

工業界太陽能電池檢測技術簡介

Introduction to Solar Cell Inspection Technology in Industry

戴鴻名、王浩偉

Hung-Ming Tai, Hau-Wei Wang

台灣太陽光電產值已經名列全球第四，未來在帶動周邊設備與服務產業上，太陽光電產業被賦予高度期盼。檢測技術是太陽能產業中重要的一環，它兼具管控品質與搜尋製程參數之雙重角色。不過，相較於實驗室離線分析法，一般較少有工業用太陽電池檢測技術與規格對外揭露。因而本文由分析工業界生產矽晶太陽能電池時遭遇之問題為始，敘述當前工業界選擇一檢測技術的緣由與技術關鍵處。為便於說明，生產矽晶太陽能電池過程，檢測工作在此被分為四個區塊，分別是晶片初步篩檢、晶片蝕刻粗化前後篩檢、抗反射膜檢測及網印結果檢測。本文回顧這些檢測工作中所援用之技術原理、檢測標準，以及目前制訂中之檢測標準，以作為研究人員之參考。

The gross industrial output value of Taiwan from solar photovoltaic products has been the top 4 of the world rankings. The solar photovoltaic industry is expected to drive business opportunities on equipment and service industry in the future. The inspection technology plays two important roles in photovoltaic industry: controlling quality and exploring new recipes for solar cell production. However, compared to off-line analysis methods in laboratory, only a little industrial solar cell inspection technology and specification have been disclosed. Therefore, this article starts by analyzing problems in producing silicon solar cells, and then explains the reasons and technical points for each selected inspection method. For simplifying explanation, the inspection processes are segmented into four groups. They are incoming wafer inspection, wet etching starting/final inspection, antireflection film inspection, and printing result inspection. This article reviews their working principles, inspection standards and the prepared inspection standards for researchers' reference.

一、前言

根據卡內基研究所在 2009 年發布之調查報告，目前全球溫室氣體以每年大於 3% 速度增加，而地球暖化的速度也比兩年前聯合國跨政府氣候變遷小組所預估還要快，顯示全球遭受地球暖化狀況

日益嚴重。在此壓力下，德國、西班牙、日本及美國等政府相繼投入可觀之公共預算，加速替代能源之研究與設置。由於太陽能發電是多國政府投入比重最大之新興替代能源，雖然當前經濟風暴疑慮仍未消除，但太陽能產業仍被認為是最有成長潛力的工業之一。根據統計，2007 年台灣太陽光電產值

表 1. 國內使用製程設備。

	旺能	昱晶	昇陽	新日光	長生能源	太陽光電	科冠
成立年	2004	2005	2005	2005	2005	2006	2006
主要設備供應者	Centrotherm	Centrotherm	Centrotherm	Centrotherm	Centrotherm	Schmid	Schmid

535 億元，2008 年增至 1,011 億元，成長率約 89%，產值居全球第四，而三年後則可能進入全球前三大之一⁽¹⁾。

太陽能產業鏈一般可分為矽晶片、太陽能電池、太陽能電池模組、太陽能電池應用產品，以及太陽能系統設置等五大類。台灣在過去五年來，太陽能電池一直是五類中產值最高的一項，金額為排行第二之矽晶片三倍以上⁽²⁾，可見太陽能電池對我國來說是相當重要的產業。另外，根據法國調查公司 Yole Developpement 於 2009 年 7 月發表預測，2012 年台灣的太陽能電池產能將佔全球太陽能電池的產能 (42.78 GW) 之 10.6%⁽³⁾。以土地面積以及投入時間來看，台灣成就確實不凡。目前除了早期已建廠生產之公司外，過去兩年國內平面顯示器與半導體大廠亦挹注相當資源，投入太陽能電池研發。

雖然存在機會，但我國太陽能產業短期存在兩大問題有待解決，第一是設備問題，第二是製程問題。設備問題方面，目前我國太陽能電池公司相當多使用進口 turnkey 設備，表 1 所示為國內廠商使用進口設備的報導，建置費用相當高昂。以矽太陽能電池為例，一條進口 30 MW 生產線約需台幣 3—5 億，相同規模之進口薄膜太陽能電池又為其 3 倍以上。製程問題方面，以目前我國生產之多晶矽太陽能電池為例，發電效率普遍落在 14.5%—15% 附近 (優異者可達 16% 以上，前後兩者發電成本即相差 7%)；破片率介於 1%—7%，破片產生損失頗為慘重。若以 2008 年國內總產能 1,148 MW、破片率 5% 估算，國內損失總產能為 57 MW/year，接近於每年損失近 2 條 30 MW 產線產能，或相當損失 8 座台中縣 72 kW 示範發電站。上述這些設備與品質問題最終反映在太陽能電池發電的成本上。迄今太陽能發電仍高於傳統電力售價，總和發電成本多

數仍在火力發電之三倍以上。

矽晶片在製程中若發生破片，碎片會對設備造成污染，而藏有隱裂的電池片即使暫時沒在製程中破碎，在被製作成電池模組使用一段時間後效率降低，或可能因局部升溫 (稱之為熱斑，hot spot)，而導燃周邊物質，產生嚴重公共安全問題，因此實施電池檢測是確保品質之重要步驟。此外，藉由製程檢測結果來調整製程參數 (recipe)，是一個設備公司自主發展 turnkey 或電池製造公司掌握獨特製程技術之重要基礎。

從半導體產業所習得的經驗可知，台灣太陽光電產業並不能長久單以產值為滿足，在未來必須以品質為產業之後盾，並發展新一代太陽電池之設備軟硬體技術，深化此產業技術含量，方為永續發展之道。有鑒於檢測技術具有把關品質與探索新參數之雙重角色，而一般外界較少揭露工業界而非實驗室等級之太陽能電池檢測技術資訊，本文將簡介太陽能電池 (cell) 晶片的檢測技術，俾使讀者瞭解產業的製程，及藉由檢測來確保太陽能電池的品質。

二、太陽能電池檢測技術

矽晶太陽能電池 (包括單晶矽與多晶矽) 發展時間較其他類型之太陽能電池長久，技術相對成熟，預期未來幾年仍將為市場主流。因此本文以矽晶太陽能電池為例來說明相關檢測技術。首先，將矽晶太陽能電池的主要製程簡示於圖 1。為方便說明，檢測過程依晶片初步篩檢、晶片蝕刻粗化前後篩檢、抗反射膜檢測及網印後檢測四個項目加以解說，其中須留意不同生產者在四個項目中所安排的細節可能稍有差異。

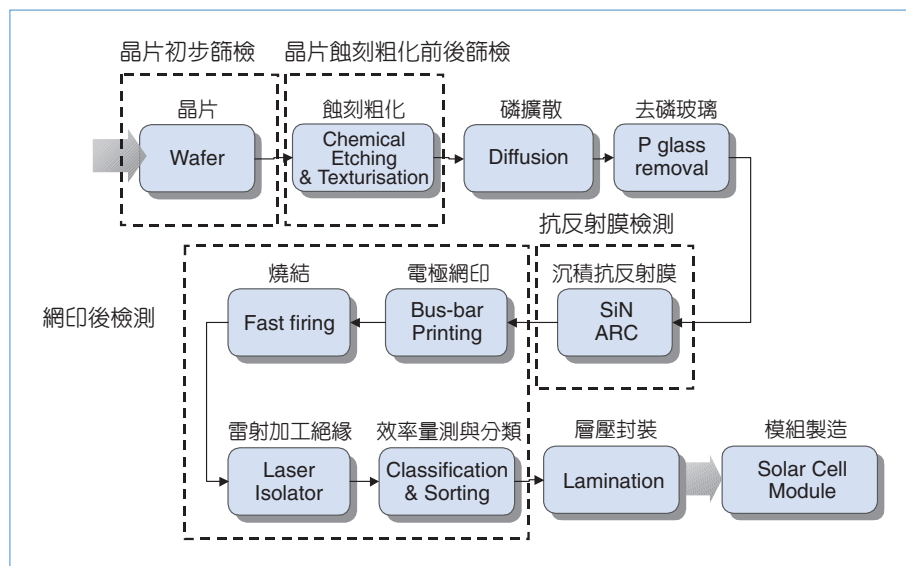


圖 1. 矽太陽能電池製程。

1. 晶片初步篩檢

原切割晶片 (as-cut wafer) 進入製程之前，通常會進行初步篩檢。太陽能產業產線晶圓產率 (wafer/hour) 遠高於半導體產業，平均每片處理時間要求低至 0.5 – 2 秒，因此必須仰賴自動化檢測，方有機會達成全檢目標。初步篩檢的檢測項目包括：表面外觀與二維尺寸 (surface & geometry) 資訊、微裂 (microcracks)、翹曲與切割痕 (warpage & saw grooves) 三維資訊、電阻與晶片厚度 (wafer thickness & resistivity) 及載子壽命 (charge carrier lifetime)。

表面外觀的瑕疵檢測項目方面，包含指紋及邊緣缺裂 (chipping) 等。SEMI M6-1108 建議邊緣缺裂容忍極限為「1mm wide and 1mm deep」⁽⁸⁾，然而生產廠內會採取更嚴格的準則。目前有部份廠商以邊緣缺裂 30 μm 為上限，然究竟以哪個缺裂方向 30 μm 則判定為廢品，尚無行業標準。目前台灣產研單位已在半導體設備與材料標準組織 (Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI) 之太陽能電池標準技術工作小組中進行討論，而由設備公司起草擬定外觀檢測標準⁽⁴⁾。由於晶片是硬脆、非等向性材料，V 型和 U 型裂紋在晶片破裂之快慢不同，因此在 SEMI 外觀檢測標準草案中，不只考慮缺角尺寸，連缺角長寬比、缺角裂緣角度以及數量都加以考慮。

二維尺寸方面，圓形太陽能矽晶片之直徑量測方法有 SEMI MF2074 規範可供參考⁽¹⁶⁾，但方形矽晶片尺寸量測方法並沒有規範加以限定。常見的要求是矽晶片邊長誤差必須至少要求在 $\pm 500 \mu\text{m}$ 以下。晶片外部尺寸量測是一簡單 (量測精度在 20 – 100 μm) 但重要之步驟。它之所以重要，不單純只是因為晶片長寬尺寸關乎吸收面積進而影響瓦數，其實更重要的原因是在於如果長寬尺寸不對，當後面實施雷射絕緣製程 (laser isolation) 讓雷射光束沿著晶片刻畫一圈時，雷射束可能照射到晶片邊緣之外，無法完整地將正反面導電層阻絕，如此的電池在效率與安全上皆會有問題。雖然運用傳統自動光學檢測技術不難做到二維尺寸等量測，但是由於晶片邊線時常模稜兩可，過去太陽能產業界又沒有通用晶片外觀瑕疵標準，自動光學檢測設備仍需針對供應鏈不同要求，加以修改檢測門檻值 (threshold)。

晶片微裂是太陽能產業最棘手的問題，它至少又分為開放微裂 (open crack)、封閉微裂 (closed crack)、表面或內層微裂等類型，它們可能來自雜質、長晶缺陷，亦可能來自線切割破壞 (wire-cut damages)。晶片從上游出廠後隨著溫度變化或應力釋放，微裂仍可能蔓延，因此較謹慎之電池製造廠會採取一些檢測措施來確認晶片品質。工業中存在至少有兩種檢測架構，以圖 2 示意圖來說明。一種

採用紅外光源搭配紅外線攝影機，藉助紅外影像攝影來進行。其工作原理乃是根據波長 1,000 nm 以上光線可貫穿矽材料（貫穿深度與波長、溫度有關），而光線在晶片微裂處穿透率必有歧異，在紅外線影像上顯現出差異。

另一種採用寬頻光源在晶片一面照射，晶片另一面用前面加有藍色濾波片之攝影機取像，在影像上開放微裂處相當明亮。雖然量測原理看似簡單，但需要在選用光源波段、功率、取像攝影機靈敏度和訊雜比、解析度以及運算速度等因素間取得最佳化，國內外產品價格差異極大。微裂缺陷影像資料庫是該技術關鍵之一，設備廠商需要與電池製造者長期合作以建立資料庫。欲判斷微裂處是在表面或是內層、開放或封閉，需要有經驗的人員協助。由於光線在裂縫中仍有些許折射的關係，雖然理論上 CCD 取像解析度不難達到 1 μm ，但實際上解析能力一般約在 5–10 μm ，而且實際微裂與偵測所得位置會有些微偏差。

翹曲與切割痕屬於矽晶片之三維資訊，SEMI M6-1108 規範要求兩者至少分別需低於 75 μm 、20 μm ⁽⁸⁾。晶錠經由線切割製程獲得厚度 180–260 微米之晶片。由於應力釋放，晶片呈現數十至數百微米程度不同之翹曲；另根據切片觀察，線切割會在晶片表面晶格產生深達 10–15 μm 之碎裂層和起伏數十微米之切割痕。不正常的矽晶片翹曲隱含矽晶片有不當應力等因子，這一類晶片易在後續濕蝕刻、磷擴散、沉積抗反射膜、網印、層壓等與有溫度變化或接觸應力之製程中破裂。過深之切割痕無法被後續濕蝕刻製程去除，造成網印失敗。能夠在離線上量測翹曲與切割痕之方法很多，也有規範供參考⁽¹⁴⁾，但由於晶片是需在行進之輸送線上進行

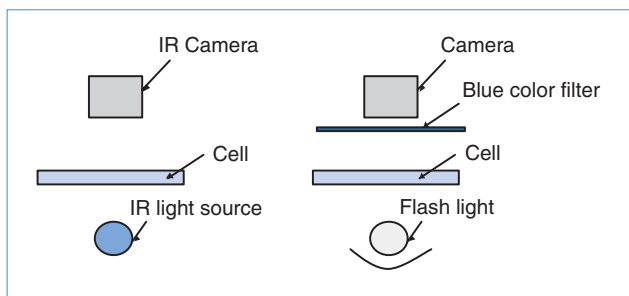


圖 2. 矽太陽能電池初級微裂偵測方法示意圖。

3D 量測，普通單點雷射輪廓計較不易滿足速度與精度的要求。陰影疊紋法 (shadow moiré)⁽⁵⁾ 加上高速 2D 取像是一種常見的方法，可以滿足量測翹曲值，架構如圖 3 所示，其中玻璃光柵與晶片表面相對間隙約數釐米。如果不希望製作大面積玻璃光柵，並且不希望有玻璃光柵貼近晶片，另一種選擇是投影條紋法 (fringe projection) 加上高速 2D 取像，可以計算得到翹曲⁽⁵⁾。Z 方向之標稱解析度約 1–5 μm 。

在實驗室進行待測物阻抗量測任務，常利用接觸式四點探針來取得面電阻值。但由於產線上要求非接觸量測，因此產線上常採用一種非接觸式 JPV (junction photovoltage) 法來進行阻抗量測⁽⁶⁾。JPV 藉助光照射代測物表面激發電子產生表面電位，並用電容感測探頭取得電位訊號，然後推算電阻值。而晶片厚度量測時常與電阻量測在同處進行，是藉由電阻結果推算與校正過來，嚴格來說，是以厚度變化 (total thickness variation, TTV) 來篩檢厚度異常與否，厚度解析能力在 5 μm 附近。以厚度 220 μm 工業晶片為例，厚度誤差最好在 20 μm 以內，誤差超過 60 μm 必須篩除；亦有其他運用光學取像量測邊緣截面厚度之方案，設備解析能力在 1 μm 附近，但此方法不能取得晶片中央之厚度。

載子壽命通常是指載子重組時間 (carrier recombination time)，工業中常採用它作為量化電池晶片原材料滲雜濃度或缺陷之參考。主流量測方法依據 microwave-PCD (μPCD) 原理 (參考圖 4)，將雷射脈衝打至樣本表面，使半導體產生電子與電洞對，當雷射脈衝結束，電子與電洞發生擴散

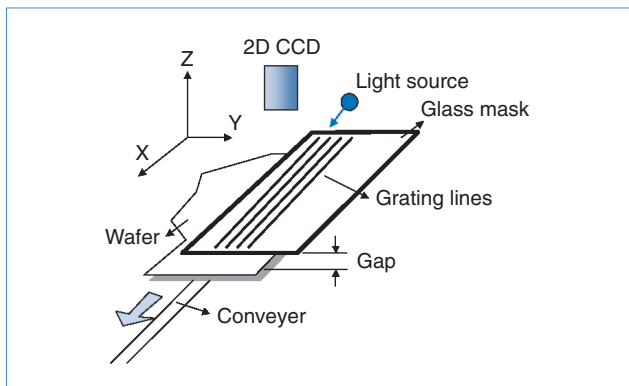


圖 3. 以疊紋法量測晶圓翹曲。

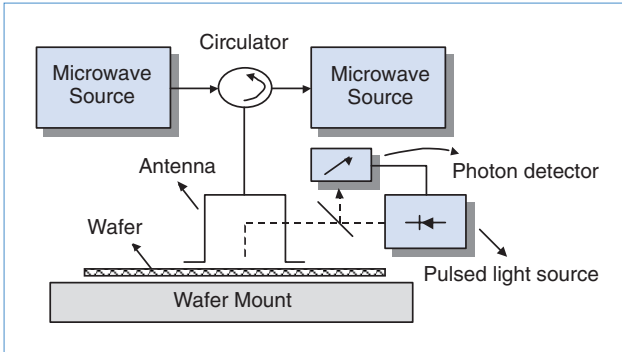


圖 4. Microwave-PCD (μ PCD) 架構圖。

(diffusion) 與重新組合 (recombination)。在分離、擴散、組合前後，導電度會有所轉變，而藉著微波探頭 (microwave antenna probe) 的反射波來偵測該轉變，繪出「載子濃度 vs. 載子重組時間」關係圖，最後擬合該指數曲線之時間常數 (time constant)，簡稱為載子壽命。對同樣厚度之矽晶片來說，時間常數越長，代表缺陷較少。線上用載子壽命監測設備為顧及量測速度，橫向解析度只在 10 mm 等級。商用機台標示時間量測範圍 (lifetime measurement range)，例如有些量測設備標示 0.1 – 1,000 μ s) 越廣，可適用之晶片厚度範圍亦大。

Fraunhofer ISE 研究人員也嘗試其他方法來量測原切割晶片載子壽命，例如光致發光影像 (photoluminescence imaging, PLI 或 PL)，水平解析度可優於 10 mm。該方法困難之處在於需要克服反射光掩蓋輝光之問題⁽¹⁰⁾，並在未來設法提升量測速度⁽¹¹⁾。

2. 晶片蝕刻粗化前後篩檢

如前所述，晶片在進入磷擴散之前需要經過表面蝕刻，來清除晶片表面較鬆散的碎裂層，同時消除矽晶片上之線切割痕和具有高應力薄層。前述之陰影疊紋法或投影條紋法可被用來驗證蝕刻之效果，藉之回授調整蝕刻參數。

蝕刻另一個重要的用途是讓晶片表面產生楔形晶體結構，降低光線反射比例，增加穿透進入晶片之能量，此步驟稱為粗化或製絨 (texturing)。表面粗化後，反射率可從 35% 降低至 12%⁽⁷⁾。反射率的量測架構有數種，其中一種是採用積分球架構、

在法線 8 度角處擷取光、導光進入光譜儀分析之做法。它的好處是能夠盡量將所有角度之成份 (包含 specular、diffuse、haze) 納入計算，數值之再現性不受晶片擺置方向影響。此外，目前技術上也已經能夠將涵蓋光譜範圍前後延伸至 300 – 1200 nm，同時符合 CIE 反射率量測規範和 IEC60904-3 太陽光波長範圍⁽¹³⁾。嚴謹來說，此方法需要將積分球開口完全貼在晶片表面進行測量，數值才最可靠。未來發展方向為利用數學建模與校正方法，容許二者相對距離加大，以利於作為線上量測使用。

3. 抗反射膜檢測

在完成磷擴散、去磷玻璃、雷射絕緣製程後，接著藉由 PECVD 將厚度約 75 nm、折射率 2.05 之 $\text{SiN}_x\text{:H}$ 沉積於晶片表面，作為抗反射層⁽⁹⁾。由於在網印之前電池尚無電極，尚無法使用太陽光模擬器做電性測試，因此需要從光學量測技術著手。一般製造者會控制 PECVD 製程參數，以獲得特定厚度和折射率之 $\text{SiN}_x\text{:H}$ ，隨後進行複檢。目前國內已有多通道光譜儀之陣列式膜厚量測儀技術，可以同時量測多個位置之膜厚⁽¹⁸⁾。

但是，更細膩的做法是不只考慮 $\text{SiN}_x\text{:H}$ 膜厚，而是進一步考慮總體晶片之吸收率。這是因為沉積膜下方並不是一個平整的底層，而是經過蝕刻之粗糙面，因而相同的 $\text{SiN}_x\text{:H}$ 厚度不代表會有相同之吸收率，而一個膜厚值也不會永遠是最佳解。前述反射率量測方法可被用來求取吸收率，已被證實能引導調整 PECVD 製程參數，降低現場工作人員調機時之負荷。

4. 網印後品質檢測

網印主導線 (busbar) 寬約 2 mm，手指線 (finger) 寬度約 120 – 160 μ m，高度約 8 – 20 μ m。網印品質關係到電池串聯電阻以及電器安全。以光學檢測設備檢查網印線尺寸之困難處，主要是網印線表面反射率很高、粗糙度大，燒結 (firing) 前後光學響應截然不同，缺陷辨識難度高。目前誤判率過高的問題，國內外設備商都有類似狀況。

另外，印刷時有可能濺出銀漿在晶片表面形成微小硬質顆粒。研究發現若這些顆粒高過手指線，

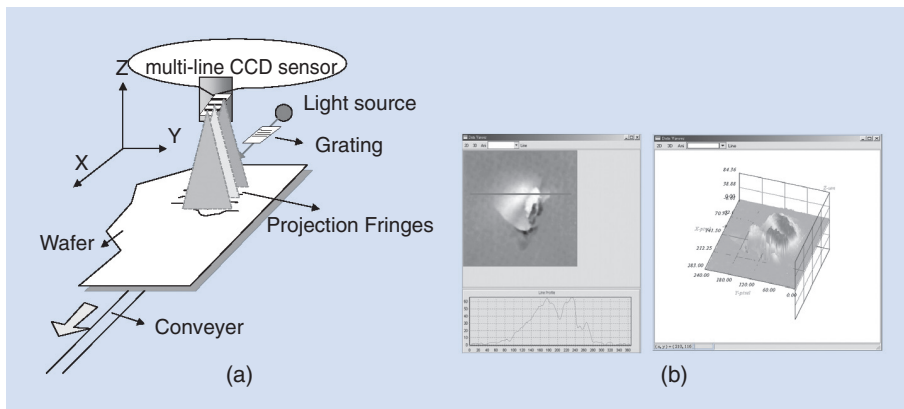


圖 5. 投影條紋法與新攝像技巧擷取移動晶片上溢漿微小顆粒 3D 尺寸。

層壓後 (lamination) 似有可能使 EVA (ethylene-vinyl acetate) 和晶片間有縫隙，而讓 EVA 剝離。因此檢查晶片表面任何小顆粒是確保品質更細密之作法。

前面提過陰影疊紋法和投影條紋法。不過，如果觀看較局部特徵時，例如切割痕或異物高度，上述陰影疊紋法 XY 解析度趨於不足，而未修正之投影條紋法 Z 解析度也不足。原因主要為產線上沒有時間藉由調變樣本高度來做傳統相位移法 (phase shifting) 取得相位資訊來做高度細切 (interpolation)，造成垂直方向解析度不足。此時可採用另一種多線式線型 CCD (line CCD) 攝影機，依序擷取移動待測物上明暗條紋來達到取得多相位移資訊，如圖 5(a) 所示。圖 5(b) 是一個實際發現兩條手指線間高度 $60 \mu\text{m}$ 之異常顆粒。Z 方向之解析度可做到 $1 \mu\text{m}$ 。網印品質量測技術還有相當多研究題目，例如如何提高穩定度、重複度以及檢測方法標準化。

完成印刷電極後，電池上便有接點，自此可以透過接點實施更多檢測技術，其中用「影像」來表達缺陷狀況之檢測方法，包括電致發光 (electroluminescence, EL)、光致發光影像 (photoluminescence, PL)、雷射光束引發電流法 (laser-beam induced current, LBIC)、鎖相熱影像術 (lock-in thermography, LIT)；非影像式電池特性量測法主要是 I-V 測試。四類影像式檢測方法中，在短期內電池製造者最有意願導入製程者，產業界普遍認為是電致發光法。

電致發光法之原理是藉著在電池上施加順向偏壓後，驅使電洞與載子結合釋出能量而產生光子，輝光頻譜在 $1,100 \text{ nm}$ 以上。機制上，對一片晶片

施加固定順向偏壓，在晶格缺陷較少 (載子擴散長度 diffusion length 較長) 或導電良好之區域釋出光子總數量越大，在紅外線攝影圖片上顯示出亮區；反之，在晶格缺陷較多或導電不佳處呈現出暗區。網印線斷裂或污染使得局部載子之驅動電動勢不足，亦有機會從影像上看出。圖 6 所示為工業技術研究院研究各類電池缺陷過程中之影像，其中在圖 6(a) 和 (b) 分別看到矽晶片破裂和網印污染造成局部問題。此外，另一狀況是手指線表面正常，但銀漿 (paste) 燒結不良，使底部不完整地穿透抗反射層到達發電層，目前多靠 EL 和晶片品質一併檢測。EL 技術的關鍵細節為驅動電壓/電流優化、EL 光譜分析、高感度攝像技術，目前 EL 技術愈來愈受到產業重視，在提升檢測效率、自動缺陷分類方面具有巨大潛力，國外亦仍在持續發展中⁽¹⁵⁾。與半導體產業中檢測設備特徵類似，缺陷資料庫與缺陷比對法是最困難和最具價值之處，目前國內還在發展中。

電池製程末段必須進行 I-V 測試，以對電池功率等電器規格加以分類，因為晶片乃以瓦計價，使得 I-V 測試已是標準檢測流程。亦因此步驟已經成

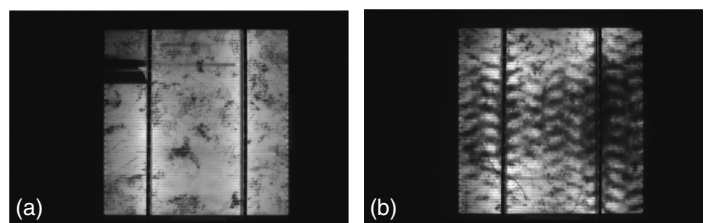


圖 6. 以電致發光觀察電池缺陷。

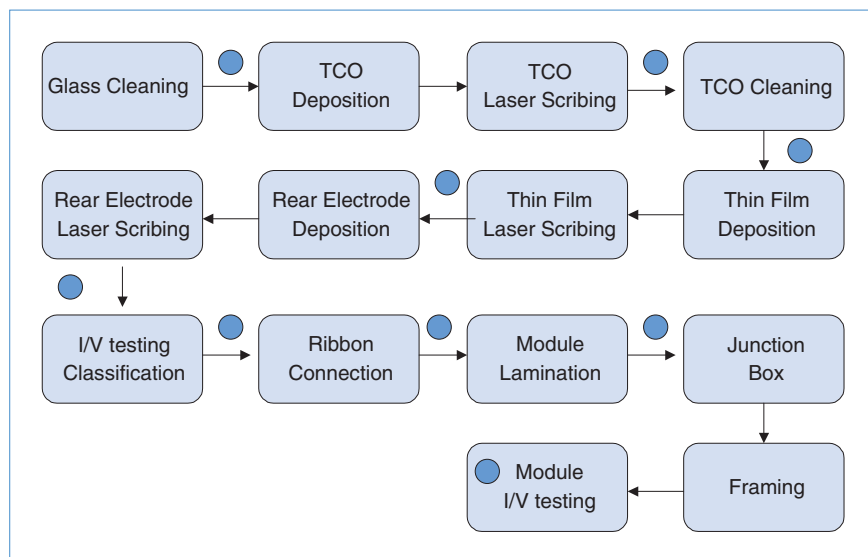


圖 7.
薄膜太陽能電池製程。

為標準測試流程，取得資訊較為容易，詳細方法可參考 IEC60904 等標準文獻，在此不予細述。進行 I-V 測試後，部分企業還會謹慎地針對顏色再行分類。目前晶片分色的方法亦無標準，由各公司自行訂定判別準則。在 2009 年 11 月 SEMI 太陽電池標準會議中，已有顏色量測方法議題被提出來討論。

在晶片進入模組階段，尚有諸多細膩之測試技術，細節可參考 IEC61730 太陽能電池系統安全鑒定、IEC61215 太陽能模組可靠度試驗、UL1703 平板型太陽能組件安全認證標準、IEC61345 紫外光耐受測試等。而針對薄膜式太陽能電池模組則可參考 IEC61646 測試標準。

在各方努力下，台灣在太陽能電池自動檢測技術上逐步擁有自主技術，並且逐步強化系統整合能力。而模組方面，國內亦已建立代理 TUV 授權發證之太陽光電測試實驗室⁽¹⁷⁾。顯示在產學研合作下，台灣在建立太陽能電池技術發展環境上已經穩步向前邁進。在此一基礎上，未來台灣要在如圖 7 所示薄膜太陽能電池製程上掌握品質控制點（紅點標示處為部分需要檢測處，包含膜質、微結構等項目），在技術發展上已有良好條件。

三、結語

本文依序說明晶片初步篩檢、晶片蝕刻粗化前後篩檢、抗反射膜檢測、網印後檢測四個階段檢測

技術，並對工業界所關心之電池缺陷特徵提供參考數據與標準。電池效率與品質是太陽能成功之關鍵，而檢測技術是提高電池效率品質之重要工具。近年來台灣是推動太陽能電池聯網平價化 (grid parity) 關鍵參與者之一，展望未來努力的方向包含：提高自動化生產效率、線上檢測、降低破片率、提高電池效率、降低每瓦成本，以及進一步發展薄膜太陽能電池的 turkey。晶片微裂檢測、蝕刻品質檢測、吸收率品質檢測技術及網印線品質檢測等，都將在這些發展方向上提供最關鍵之數據化指引。

參考文獻

1. 2009 台灣亞太產業高峰論壇暨台灣國際太陽光電論壇，聯合晚報 (2009 年 10 月 7 日)。
2. 2008 年太陽光電市場與產業技術發展年鑑，財團法人光電科技工業協進會，光連雙月刊，3 (2008 年 3 月)。
3. 2012 年全球太陽能電池產能將為 2008 年 3.2 倍，台灣大幅上調，日經 BP 社 (2009)。
4. PV Standards - A Comprehensive Overview of Activities for SEMI PV Group, http://www.semi.org/en/Standards/CTR_028769.
5. C. A. Walker, *Handbook of Moire Measurement*, 1 ed., Taylor & Francis (2003).
6. Junction Photovoltage 專利方法, <http://www.semilab.hu/jpvsemim.html>.
7. D. Neuhaus1 and A. Munzer, *Advances in OptoElectronics*, Article ID 24521 (2007).
8. SEMI M6-1108, *Specification for Silicon Wafer for Use as Photovoltaic Solar Cells* (2008).

9. A. G. Aberle, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **65**, 239 (2001).
10. J. A. Giesecke, M. The, M. Kasemann, and W. Warta1, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **17**, 217 (2008).
11. M. Kasemann, B. Walterz and W. Warta, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **17**, 441 (2009).
12. W. Warta, *Physica Status Solidi (A): Applications and Materials Science*, **203**, 732 (2006).
13. IEC60904-3, Solar Energy Spectrum.
14. SEMI MF657-0707, *Test Method For Measuring Warp and Total Thickness Variation on Silicon Wafers by Noncontact Scanning*.
15. T. Kirchartz, A. Helbig, and U. Rau, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **92**, 1621 (2008).
16. SEMI MF2074, *Guide for Measuring Diameter of Silicon and Other Semiconductor Wafers*, (2007).
17. 工研院太陽光電測試實驗室, <http://www.itri.org.tw/chi/news/detail.asp?RootNodeId=060&NodeId=061&NewsID=364>.
18. 王浩偉, 楊富翔, Apparatus for Measuring Imaging Spectrograph, 中華民國專利, 專利號 I245114.



戴鴻名先生為國立清華大學動力機械工程博士，現任工業技術研究院量測技術發展中心儀器與感測器組副組長。

Hung-Ming Tai received his Ph.D. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently the deputy director of Instrumentation and Sensing Technology Development Division in Center for Measurement Standards of Industrial Technology Research Institute.



王浩偉先生為國立交通大學光電工程博士，現任工業技術研究院量測技術發展中心檢測與自動化技術部經理。

Hau-Wei Wang received his Ph.D. in electro-optical engineering from Chiao Tung University. He is currently the manager of Inspection and Automation Technology Development Department in Center for Measurement Standards of Industrial Technology Research Institute.