設計如圖 3 所示；茲將各次系統之功能分述如下：

- (1) **PL 光譜量測裝置**：主要功能為在滿足系統之光譜資料量測效能需求下，快速量取所需解析度的板材 PL 螢光光譜資料。光譜量測裝置主要由多組高性能 SWIR 光譜儀 (8 組)、激發光照明模組等構成；每一光譜儀量取點範圍為  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，Y 軸每移動一次可同時量取  $8 \times 61$  點的光譜資料，可在 43 秒內完成  $1220 \text{ mm} \times 620 \text{ mm}$  板材之光譜量取。
- (2) **PL 光機取像裝置**：主要功能為符合系統取像效能需求下，快速取得板材 PL 螢光影像。光機取像裝置主要由面型高性能 SWIR 相機與光學鏡頭、激發光照明模組等組成，以取得檢測用板材 PL 螢光影像。在符合檢測功能與效能需求下，影像空間解析度為  $250 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ，光機取像裝置為以 2 組光學取像模組構成，每次可同時拍攝二幅影像，來回掃描一次即可在 40 秒之內完成  $1220 \text{ mm} \times 620 \text{ mm}$  板材之取像。
- (3) **資料處理與儲存系統**：PL 光譜量測裝置之螢光光譜資料及 PL 光機取像裝置之螢光影像會被即時的暫存於 IPC 記憶體中，隨之再轉存至容量 300 GB 之 SAS 磁碟中。IPC 也是光譜與影像資料之處理分析與量檢測之運作解算平台，具有雙 CPU 多核心、64 GB RAM 及 300 GB SAS 磁碟，以提供資料儲存及多執行緒 (multi-thread) 運算等功能。
- (4) **精密定位移動平台**：主要功能為提供 PL 光譜量測系統及 PL 光學檢測系統的自動精密定位與移動的需求。定位移動平台須具有重覆定位精度  $< 20 \mu\text{m}$  及最大移動速度達  $500 \text{ mm}/\text{sec}$  的性能需求，行程範圍須符合可取得板材全部範圍之 PL 螢光之光譜與影像資料。
- (5) **系統量檢測軟體**：主要功能為即時讀取完成取像而儲存於 IPC RAM 中的板材 PL 光譜資料及影像資料，再進行板材 PL 光譜評估參數解算以及進行 PL 螢光影像校正處理及量測評估參數解算與污染物檢測等，可評估鍍膜分佈與品質及依檢測標準篩檢板材表面瑕疵，然後產生及儲存量檢測結果，再依操作需求將之儲存於磁碟陣列儲存系統。
- (6) **系統操作管理軟體**：主要功能為提供 PL 光譜量測機台及 PL 光學檢測機台的操作與管理及圖形使用介面 (GUI)，以利於工程師與 OP 進行系統之參數設定、操作管理與監控及異常狀況處理等工作。



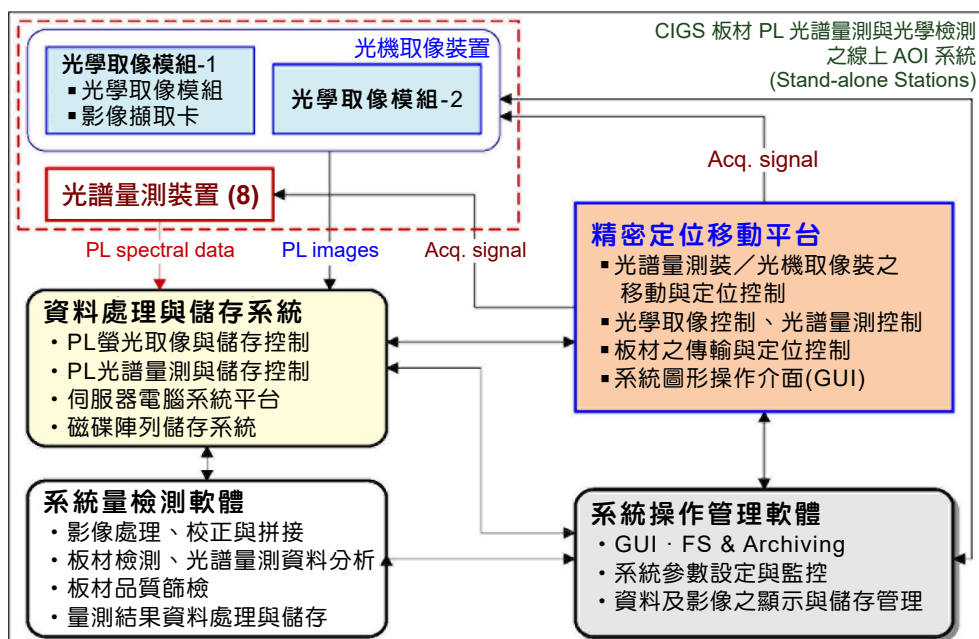


圖 3. CIGS 板材 PL 光譜量測與光學檢測之線上量測系統之功能方塊與介面圖。

考量關鍵組件的性能與品質、選擇彈性、來源穩定性以及產品更新時可藉由更換組件與調整系統軟體參數來提昇量檢測系統性能等因素，故以市購產品為選用標的。故經評估市售關鍵組件規格與性能以及完成系統架構與設計分析後，PL 光譜量測裝置、PL 光機取像裝置、資料處理與儲存系統及精密定位移動平台等次系統與硬體需求規格及設計分析如下：

### (1) PL 光譜量測裝置

- 以多光譜儀構成可同時進行多點光譜量測之系統架構設計，光譜量測儀之可量測光譜範圍：900–1700 nm，量測積分時間範圍：1 ms–65 sec。
- 單一光譜儀之單點量測代表範圍：20 mm × 20 mm，板材長短邊之量測點數分別為 61 點與 31 點；單次光譜量測時間：0.16 秒，完成長邊 (X 方向) 61 點量測時間  $\approx$  10 sec。
- 完成板材量測之短邊 (Y 方向) 橫向移動 3 次，每次移動之板材量測寬度 160 mm，光譜儀需求數為 8 台。因此共掃描 4 次，每片板材之光譜量測總時間  $\approx$  43 秒。
- 激發光照明範圍須涵蓋: 180 × 50 mm。
- PL 光譜量測裝置之架構設計如圖 4 所示；8 組光譜儀之測頭與照明模組整合，於 Y 軸上移動來量取光譜資料，搭配 X 軸移動，可進行全板材之光譜量測。

### (2) PL 光機取像裝置

- 以面型光機取像裝置取得待測板材之 PL 螢光影像，以進行板材之鍍膜品質評估及表面污染物檢測。
- 物空間解析度：250  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，影像視野 160 mm × 128 mm；圖 5 為 PL 光機取像裝置架構設計，由兩組光學取像模組構成，每組光學取像模組配置 1 組面型高亮度 PL 激發光照明模組。激發光照明模組是以多個照明元件加以排列製作而成，提供符合照明範圍與強度及均勻性需求之激發光源，照明範圍涵蓋 180 mm × 140 mm。
- 相機：解析度 640 × 512 pixels、15 × 15 m/CCD、光譜涵蓋 900–1700 nm。鏡頭 WD  $\geq$  250 mm，可搭配 SWIR 相機。單幅影像 (PL 螢光) 之取像曝光時間 < 1.0 秒。

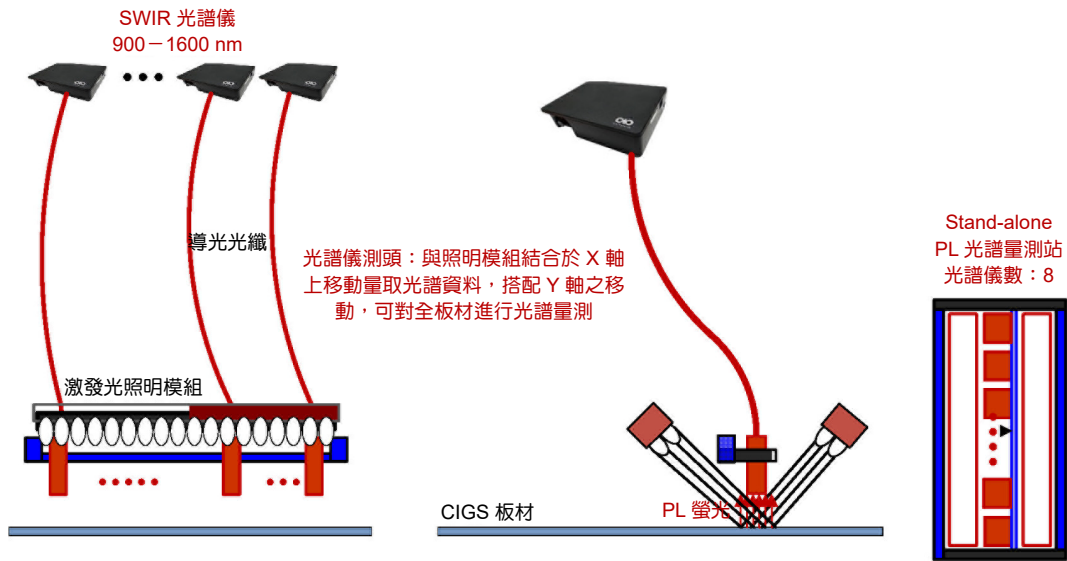


圖 4. PL 光譜量測裝置之架構設計。

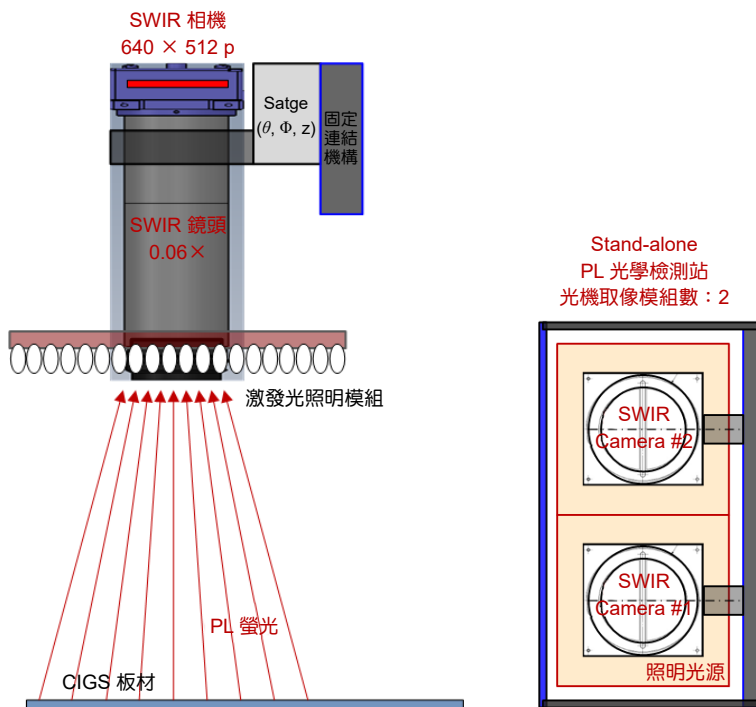


圖 5. PL 光機取像裝置之架構設計。

- 光機取像裝置於 X 軸向依序移動進行 PL 螢光取像，搭配 Y 軸移動 1 次，再於 X 軸向移動進行取像，即可完成全板材之 PL 螢光影像擷取，總取像時間約 40 秒。
- 單一光學取像模組重量  $\leq 12$  Kg (包含相機、鏡頭、激發光照明模組、機構、三軸微調滑台等)，光機取像裝置之總重量  $\leq 25$  Kg。

### (3) 資料處理與儲存系統

- 儲存系統架構與容量：IPC 採用伺服器等級電腦平台，以 PCIE 介面及影像擷取卡與兩組光機取像模組進行影像資料傳輸。IPC 亦藉由 PCIE 介面與磁碟陣列儲存裝置連結，以儲存影像資料及量檢測結果。
- 量檢系統之主要硬體項目：(1) CIGS 板材 PL 光譜量測系統：SWIR (900–1700 nm) 光譜儀 8 台；PL 激發光照明模組 1 組；IPC 電腦伺服器平台 1 台。(2) CIGS 板材 PL 光學檢測系統：PL 螢光光學取像模組 2 組；PL 激發光照明模組 1 組；IPC 電腦伺服器平台 (與 PL 光譜量測系統共用)。

### (4) 精密定位移動平台

- 取像移動架構：待測物完成定位之後，採取以移動 PL 光譜量測裝置或 PL 光機取像裝置的架構與方式進行 PL 光譜量測或影像擷取。
- 精密移動定位平台初步需求規格：
  - a. 三軸行程範圍：X ≥ 1240 mm、Y ≥ 400 mm、Z ≥ 200 mm。三軸之最大移動速度須達 500 mm/sec；重覆定位精度 ≤ 20 μm。
  - b. 軸向承載能力須 > 25 公斤 (可安裝 PL 光譜量測裝置或 PL 光機取像裝置)。
- 具有 X、Y、Z 軸防撞感應器，並可以軟體方式設定行程的安全極限，個別防撞感應器位置於最大行程內可依系統需求進行調整，機構潤滑須使用無塵油。

機台研發規格整理如表 1：

表 1. 機台研發規格表。

機台站點	PL 光譜量測機台	PL 光學檢測機台
量測光譜範圍	900–1700 nm	900–1700 nm
光譜解析度／影像解析度	≤ 10 nm	250 μm/pixel
激發光照明範圍	180 × 50 mm	180 mm × 140 mm
單次量測／拍攝範圍	2mm × 2 mm	160 mm × 128 mm
每片總量測點數／拍攝張數	61 × 31	10 × 4
總量測時間	≤ 60 sec	≤ 60 sec

## 三、量檢測系統建置

### 1. PL 光譜量測裝置

本裝置主要包含下列元件：

- 激發光高功率 LED 控制電路板及散熱元件  
PL 等非線性光學效應需要高強度激發光源，故本裝置使用自行設計並委外製作的電路板，不使用市售控制設備以節省成本。自行設計之高功率電路板除了連接高功率電源供應器與控制電腦外亦可監控散熱元件，並在散熱元件異常時通知產線系統緊急停機以避免電路板損壞。
- 激發光高功率 LED 陣列  
由 20 顆 LED 組成的陣列需要在工作距離處之特定範圍內達到均勻的照明，設計製作完成



後再使用積分球掃描照明範圍內光強度以確保光源均勻性。

- 激發光高功率 LED 濾鏡

因白光 LED 使用藍光 LED 晶片搭配黃光螢光粉，在高光強度的情況下會產生一些近紅外光，故需另加近紅外光濾鏡避免干擾 PL 光譜量測結果。

- 光譜儀測頭與導光光纖

由 8 組光譜儀測頭與導光光纖組成，測頭將板材發出的螢光導入光纖內，因激發光強度遠大於螢光，光譜儀內激發光波長的整數倍波段附近會出現明顯雜訊，嚴重干擾螢光光譜分析結果。故此處光路加上了可見光濾鏡以得到正確的螢光光譜。

- 光譜儀與 USB 連接線

光譜儀使用 8 台市售 OtO 產品，並使用 USB 傳輸線供電並傳輸資料。為強化操作穩定性，USB 線接到 USB Hub 再接到控制電腦，光譜儀用電源由 USB Hub 獨立提供而不和控制電腦的其他元件共用。

圖 6 為 PL 光譜量測裝置組裝完成後之圖片，此裝置架設在精密定位移動平台上，藉此掃描板材上不同區域的光譜。

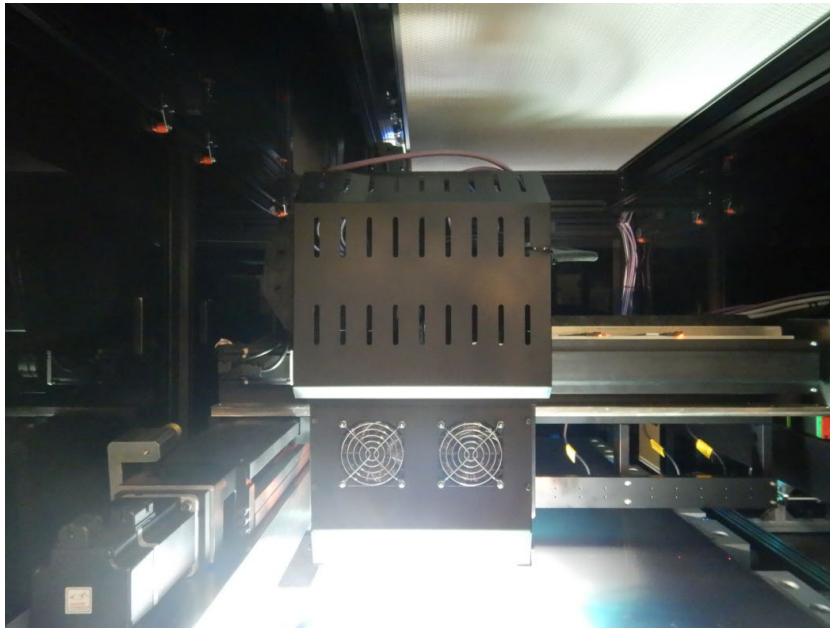


圖 6. PL 光譜量測裝置之實體圖。

## 2. PL 光機取像裝置

本裝置主要包含下列元件：

- 激發光高功率 LED 控制電路版及散熱元件

和 PL 光譜量測裝置類似，本裝置亦使用自行設計並委外製作的電路板。因 PL 光機取像範圍較大，使用的 LED 數量較多，故使用四片電路板分別控制不同區域的 LED。

- 激發光高功率 LED 陣列

由於照明區域較大，需要 68 顆 LED 組成陣列使相機視野範圍內達到均勻的照明，設計製

作完成後將激發光打在白紙上，再使用輝度計檢查整個照明範圍內光強度的均勻性。

- 激發光高功率 LED 濾鏡

和 PL 光譜量測裝置類似，白光 LED 也會在高光強度的情況下會產生近紅外光，故需另加近紅外光濾鏡避免 PL 影像受到干擾。

- 相機鏡頭與濾鏡

和 PL 光譜量測裝置類似，激發光強度遠大於螢光，且鏡頭為市售品僅設計近紅外光抗反射，可見光仍然有相當的強度穿透，干擾相機影像，故 2 支相機之鏡頭皆加上可見光濾鏡以避免出現 LED 的鬼影。

- 相機與 CL 連接線

2 台相機使用市售 Raptor 產品，使用獨立的變壓器供電與 CL 傳輸線傳輸資料。因此型號為 VIS-SWIR 波段，正常量測時需要在相機光路處濾掉可見光，才能得到正確的 PL 影像。

圖 7 為 PL 光機取像裝置組裝完成後之圖片，此裝置架設在精密定位移動平台上，藉此拍攝板材上不同區域的影像，再拼接成一張整個板材的圖片。

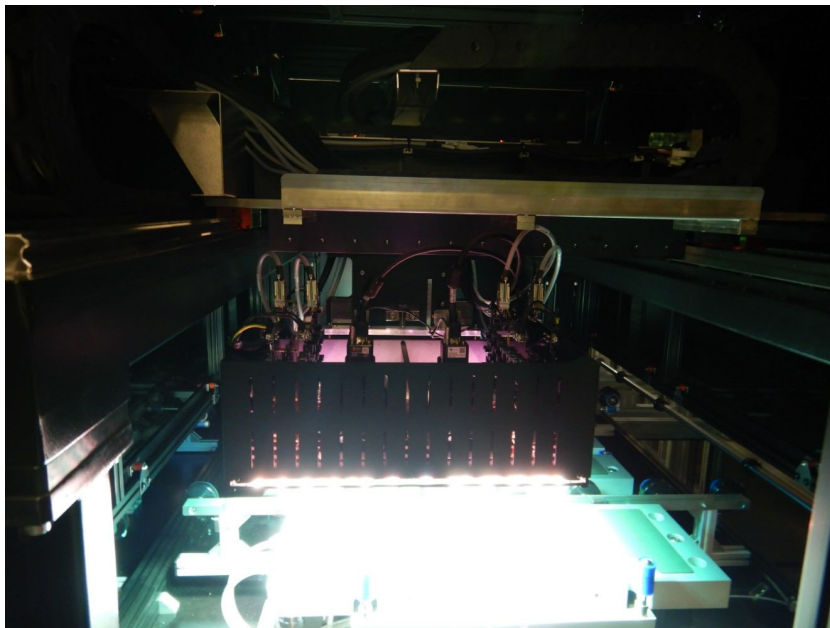


圖 7. PL 光機取像裝置之實體圖。

### 3. PL 整合控制軟體系統

本軟體系統包含系統操作管理軟體與系統量檢測軟體等軟體模組，同時與產線 PLC 系統高度整合進行全自動量檢測，將光譜資料與螢光影像合併分析並將結果上傳外部伺服器，本軟體系統主要包含下列元件：

- PLC 通訊控制

控制電腦和 PLC 以乙太網路連接，電腦和 PLC 建立 TCP socket 連線後，以 PLC 設備的封包傳輸協定讀取或寫入 PLC 的特定位址記憶體。產線端規畫一些記憶體區塊並給予特殊

意義，使控制電腦端得知目前處於流程的哪個站點並進行對應的操作，或是完成對應操作通知 PLC 進行流程下一步等。

- LED 與散熱裝置控制

可由 PLC 下指令或從使用者介面手動控制，手動控制需可單獨控制個別 LED。因為部分 LED 可能會出現亮度衰減造成照明不均勻，控制電路板韌體記憶個別 LED 上次電流設定並可在 PLC 下指令時以該電流設定驅動個別的 LED。此外，本元件亦監控 LED 與散熱裝置的狀態，在出現異常時通知 PLC 以通知產線人員進行處理。

- 光譜量測流程控制與光譜資料處理解算

電腦和產線端建立一套 PLC 通訊協定，光譜量測裝置移動到定點時 PLC 通知電腦量測光譜，量測完成後電腦通知 PLC 完成量測讓 PLC 移動光譜量測裝置到下一個量測點。電腦使用光譜儀廠商提供之 SDK 進行光譜控制與資料擷取，流程結束後再將所有光譜資料整合並進行薄膜光譜品質指標的計算。

- 相機影像拍攝流程控制與影像校正與拼接

和光譜量測流程類似，電腦和產線端建立另一套 PLC 通訊協定，光機取像裝置移動到定點時 PLC 通知電腦拍攝影像，拍攝完成後電腦通知 PLC 完成拍攝讓 PLC 移動光機取像裝置到下一個拍攝點。電腦使用相機控制卡廠商提供之 SDK 進行相機控制與影像擷取，流程結束後再對所有影像資料進行校正與拼接<sup>(9)</sup>，並從影像計算薄膜品質指標。

- 量測資料統整與外部系統資料交換

當同一片板材完成光譜量測和光機取像後，電腦將整合兩者解算的資料並輸出至外部 AI 預測系統，再將兩者解算資料與 AI 預測系統輸出的發電效能整合並輸出至資料視覺化系統供工程師即時監控並管理產線狀態。

## 四、量檢測系統整合測試與驗證

### 1. PL 光譜量測結果分析

本裝置將整個板材  $61 \times 31$  區域所量測到的光譜進行下列測試分析：

- 個別區域光譜解算分析

進行螢光光譜解算前需先進行光譜的校正，以積分球標準光源的量測結果和標準光譜強度數值比對，避免出現假訊號並消除 8 台光譜儀的機差。螢光光譜中重要的參數為螢光光譜峰值及其位置、半高全寬與光譜曲線下面積 (整體發光強度)。這些參數可用於分析 CIGS 薄膜能帶間隙的狀況並可用於推估最終產品的發電效能。

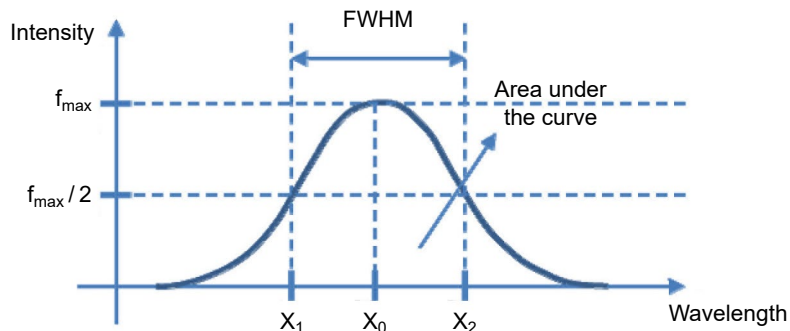


圖 8. PL 光譜與解算參數示意圖。

- 所有區域光譜解算結果整合分析

將所有區域光譜解算結果繪圖之後可以用來分析不同區域的 CIGS 薄膜特性，進而分析 CVD 製程條件的影響並優化製程參數。其中曲線下面積等同於螢光整體發光強度，整體的趨勢將類似光機拍攝影像。

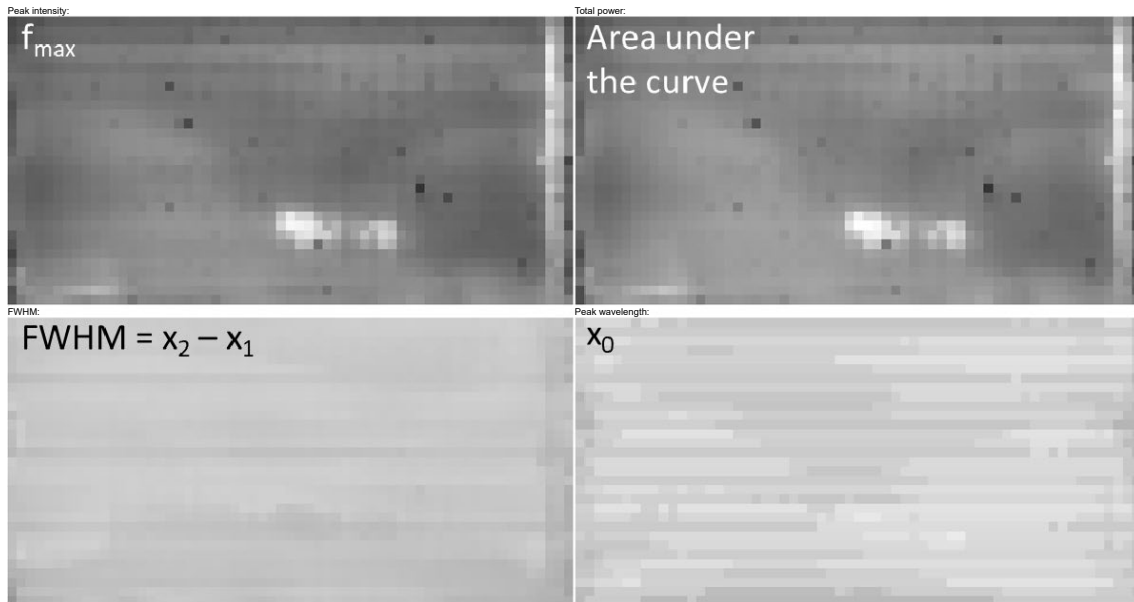


圖 9. PL 光譜解算參數空間分布圖。

## 2. PL 光機取像結果分析

本裝置將  $10 \times 4$  區域所拍攝到的影像進行下列處理：

- 個別區域原始影像輻射度校正  
原始影像中鏡頭造成的暗角效應會使得螢光影像在邊緣區域變暗，影響後續影像判讀。故拿掉 LED 濾鏡後拍攝白紙在不同 LED 亮度時的影像，從影像各畫素的灰階值進行線性度校正，校正後影像灰階值將正比於板材螢光輻射度。
- 個別區域原始影像幾何校正  
原始影像中也會出現鏡頭造成的像差，需要進行失真的校正。同樣在拿掉 LED 濾鏡後拍攝印有圓點網格的白紙，使用 OpenCV 函式庫從影像中各個圓點的實際座標換算鏡頭失真的參數，OpenCV 可用此參數校正相機原始影像。此外此步驟亦可同時調整影像旋轉與縮放，保證後續影像拼接的正確性。
- 個別區域校正後影像拼接  
完成上述輻射度校正與幾何校正後，需將所有區域的影像拼接成一張全版材的影像，方便之後進行影像判讀。同樣在拿掉 LED 濾鏡後拍攝全版材尺寸的白紙，上面印有尺規等網格影像，可用於研判每張原始影像拍攝區域相對板材的位置，因精密定位移動平台有很高的重複性，故可用上述量測所得相對位置拼接出整張板材的影像。拼接完成後影像將使用 OpenCV 函式庫進行缺陷檢測與計數等分析。

### 3. 全系統資料整合分析與外部系統整合測試

同一片板材完成上述分析後將與外部系統進行資料交換與整合測試：

- 全系統資料整合分析

PL 光譜量測分析與 PL 光機取像分析結果整合成一個較精簡的報表後，將用來進行最終產品發電效能的預測。包含 PL 量檢測站點後的製程，影響發電效能的因素眾多。因後續製程的優劣和進 PL 量檢測站點時的薄膜狀況也有一定的關係，故客戶使用機器學習技術，將上述報表與最終產品的發電效能進行訓練，得到可從報表預測發電效能的機器學習模型，實際測試結果可提前篩掉大部分的不良品，使最終產品的良率達到 98% 以上。最終上述報表和預測的發電效能也組成一個新報表並上傳至外部的資料視覺化系統供工程師即時管理產線狀態。

- 外部系統整合測試

上述測試完成後將進行全自動產線投貨測試，多片板材依序進入光譜站與光機站，兩個站點同時量測不同板材，增加量測效率。本系統除了自動輸出整合分析後量測資料外，還可通知產線系統設備狀態，在出現異常時即時通知工程師進行處理。

## 五、結論

本研究透過系統設計分析先規劃出適合於 CIGS 薄膜太陽能板的線上 AOI 系統架構，再展開相關的軟硬體細部規劃，並藉由豐富的光機設計經驗與成熟的數位影像處理技術，於 P3 機械劃線製程後，以機械手臂吸取太陽能板為始，進行後續一系列的步驟，最終成功地將 AOI 技術整合於大型 CIGS 薄膜太陽能板的生產製程線。憑藉 AOI 技術之應用，對生產線上的每片太陽能板都能進行數位化處理，快速且精確地完成相關的量檢測分析，有此豐富的數位資訊，可以連續監控製程中鍍膜區域的品質。當發現重大異常品質警訊時，製程工程師可以立即採取適當的處置，或調整製程參數，或更換必要之工具或進行必要之檢修等，以降低次級品與不良品的數量，可大幅提昇製程良率。

上銀科技為自動化精密定位移動平台的專業廠商，具有優良的精密機械設備開發與系統整合的能力與豐富經驗。光學鏡頭與取像裝置的設計製作及光譜量測與分析等為儀科中心的重要核心技術，在發展多年的光譜量測與分析、光機取像裝置、影像處理與量檢測及系統整合等技術能量與經驗的基礎上，可開發符合客戶需求的光學量檢測系統。因此，結合上銀科技公司在自動化精密機械設備上的研發與製造能量及豐富經驗，對合作開發計畫具有技術互補與加乘的效果，以開發符合其產業需求之具有光學量檢測的自動化智能製造系統與設備。

本設備可設置在不同製程階段的檢測站位進行線上全檢測，可在 1 分鐘的節拍時間 (takt time) 內完成一片板材的進出料及螢光之影像與波長的資料擷取與儲存，除可提前檢出不良品外，並可依檢測分析與研判結果即時調整製程與設備。

## 參考文獻

1. M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A. W. Y. Ho-Baillie, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **27**, 3-12 (2019).
2. F. Kessler, D. Rudmann, *Sol. Energy*, **77** (6), 685-695 (2004).
3. A. K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, *Energ. Buildings*, **140**, 188-195 (2017).



4. 關晏宗, 王思淋, 李文貴, 黃中騰, 軟性太陽電池技術現況與發展, *工業材料雜誌*, **354**, 122-129 (2016).
5. V. S. Saji, I. H. Choi, C. W. Lee, *Sol. Energy* **85**, 2666-2678 (2011).
6. G. El-Hajje, D. Ory, J. F. Guillemoles, L. Lombez, *Appl. Phys. Lett.*, **109** (2), 022104 (2016).
7. S. I. Shimakawa, K. Kitani, S. Hayashi, T. Satoh, Y. Hashimoto, Y. Takahashi, T. Negami, *Phys. Status Solidi A.*, **203** (11), 2630-2633 (2006).
8. 陳志文, 陳銘福, 林儀豪, 應用於 CIGS 薄膜太陽能電池的陣列取像裝置及檢測系統, *科儀新知*, **220**, 86-97 (2019).
9. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall, (2007).

## 誌謝

感謝上銀光電公司提供設備開發合作計畫，儀科中心協同上銀科技與上銀光電公司完成此具有技術前瞻性與實用性的客製化 CIGS 薄膜太陽能板之光致發光自動光學檢測系統設備開發，且已應用於太陽能板生產線提供製程產品的線上全檢測，並在製程改善與良率提升方面發揮顯著的效益。

## 作者簡介

林志豪先生為國立清華大學光電工程研究所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Chih-Hao Lin received his Ph.D. in the Institute of Photonics Technologies from National Tsing-Hua University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳銘福先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Ming-Fu Chen received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a Research Fellow and Division Director at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳柏睿先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Po-Jui Chen received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蔡和霖先生為國立中山大學電機工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Ho-Lin Tsay received his Ph.D. in the Department of Electrical Engineering from National Chung-Sun University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

連俊傑先生為國立中興大學機械工程碩士，現為國家太空中心副工程師。

Chun-Chieh Lien received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Chung-Hsing University. He is currently an Associate Engineer in Taiwan Space Agency (TASA).