

非破壞性缺陷檢測技術 用於矽基太陽電池與模組

Introduction of Non-Destructive Displaying Defects Technology for Silicon-Based Solar Cell and Module

彭成瑜、林福銘、黃振隆

Cheng-Yu Peng, Fu-Ming Lin, Chen-Lung Huang

將非破壞性缺陷檢測技術應用於矽基太陽電池的缺陷特性偵測，螢光影像技術如同半導體元件之發光二極體特性，外加能量激發太陽電池半導體能階，矽基材料元件會發出近紅外光波長光譜，使用高解析度與高動態範圍的電荷耦合元件，電致發光影像方法可精確判別太陽電池的缺陷特性，以不同電致發光操作方法可分別檢測太陽電池之網印缺陷、電極缺陷、隱裂與破裂缺陷、傳導不良區域等，另外，太陽光電模組的非破壞性缺陷檢測，也可同時檢測大面積與提升檢測速度，因此電致發光缺陷檢測技術是種簡易、高靈敏度與快速的檢測方法，可應用於太陽電池與模組的區域特性識別、製程參數回饋與產品品質管控。

A comprehensive overview of the non-destructive inspection utilized luminescence imaging is presented for characterizing the defects in the silicon-based solar cell. As a semiconductor device, silicon based device will emit near infrared light the same as a light-emitting diode (LED) by exciting the band gap. The charge coupled device (CCD) camera with high sensitivity and high dynamic range is able to display precisely the defect properties by electroluminescence (EL). In measurement mode contacted to power supply, the radiation emission by the solar cell can be recorded by the CCD camera with different spectrum ranges. In addition, the non-destructive inspection is satisfied for the large area and fast detection demands. The defects in the solar cells, including finger printing, bus-bar printing, micro crack defect, broken defect and local efficiency, can be detected in the resolved solar cell characterization, processing parameter feedback and quality control of PV production.

一、前言

目前矽基太陽電池模組皆由國際大廠保證使用 25 年，而太陽電池之缺陷隱裂、破裂等因素嚴重地影響模組壽命，所以藉由非破壞性進行檢測是一重要課題。矽基太陽電池的缺陷可視為非理想的電

池特性，缺陷的檢測與改善必須從半導體元件與物理特性來深入探討⁽¹⁻⁵⁾。

電池的基本特性參數，包含電子傳導的載子生命週期、擴散長度、晶格錯位缺陷、接面電容、遮光特性產生高溫熱斑效應、電流傳導之片電阻、串聯電阻、電子複合之並聯電阻、電池區域效率行為

與半導體界面崩潰等特性。而太陽模組可以等效雙二極體模型來論述半導體界面⁽⁶⁾，模型參數包含光起電流 (photo-generated current)、半導體界面之理想複合電流 (ideal recombination dark current)、歐姆損失之串聯電阻 (series resistance)、增加空乏區 (depletion region) 複合機會之非理想複合電流 (non-ideal recombination current)、代表傳導漏電流損失之並聯電阻 (shunt resistance) 等。當電池產生缺陷時，可檢測電池在半導體界面能階物理、電流傳導歐姆損失、電子複合損失與光電轉換等特性，再依據物理特性參數分析來建立非破壞性檢測機制。

亞利桑那州立大學太陽光電測試實驗室 (ASU-PTL) 於 2008 年發表太陽電池模組品質性能試驗之失效統計⁽⁷⁾，依據 IEC 61215 (edition 1-1993) 與 IEC 61215 (edition 2-2005) 耐候測試，分別統計 1997 年至 2005 年與 2005 年至 2007 年的送測樣品，統計送測失效樣品的重要排序。1997 年至 2005 年的重要失效排序，分別為旁路二極體發熱試驗、濕熱試驗、濕冷試驗、熱循環試驗及濕漏電流試驗等；而 2005 年至 2007 年的重要失效排序為濕熱試驗、熱循環試驗、旁路二極體發熱試驗、濕漏電流試驗及濕冷試驗等。雖然失效比例大幅減少，但濕熱試驗、旁路二極體發熱試驗與熱循環試驗對於失效最為重要，失效來源可能為模組材料之熱膨脹係數不同，而產生電池熱應力隱裂，或由環境、外力造成電池受壓力變形破裂，這些因素嚴重地影響模組壽命，因此保證電池具有二十五至三十年的使用壽命是相當重要的。若考量模組產品的耐用壽命，須以非破壞性檢測來量測重要影響因素，

以判斷模組產品之出廠品質，且預估其壽命。

有鑑於此，本文以電致發光檢測技術量測螢光光譜影像，利用外加能量使矽基元件能階受激，而激發近紅外光螢光光譜，如同半導體元件之發光二極體 (light-emitting diode, LED) 特性，若搭配電荷耦合元件 (charge coupled device, CCD) 擷取螢光光譜影像，利用電致發光 (electroluminescence, EL) 方法來探討矽基太陽電池與模組的缺陷特性，可精確地檢測與推算太陽電池與模組之缺陷特性。

電致發光的電壓操作方法可推算太陽電池的物理特性，使用電荷耦合元件量測影像強度，可分別檢測出太陽電池與模組之網印、電極、隱裂與破裂、傳導不良、串接與封裝等之缺陷，進一步推算與發電效率相關的區域 (localize) 串聯電阻之特性。電致發光缺陷檢測技術是一種簡易快速、高靈敏度的方法，可應用於太陽電池製程與太陽模組製程區域特性之檢測外，亦可對於模組產品進行品質管控與壽命推估，因此發展非破壞性缺陷檢測技術是相當重要的。

二、非破壞性缺陷檢測技術

利用非破壞性缺陷檢測技術來檢測矽基太陽電池與模組的缺陷特性，激發螢光光譜的檢測方式可分為兩種。圖 1(a) 為光致發光 (photoluminescence, PL)，以功率放大器激發波長 790–940 nm 的雷射光波長，將光源調整為準直光後，使用均勻光強度的雷射入射太陽電池而光致發光。圖 1(b) 為另一種利用電源供應器外加順向偏壓至電池而電致發光

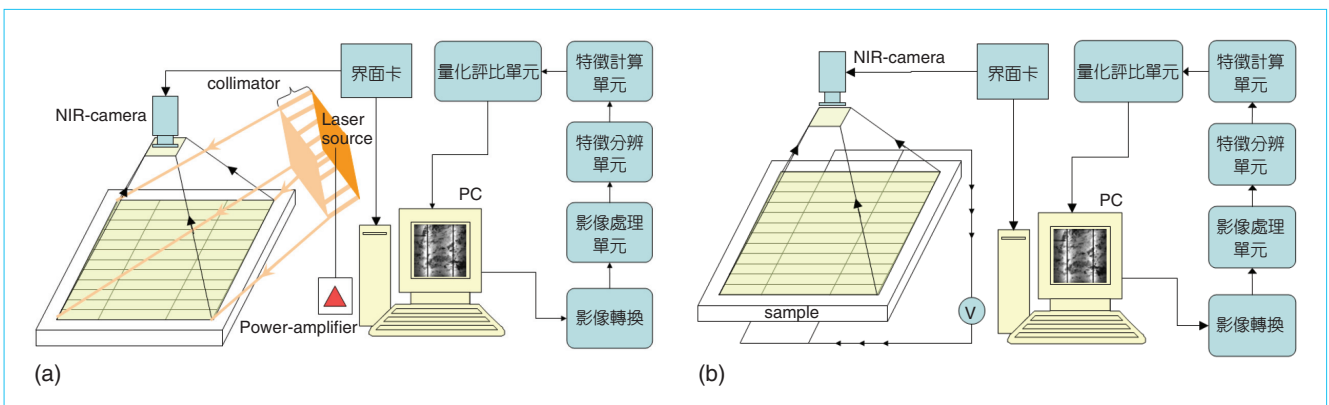


圖 1.(a) 光致發光檢測系統與 (b) 電致發光檢測系統。

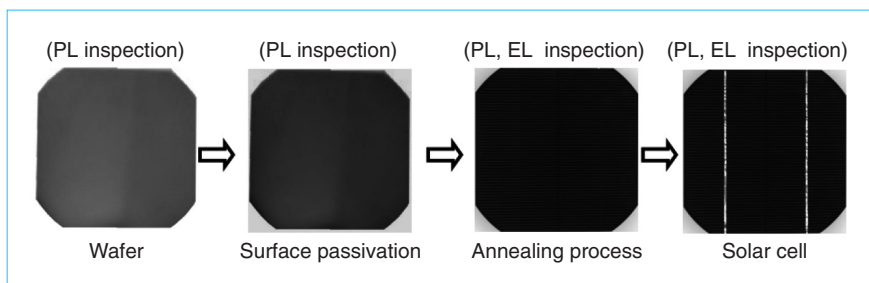


圖 2. 缺陷檢測技術之電池製程階段分類。

(electroluminescence, EL) 來激發螢光光譜的方法。電池出射矽半導體能階螢光 (band-to-band luminescence, B2B) 波長範圍約 $1.1-1.2 \mu\text{m}$ ，由矽基太陽電池激發近紅外光螢光光譜，利用砷化銦鎵電荷耦合元件偵測影像訊號，而成像影像品質取決於電荷耦合元件的像素解析度與光電轉換的量子效率 (quantum efficiency)。軟體影像分析流程依序為影像擷取轉換、影像格式處理、影像特徵辨識、特徵分析計算及缺陷量化評比運算；軟體判別缺陷的精確度取決於影像雜訊校正、計算數值正規化、影像特徵識別與電荷耦合元件之動態範圍等因素。

三、太陽電池之缺陷檢測分析

針對太陽電池製程品質檢測而言，依據電池製作過程可分為：矽晶圓切割、表面處理、退火處理、電池網印等四階段，如圖 2 所示。以激發螢光光譜的非破壞性檢測方式，可應用於太陽電池廠的矽晶圓進料檢驗、電池製程品管與產品出貨檢測。

光致發光 (PL) 的檢測應用範圍很廣，非破壞性缺陷檢測技術適用於電池製程的各階段，但缺點為所需檢測時間長而降低電池產能、外在環境光雜訊大而降低訊雜比、雷射準直系統造成成像像差、檢測面積與高功率雷射直接相關、檢測區域受限於雷射準直光的範圍，上述各項原因造成偵測不易，且此螢光光譜激發方法價格昂貴。反之，電致發光 (EL) 檢測受限於探針必須接觸電池正負電極，且需外加順向偏壓，但其檢測快速之優點，若搭配電池量產與產線，其適應彈性大，不易受外在環境雜訊的影響，僅需簡易的電源供應器即可激發螢光光譜，可進行大面積發光而易於檢測模組產品。此外，螢光光譜可推測太陽電池的物理特性，如光致

發光檢測技術可量測載子生命週期、擴散長度、晶格錯位缺陷、串聯電阻及並聯電阻等特性，而電致發光也可量測載子生命週期、擴散長度、晶格錯位缺陷、串聯電阻、並聯電阻等特性，以檢測特性回饋至製程參數或製程設計，進一步作為品質管控與研究開發的有利工具。

四、太陽模組之缺陷檢測分析

太陽光電模組廠針對太陽電池封裝需要模組製程的整線檢測技術，太陽電池模組製作過程為電池進料篩選、電池串銲製程、電池陣列排列、模組疊層壓合、模組接線盒安裝與鋁框安裝等六個階段。螢光光譜缺陷檢測方法適合於模組工廠針對電池進料檢驗、模組製程品管與模組產品出貨測試等。針對非破壞性螢光影像的製程缺陷之檢測技術而言，光致發光檢測相較於電致發光 (EL)，其應用範圍小，主要受限於外加雷射光的均勻性不足，僅適用於電池進料篩選與單片串銲品質檢查等，尚無玻璃覆蓋的檢測樣品。若電池封裝玻璃、EVA 等疊層材料後，模組在空氣／玻璃界面的反射光雜訊、外在環境光增加干擾，而降低訊雜比，導致光致發光 (PL) 檢測技術難以使用在生產線上。反之，電致發光 (EL) 僅使用於電池的電極製程後之檢測階段，但模組製程檢測的適用範圍甚廣，具有快速檢測、電池品質鑑別與篩選分類，以及銲接製程前後、電池串接與封裝製程前後之品質控管等，並可達到模組產品大面積的檢測能力，因此電致發光檢測技術適用於模組銲接製程品質、封裝製程品管與產品之品質檢測。

利用螢光影像技術可將模組製程之特性建立資料庫，缺陷檢測影像分別比對發電效率，統計資料

圖 3.
外加不同電流之矽基電池電致發光
影像，(a) 至 (d) 分別為 0.4 A 至 6.2
A 影像。

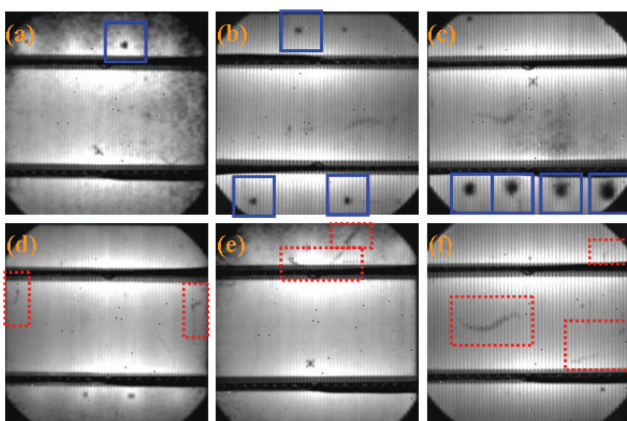
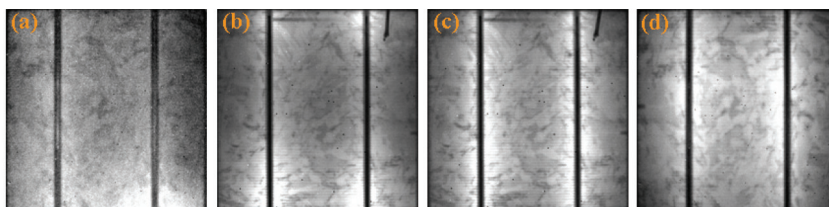


圖 4. 單晶太陽電池。(a)–(c) 燒結缺陷，(d)–(f)
隱裂缺陷之電致發光影像。

並回饋至製程參數，以作為模組設計、製鍍品質與效率量測的依據。另一方面，檢測技術對於模組生產品質與良率之改善，不僅可提升產品毛利，且能預先判斷產品之耐用性與壽命，確保其未來二十五至三十年的使用品質，並可提供太陽光電系統安裝前後與發電系統運作之品質掌控與日後使用狀況之失效判斷，因此非破壞性缺陷檢測分析可作為品質管控、產品設計與製程回饋的有利檢測儀器。

五、矽基太陽電池之電致發光技術

圖 3(a) 至 (d) 為五吋單晶太陽電池外加 0.4 A 至 6.2 A 電流之電致發光測試影像。由圖 3(a) 影像可知電流 0.4 A 電致發光範圍局限於電池下方區域。當開始增加電流至 2.4 A 時，如圖 3(b) 所示，螢光發光區域會沿匯流排擴展。外加電流增加至 6.2 A 後 (圖 3(d)) 之發光影像光強度會呈現穩定，因此在電致發光的操作技術上，必須決定最適量測電流值，以提升影像品質，並以外加偏壓的輸出功率推算螢光光譜能階，進而增加影像判別的準確性。

當太陽電池廠供貨給模組廠時，為了掌握電池品質有否缺陷，可先行以電致發光影像檢測電池特性，圖 4(a) 至 (c) 為單晶太陽電池燒結製程造成的低效率區域缺陷，如實線框所示；圖 4(d) 至 (f) 為電池製作或運送過程造成的隱裂低效率區域缺陷，如虛線框所示。當此電池封裝成模組時，會造成模組串聯電阻增加與填充因子降低，提高逆向電流產生熱斑效應，電池串接失效，而降低模組輸出功率。

圖 5(a) 至 (h) 為多晶太陽電池電致發光影像，有別於單晶電池的晶格成長方向一致，會使多晶電

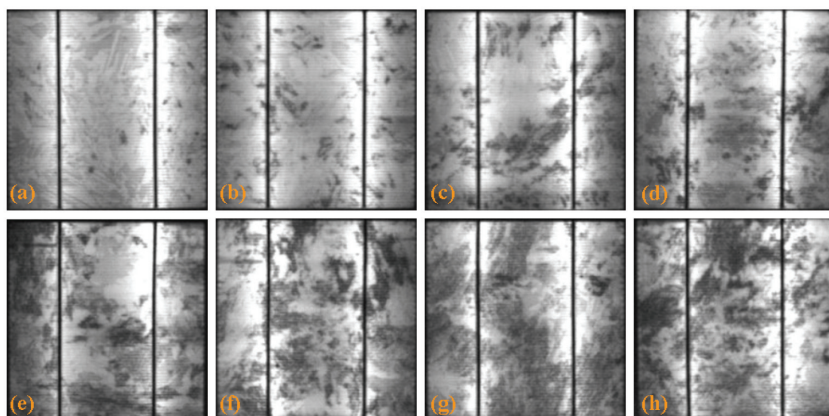


圖 5.
多晶電池晶格缺陷之電致發光影像。

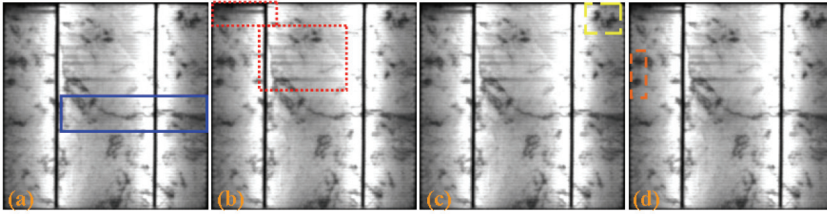


圖 6.

(a) 多晶太陽電池隱裂缺陷，(b) 網印斷線缺陷，(c) 與 (d) 燒結缺陷之電致發光影像。

池表面晶格缺陷造成影像暗區部分，且多晶電池呈現非均勻性與非一致性的缺陷特徵，如圖所示為不同缺陷密度的影像，多晶電池的晶格特徵易使分析系統錯估影像訊號，而提高缺陷的誤判率。另外，圖 6(a) 為多晶太陽電池的微尺寸隱裂影像，圖 6 (b) 為多晶太陽電池的網印斷線影像，實線區域與虛線區域皆為水平方向的缺陷影像，隱裂影像與網印斷線影像也可能是造成缺陷誤判的原因；圖 6(c、d) 為多晶太陽電池的燒結缺陷影像，相較圖 4(a) 至 (c) 單晶電池燒結缺陷影像，多種複合缺陷呈現錯綜複雜的影像訊號，會造成缺陷分析的困難，導致缺陷誤判的隱憂，因此利用影像特徵判別的方法納入太陽電池的物理特性，達到降低缺陷偵測的誤判率是相當重要的課題。

利用電致發光的影像強度偵測方法可分析太陽

電池的缺陷特性。圖 7(a) 電池燒結缺陷之影像特徵判別特性，首先以影像圖形辨識方法確認影像暗紋位置，再加以定位與計算圖形參數，比對太陽電池物理特性後，即可決定缺陷特性。圖 7(b) 電池破裂缺陷之影像特徵判別特性，相較於隱裂缺陷呈現影像強度為全暗紋，且已不具有半導體界面特性。圖 7(c) 電池匯流排銀膠網印之影像特徵判別特性，以 2 mm 的銀膠寬度作為缺陷用途，匯流排兩側的延伸暗紋即可能為銲接製程造成的隱裂缺陷。圖 7(d) 為銀膠網印之影像特徵判別特性，可分辨網印週期約為 2 mm 的微小變化，至於影像的解析能力取決於電荷耦合元件的設備解析度。圖 8 為電荷耦合元件之動態範圍的特性評估，電荷耦合元件累積電荷能力決定影像缺陷特性的量測範圍，即可分析太陽電池物理特性的解析度。

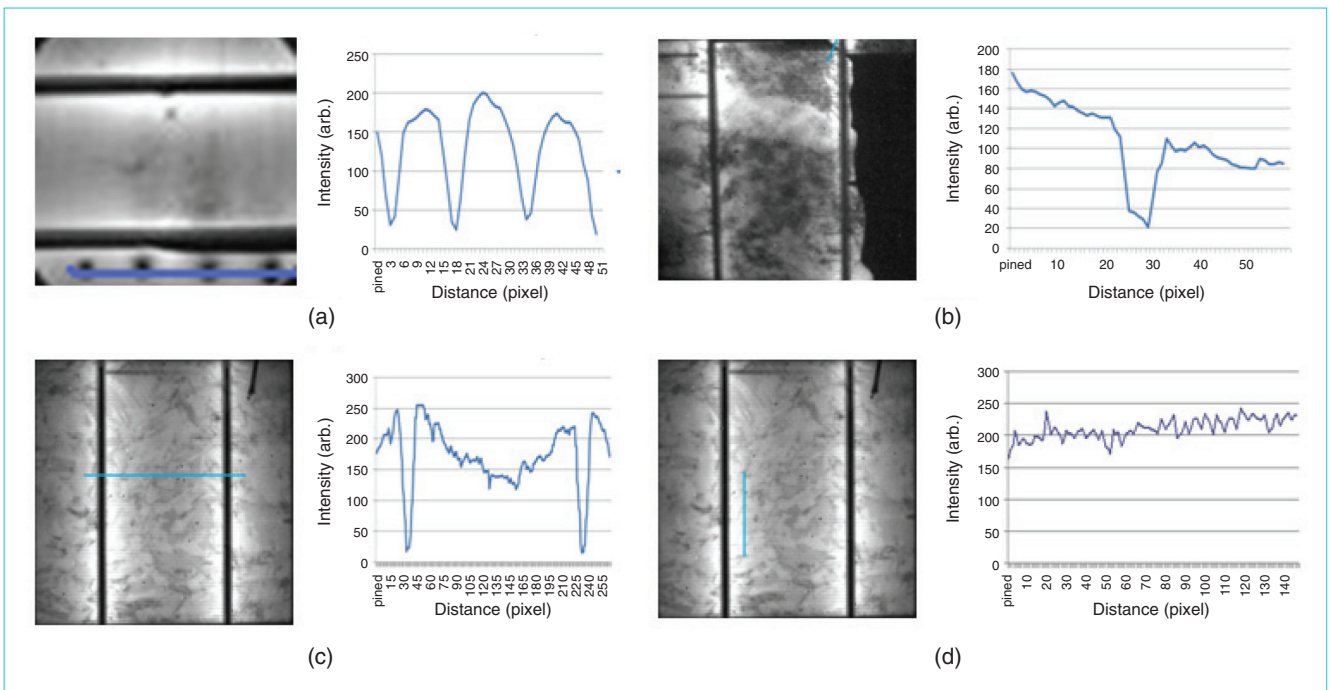
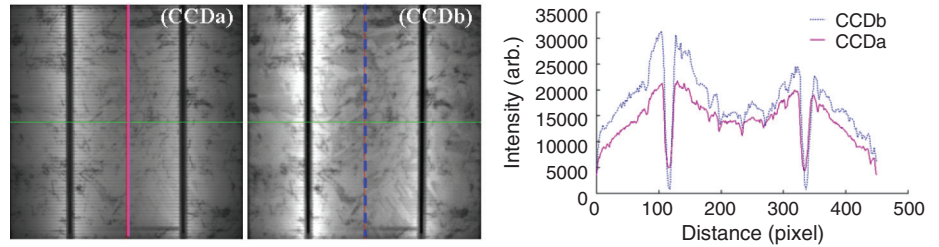


圖 7. 影像特徵判別特性，(a) 燒結缺陷、(b) 破裂缺陷、(c) 匯流排銀膠網印、(d) 銀膠網印。

圖 8.
電荷耦合元件之動態範圍特性。



六、矽基太陽模組之電致發光技術

圖 9 是由電致發光檢測技術來測量矽基太陽模組之缺陷，依據模組產品品質特性可將電池缺陷作一分類，其中包含電池製作、表面網印、電池隱裂、電池破裂、高效率傳導區域及低效率傳導區域等缺陷。透過電池缺陷與製程分析，電池製作可能使用來自矽晶圓長晶原料的缺陷、電池蝕刻製程產生的缺陷、表面處理與燒結製程缺陷，使得影像強度呈現區域性不均勻的發光強度差異。另外，表面網印塗佈製程造成的銀膠連接斷線或塗佈不均勻情形、電池受外力作用而造成網印斷線等，此種微缺陷特性難以由規範 IEC 61215 目視檢查或光學影像方法量測，因此採用電致發光檢測方法易於鑑別模組缺陷，如電池串接的銲接製程中，電池與銅箔導線接著點會由於材料的熱膨脹係數不同而產生熱應力，產生熱形變造成隱裂或破裂缺陷，或由於環境與外力造成電池受壓變形，其光學影像方法難以分

辨此類的隱裂或破裂缺陷。另外，電致發光方法的電流傳導路徑、電池效率區域與影像亮度呈正比，電池效率可由影像強度來分析判別。當電池具有高傳導電流時，會有較強影像發光強度與較大模組輸出功率；反之，影像低強度區域即可判斷低傳導電流之電池低效率區域，此理論基礎同於隱裂與破裂缺陷分析方法。

圖 10(a) 至 (d) 將電致發光檢測技術應用於薄膜電池與模組缺陷量測。利用外加不同電壓方法分別量測薄膜電池製程品質及模組產品品質，包含電池薄膜鍍膜均勻度、電池低效率傳導區域缺陷、雷射切割缺陷、電池傳導斷線、電池隱裂缺陷、電池破裂缺陷與電池串銲品質缺陷等。影像檢測方法可清楚地分辨大面積模組製鍍與效率特性，進一步將量測結果回饋至製程分析或產品設計，以電致發光方法作為研究開發及品質管控最佳的測試工具，提升產業研發能力與產品競爭力。

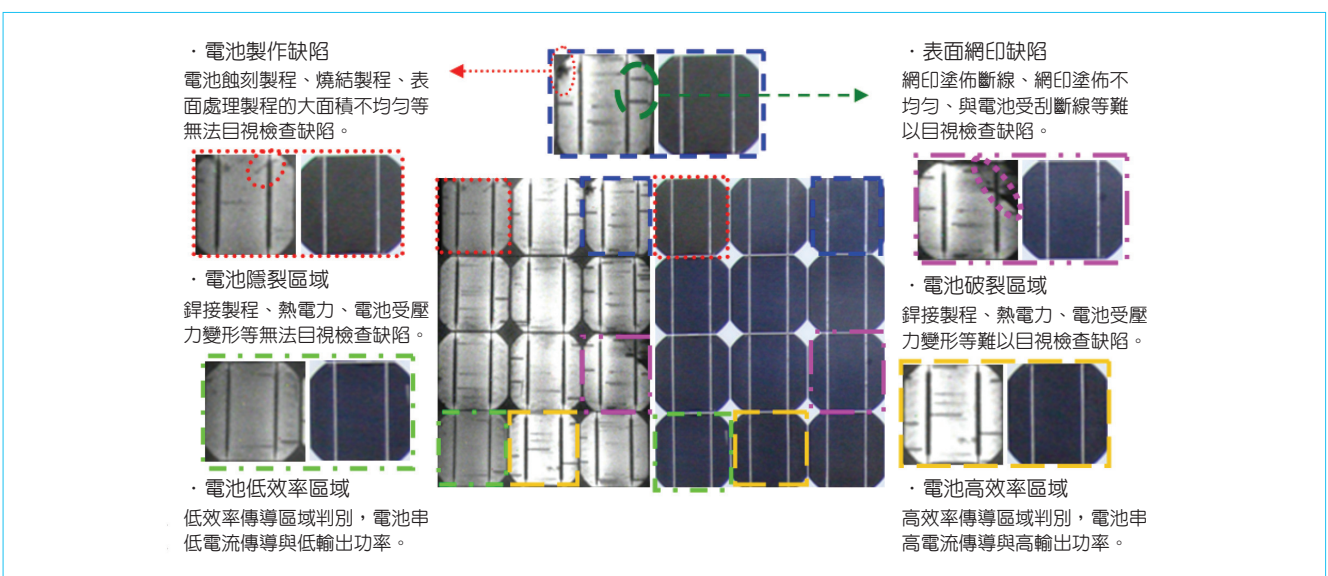


圖 9. 矽基太陽模組之光學與電致發光影像缺陷檢測技術。

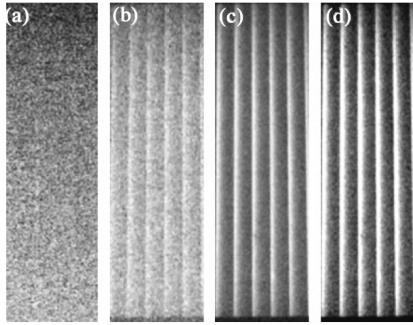


圖 10. 外加不同電壓之薄膜電池電致發光影像。

七、螢光光譜檢測系統

2008 年開始已有儀器設備廠開發完成螢光光譜檢測設備⁽⁸⁾，其中包含光致發光與電致發光檢測方法，代表性設備廠商有 BT Imaging、Greateyes 及 Manz Automation 等。2008 年 BT Imaging (LIS-R1) 與 Manz Automation (MANZ ICT 2400) 以外加偏壓方式，利用電致發光系統對於單晶與多晶太陽電池作缺陷檢測，目前其檢測功能有網印、隱裂、破裂、低效率區域等缺陷之影像訊息，影像檢測時間小於 1 秒。BT Imaging (LIS-R1) 系統包含雷射光致發光系統，可測量載子生命週期的特性，但缺點是光致發光系統僅能檢測 6 吋太陽電池的面積範圍，而無法同時測量模組尺寸的大面積影像，降低模組量產產能之利用率。2009 年 FLIR 公司利用 InGaAs 材料的近紅外光偵測器，搭配影像識別系統與檢出電池的缺陷特性。2009 年 Greateyes (LumiSolarProfessional System) 以電致發光檢測系統同時達到檢測太陽電池與模組目的，但目前各家廠商僅能由影像訊息，藉由操作經驗或計算作為篩選標準，尚未建立完整隱裂缺陷影像與失效關聯的判別法則，因此建立關聯資料庫與缺陷篩選法則 (defect criterion) 是當前最重要的課題。

圖 11(a) 為太陽能電池電致發光螢光光譜系統。電致發光方法利用電源供應器以外加順向偏壓方式，使功率操作範圍高於能隙能量，因電致方法激發螢光光譜。光致發光則利用 800 nm – 850 nm 波長雷射光調整成單位面積的準直光，均勻地照射於電池面積上提供激發能量，並搭配矽和砷化銻銻電荷耦合元件檢測發光影像。CCD 鏡頭採用近紅外光濾光片濾除雜訊光，而偵測電池能階影像，若

使用 1.2 μm 至 1.6 μm 帶通濾光片 (band pass filter) 可偵測晶格與材料缺陷的能階影像。電腦與影像偵測器以類比／數位界面卡連接，擷取影像後，以 LabVIEW 圖控程式軟體進行影像辨識與分析影像資訊。圖 11(b) 為太陽光電模組樣品分別測得的光學影像 (optical image) 與螢光影像 (luminescence image)，因為光學影像難以分辨微裂縫缺陷，進一步以螢光影像增強量測靈敏度與辨識能力，達到大面積、快速檢測的目的。

將圖 12(a) 單晶電池 EL 發光影像轉換為圖 12 (b) 的串聯電阻影像，由此區域特性分析得知單晶太陽電池低效率區域集中在電池四周，高效率與低效率區域之串聯電阻差異為 0.025 Ω ，而銀膠網印斷線造成串聯電阻提高。圖 12(c) 與 (d) 分別為多晶電池 EL 影像與多晶電池之串聯電阻影像，由於多晶電池的晶格缺陷會造成半導體接面的能階缺陷，導致區域發光影像會因晶格缺陷產生串聯電阻差異為 0.01 Ω ，晶格缺陷影響多晶電池整片串聯電阻提升和降低發電功率。

八、結果與討論

利用非破壞性螢光檢測技術來測量矽基太陽電池的缺陷特性，以電致發光及光致發光方法成功地分析電池燒結缺陷、隱裂缺陷、破裂缺陷、匯流排銀膠網印、銀膠網印與電池品質篩選等，為符合大

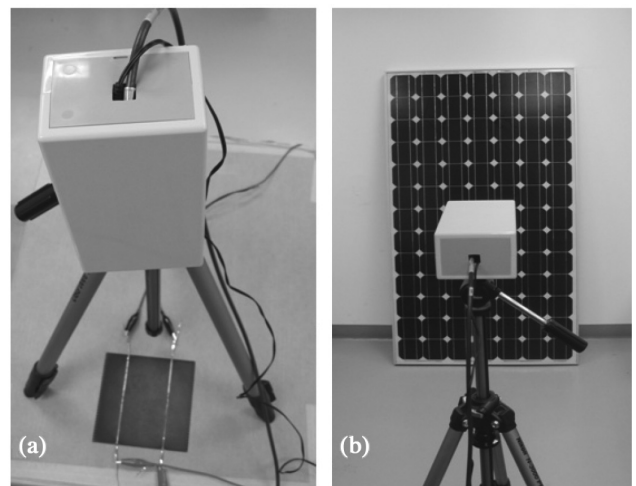


圖 11. (a) 太陽電池螢光光譜檢測系統，(b) 太陽模組螢光光譜檢測系統。

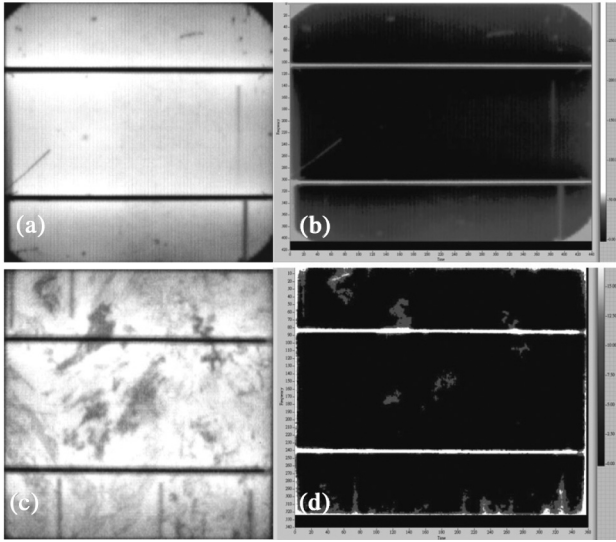


圖 12. (a) 單晶電池 EL 影像，(b) 單晶電池之串聯電阻影像，(c) 多晶電池 EL 影像，(d) 多晶電池之串聯電阻影像。

面積與快速檢測的模組影像缺陷，分析電池製作缺陷、電池網印缺陷。電池進料隱裂與破裂缺陷、低效率傳導區域等缺陷。檢測設備上採用高解析度與高動態範圍的電荷耦合元件，以電致發光方法可精準地檢測太陽電池與模組的影像缺陷特性，將影像缺陷特性整合太陽電池特性的參數分析，包含擴散長度、晶格錯位、串聯電阻、並聯電阻分析等，建立影像缺陷特性與電池特性參數的關聯資料庫，擴展至太陽電池工廠與太陽模組工廠之進料檢驗、製程前後監控及產品品質管測試等。此外，針對模組產品之耐用性與壽命保證，目前檢測技術進一步將影像轉換為電池與模組效率相關的串聯電阻物理量，以區域性串聯電阻行為來支援與分析電池鍍膜、設計與量測，預先判斷模組產品出廠之品質與安全性，以確保未來模組二十五至三十年的使用品質。

關於非破壞性電致發光系統的終端應用，可作為太陽光電系統安裝前後的品質監控與使用後之失效判斷等。此外，亟需建立缺陷影像與失效關聯的判別法則，如何訂立缺陷篩選法則 (defect criterion) 是重要的課題。如建立單晶電池、多晶電池、單晶模組與多晶模組失效關聯資料庫等，將此缺陷檢測技術作為產品品質管控、產品開發與參數回饋設計等用途，可改善產品製程與技術能力，提升廠商製程良率與效率，降低產品成本。

參考文獻

1. J. Isenberg, S. Riepe, S. W. Glunz, and W. Warta, *Journal of Applied Physics*, **93** (7), 4268 (2003).
2. M. Bail, J. Kentsch, R. Brendel, and M. A. Schulz, *Photovoltaic Specialists Conference*, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 99 (2000).
3. P. Würfel, T. Trupke, T. Puzzer, E. Schaffer, W. Warta, and S. W. Glunz, *Journal of Applied Physics*, **101** (12), 123110 (2007).
4. T. Trupke, *Journal of Applied Physics*, **100** (6), 063531 (2006).
5. J. Giesecke, M. Kasemann, M. C. Schubert, B. Michl, M. The, W. Warta, and P. Würfel, *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain (2008).
6. E. E. van Dyk and E. L. Meyer, *Renewable Energy*, **29**, 333 (2004).
7. G. Tamizhmani, B. Li, T. Arends, J. Kuitche, B. Raghuraman, W. Shisler, K. Farnsworth, J. Gonzales, A. Voropayev, and P. Symanski, *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, CA, USA (2008).
8. S. K. Chunduri, *Displaying Defects*, *Photo International*, 150 (2009).



彭成渝先生為國立臺北科技大學光電博士，現任工業技術研究院太陽光電科技中心研究員。

Cheng-Yu Peng received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Taipei University of Technology. He is currently a researcher at Photovoltaic Technology Center, Industrial Technology Research Institute.



林福銘先生為國立成功大學土木工程博士，現任工業技術研究院太陽光電科技中心研究員。

Fu-Ming Lin received his Ph.D. in civil engineering from National Cheng Kung University. He is currently a researcher at Photovoltaic Technology Center, Industrial Technology Research Institute.



黃振隆為國立清華大學化工碩士，現任工業技術研究院太陽光電科技中心研究員。

Chen-Lung Huang received his M.S. in chemical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a researcher at Photovoltaic Technology Center, Industrial Technology Research Institute.