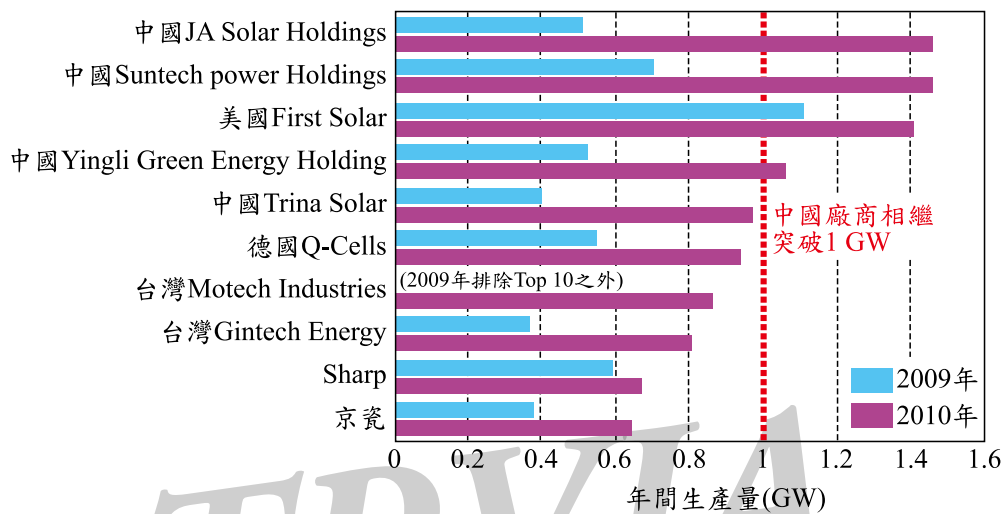


## 結晶矽太陽電池研發動向及高性能化技術



隨著競爭激化、供給過剩與價格崩跌的巨浪滔天而降，2011年不幸成為太陽電池廠最充滿噩夢的一年。全球相繼傳出太陽電池廠宣布關門的消息；2011年8月31日，曾經在去年5月風光接待美國歐巴馬總統親臨視察，並被視為歐巴馬綠色新政(Green New Deal)樣板的 Solyndra 公司依據聯邦破產法第 11 條宣布破產。同一時期，還有以 Ribbon Si 短柵狀基板知名的 Evergreen Solar 和從 Intel 獨立出來的 SpectraWatt 等公司也陷入倒閉風潮中。

導致 Solyndra 公司破產的原因之一在於模組價格的急遽下滑。根據美國 Solarbuzz 調查公司的資料顯示，太陽電池模組的出廠價在最近幾年跌至腰斬以下，2011年預估也將比2010年下滑30%。另外，供需失衡的原因之一還有中國大陸的崛起。尤其是中國晶澳太陽能(JA Solar Holdings)公司在2010年的年產能比前一年增加2倍以上，產量也一口氣躍登世界第一。其他如尚德(Suntech Power Holdings)、英利新能源(Yingli Green Energy Holding)、天合光能(Trina Solar)等公司的產能也一舉提高到1GW以上(圖一)。在市場競爭如此激烈，產業處境如此艱難的情況下，唯有藉著新技術的研發，創造產品間的差異化，並朝著提供具有長期信賴性的太陽電池模組產品等方向發展，才可能在這場激烈的競爭中存活下來。本文將以結晶矽太陽電池為主軸，針對太陽電池的市場現況、結晶矽太陽電池的高效率化技術，以及太陽電池模組所要求的長期信賴性等進行介紹。



資料來源: Nikkei Electronics 2011 10 月號

圖一、中國大陸太陽能廠的年產量多家已超過1GW

## 各類太陽電池之優劣分析

現行太陽電池的主流市場為多晶矽太陽電池，相關的廠商數量也較多，在日本方面，主要有：Sharp、京瓷、三洋電機、三菱電機、SunTech Power Japan 等。結晶矽太陽電池因使用矽晶圓為原料，除了具備高光電轉換效率以外，適合使用在一般的住宅屋頂以及設置面積較小的場所。另一方面，薄膜系太陽電池較結晶系太陽電池光電轉換率低，不過因矽原料的使用量少，對於重視低成本的工廠、電力公司以及政府單位等產業用/大規模發電用途，需求仍呈現逐漸擴大的趨勢。另外，不使用矽原料的化合物系太陽電池因量產性高，若可降低其販售價格，後勢相當讓人期待。今後多晶矽太陽電池與可達到高轉換效率的單晶矽型、HIT 型，以及可大幅降低價格的薄膜系及化合物系太陽電池間的競爭，將會越趨激烈。

表一、各類太陽電池之特性比較

種類	矽系			化合物系	
	結晶系			薄膜系	CIS、CIGS系
	單晶矽	多晶矽	HIT	非結晶	
特徵	高效率且價格高昂	現在主流	高效率且省資源	價格降低的空間較大	量產性高 設計性佳
模組轉換效率	○ (15%左右)	○ (低於15%)	◎ (低於20%)	△ (10%左右)	△ (超過10%)
溫度特性	△	△	◎	◎	○
價格	△	○	△	◎	◎
主要製造商	Sharp、 Suntech Power Japan	Sharp、京瓷、 Panasonic電工、 三洋電機、 三菱電機、 Suntech Power Japan	Panasonic電工、 三洋電機	Sharp、Kaneka、 三菱重工業、 富士電機Systems	Solar-Frontier、 Honda Soltec

## 太陽電池的市場概況

依據日本市調機構富士經濟的預測資料顯示，整體太陽電池的市場規模，推估至 2030 年將擴大至 13 兆 3,140 億日幣，與 2010 年相較，整體市場將擴大 3.9 倍。以 2010 年的結晶矽太陽電池市場規模來看，達到 2 兆 9000 億日幣，為前一年的 220.5%，推估至 2030 年市場規模將一舉擴大至 9 億日幣，為 2010 年的 310.3%。結晶矽太陽電池挾帶著高轉換效率，以及極佳成本表現的優勢，再加上擁有豐富的實績及高信賴性，成為現行太陽光發電市場的主流。

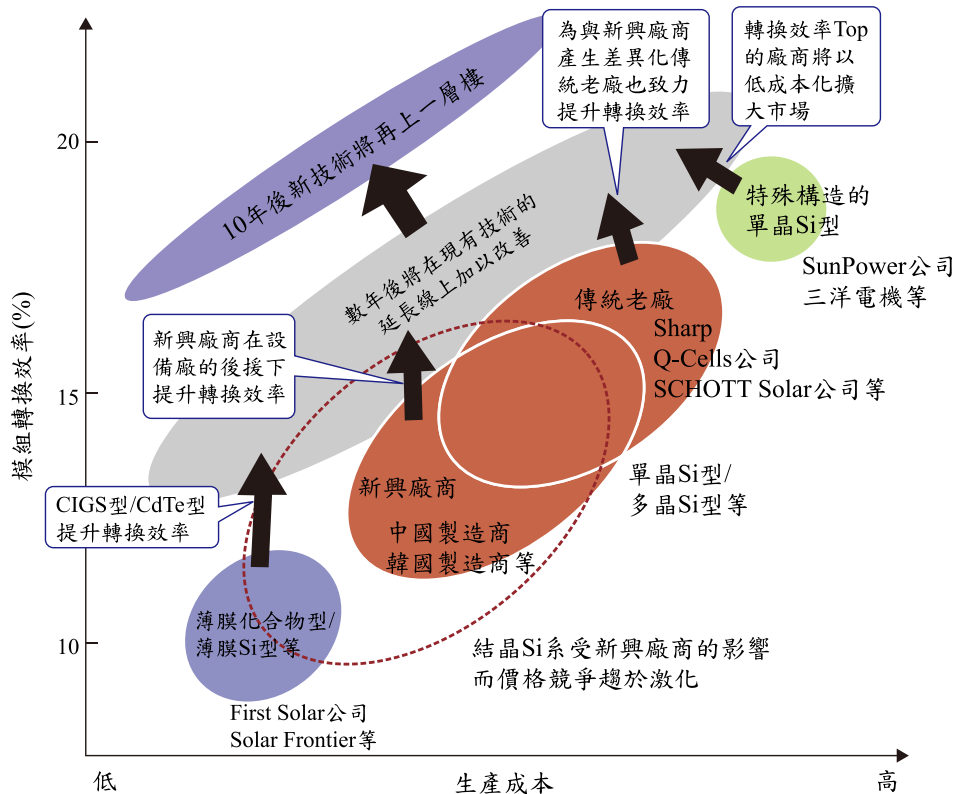
表二為研究室階段之各種太陽電池轉換效率最高值，因所使用材料的差異，太陽電池可分成不同種類，除了現行市場主流的多晶矽太陽電池、單晶矽太陽電池以外，薄膜太陽電池種類中，也以矽薄膜太陽電池、CIGS 太陽電池、鎘化銻太陽電池 (CdTe) 等在市場達到普及。

表二、各種太陽電池的轉換效率

材料	研發單位	國家	面積 (cm <sup>2</sup> )	轉換效率
單晶矽	新南威爾斯大學 (UNSW)	澳洲	4.0	25.0%
	SunPower	美國	148.0	24.2%
	三洋電機	日本	100.4	23.0%
多晶矽	新南威爾斯大學	澳洲	1.1	19.8%
	FhG-ISE	德國	1.0	20.4%
	三菱電機	日本	217.4	19.3%
球狀矽	Clean Venture 21 Corp.	日本	75.0	12.8%
III-V 化合物	SHARP	日本	0.88	35.8%
	Spire (聚光型/343 倍聚光)	美國	1.008	41.3%
a-Si/微結晶	KANEKA (模組)	日本	3827	13.4%
CIGS	ZAW Stuttgart	美國	0.503	20.1%
銻化鎘	國家再生能源實驗室 (NREL)	美國	1.032	16.7%
染料太陽電池	SHARP	日本	0.219	11.2%
有機	Solarmer	美國	0.044	7.9%

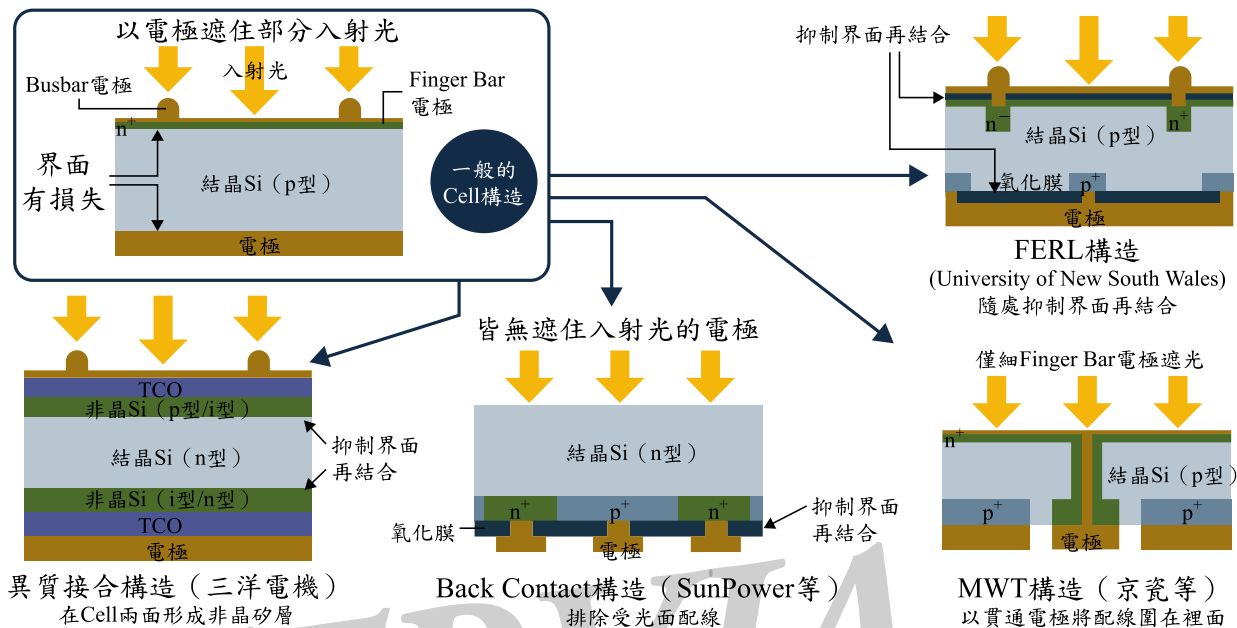
目前的太陽電池模組若依轉換效率來看，大略可分為特殊結構的單晶矽太陽電池，一般結構的單晶矽及多晶矽結構太陽電池及薄膜太陽電池。各類型的太陽電池廠都積極致力於轉換效率的提升，如 Sharp、Q-cell、SCHOTT Solar 等老廠為了拉開與新興企業間的差異化而努力提升效率；另一方面，新興製造商則在設備商為後盾的狀況下，致力於轉換效率的提升。而如 SunPower、三洋電機等擁有特殊結構單晶矽，轉換效率居於領先地位的廠商則企圖降低成本，以擴大市場，總之，彼此之間競爭十分激烈。

結晶矽太陽電池是現行生產量最大的太陽電池類別，在實用階段的性能也是最高的，短時間之內尚沒有其他太陽電池能夠出其右。於單晶矽太陽電池方面，SunPower 公司採用於受光面不設置電極的背面電極型 (Back Contact) 設計，測得 24.2% 的高轉換效率。另外，三洋電機公司將非晶矽薄膜與單晶矽結合，採用獨家研發的異質接合 (Heterojunction) 設計，成功實現 23.0% 的高轉換效率。異質接合或背面電極何者將創造最高的轉換效率 (圖三)。



資料來源: Nikkei Electronics 2011 10 月號

圖二、轉換效率提升的競爭十分激烈



資料來源: 資料來源: Nikkei Electronics 2011 10 月號

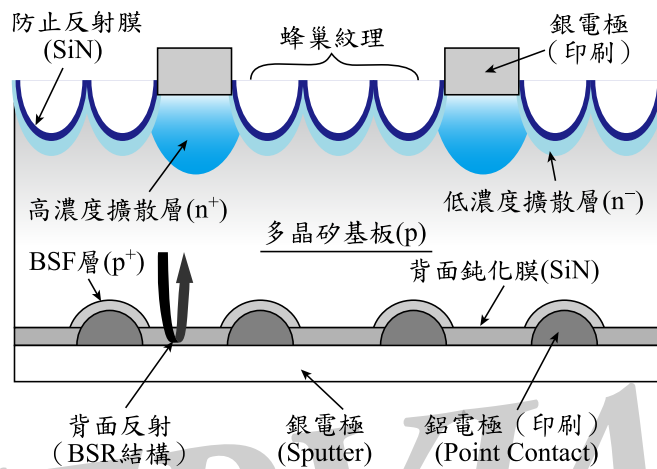
圖三、異質接合與背面電極的轉換效率之爭

以小面積的太陽電池來看，銻化鎘太陽電池的轉換效率為 16%，CIGS 太陽電池的轉換效率為 20%，CIGS 太陽電池相對具有較高的潛力。不過以實際的生產規模來看，銻化鎘太陽電池挾著高生產性，以及低價格的特性，一舉滲透市場（於 2009 年單一家公司的生產量就達到 1000MW）。不過銻化鎘太陽電池的模組效率僅 10~11%，用途僅限於設置於地面 MW 級的大規模發電系統。另外，銻化鎘太陽電池含有鎘等有毒物質，長期來看仍對環境造成威脅，大規模的普及化進展前途仍然堪慮。

另一方面，於 CIGS 太陽電池的實用化進展方面，Solar Frontier 公司已於日前啟動於宮崎縣第三工廠的生產，該工廠擁有年產 900MW 的生產能力，為全球最大級的 CIGS 薄膜太陽電池工廠。合併計算 Solar Frontier 公司所擁有工廠的全部產能，年產能已達到 1GW。此外，作為航太用途的 III-V 族系化合物太陽電池目前也持續進行實用化進展（主要材料為 GaAs/GaInP 系），且於實驗室等級已達到 35% 的高轉換效率。於地面用途的聚光型太陽電池系統，目前開始進行轉換效率超過 40% 之數百倍聚光型系統的評估。另外，針對次世代的太陽電池染料敏太陽電池、有機半導體等太陽電池的研發，也如火如荼地進行當中。

### 一、三菱電機公司之多晶矽太陽電池高效率化技術

圖四為三菱電機公司進行研發的多晶矽太陽電池結構圖，以下將針對蜂巢紋理受光面低反射化結構（Honeycomb Texture），以及可以改善背面結構的背面反射結構作說明。



資料來源：月刊 Display 2011 6 月號

圖四、三菱電機所研發之高效率多晶矽太陽電池結構

## 1. 蜂巢紋理結構

蜂巢紋理以往多應用於光微影技術 (Photolithography) 上，並且適用對象僅限於  $10*10\text{mm}^2$  的小面積產品。不過，三菱電機公司使用雷射圖案 (Patterning) 技術，在量產尺寸  $150*150\text{mm}^2$  的基板上進行高速形成技術的研發。新技術係在矽基板上形成依據有耐蝕刻特性的 Mask，於 Mask 上使用 YAG 雷射以激光圖案 (Laser Patterning) 開出孔洞，之後浸在 Etchant 中 (氫氟酸+硝酸) 中，可將直徑約 14 微米的半球狀凹面與太陽電池的受光面，形成最緊密的接合。

在整片  $150*150\text{mm}^2$  的基板上，凹面數量約達一億個。這樣的結構有助於降低多晶矽表面的反射率，目前三菱電機公司所量產的多晶矽太陽電池產品的反射率為 25~30%，在尚未貼附防止反射膜的狀態之下，若採用蜂巢紋理結構的設計，可成功將反射率降低至 20%，並且太陽電池的轉換效率可達到 18.6% 的水準。

## 2. 背面反射以及點接觸結構

能夠有效率地利用太陽光所擁有之廣波長區域的光線，才是達到高效率化太陽電池的重點。不過，結晶矽材料具有不易吸收太陽光紅外線的特性，特別是在縮小矽基板的厚度之後，將會大幅減少其吸收量。為此，建議可以插入背面鈍化膜 (Backside Passivation)，採用可減少太陽電池背面鋁電極面積的點接觸結構 (Point Contact)，並設置高反射電極等，此舉可使所反射的紅外線於太陽電池內部進行更有效的吸收，並且可一舉增加所產生的電流量。在  $150*150\text{mm}^2$  的基板上，使用新技術所試作出的太陽電池，於產業技術綜合研究所進行電壓測試，實驗結果證實可達到 19.3% 的高轉換效率，這也是目前利用實用尺寸所製造多晶矽太陽電池中，現階段全球的最高數值。

## 二、產總研發表多晶矽太陽電池新製造技術

日本獨立行政法人產業技術綜合研究所 (產總研) 與 Noritake 公司、不二製作所、和光純藥工業合作，於以固定砥粒方式切片 (Slice) 的多晶矽基板表面上，不需使用真空裝置，且可以較低的成本，並適用量產的手法，成功研發出於基板表面形成紋理 (Texture) 的新技術。

本次所研發出的新技術，係於以固定砥粒方式切片的多晶矽基板上，進行噴砂處理，並於基板表面形成均一的凹凸。之後於基板上再以新研發的酸蝕刻液體浸漬，除了可將噴砂處理後所生成的損壞層除去之外，還可同時於基板的表面形

成紋理，於基板的表面形成均一的紋理結構，這是以往的技術難以達到之成果。另外，以固定砥粒方式切片的多晶矽基板的表面形狀，雖然可以依據切片條件來變動，不過使用新技術還可將基板表面所殘留的損壞層的深度及凹凸形狀等，透過噴砂的條件變更來加以控制。也就是說，雖然可以配合每個切片條件來變更噴砂的條件，不過即使改變切片的條件，也同樣可形成最佳化的表面紋理結構。

利用新技術製作出的基板，應用於一般的太陽電池製程上，於  $4\text{cm}^2$  的基板上，試作出轉換效率達到 16.9% 的多晶矽太陽電池。經過噴砂處理的基板，基板上沒有殘留缺陷，因此沒有接合 Leak 的問題，並且顯示出良好的太陽電池特性。產總研以固定砥粒方式切片的多晶矽基板的製作方法，再加上噴砂技術、酸蝕刻液技術的改良，並搭配量產製程的驗證，於太陽電池結構下功夫，以製造更高效多晶矽太陽電池為最終目標。

### 三、Sharp 公司計畫五年內提高結晶系 Cell 的轉換效率至 25%

在一般的結晶矽型太陽電池領域，有很多的太陽電池廠競逐其中。日本 Sharp 公司則計畫以領先一步的飛躍技術，在轉換效率的提升方面開創新的產業版圖。

Sharp 公司採用背面電極方式開始量產高效率的單晶矽型太陽電池。此型電池採用了受光面無電極的 Back Contact 方式，藉由擴大 Cell 表面的受光面積而提高了轉換效率。此外，也透過降低相鄰 Cell 間接線阻抗的配線技術而提高了全模組的輸出功率。在其大阪堺廠具有年產 200MW（20 萬 kW）的產能體制。

根據該公司村松部長表示，結晶系太陽電池透過背面電極或異質接合可望挑戰 28% 的 Cell 轉換效率理論極限。今後該公司將專注在轉換效率的提升上，他認為具體特性若能做到開放電壓 750mV 以上、短絡電流 45mA 以上、曲線因子 0.8 以上，則轉換效率可達 27%，Sharp 公司的目標是五年之內超過 25%。為達以上目標，該公司將針對原材料不純物的影響與電子壽命、受光面結構、Passivation Film 的膜質和電極周邊的阻抗值等加以徹底檢討。

### 太陽電池模組的長期信賴性

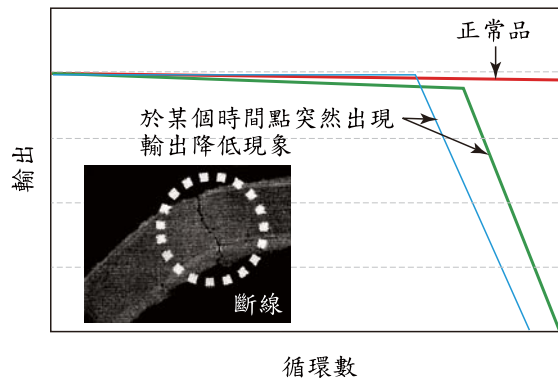
太陽電池模組長期置於屋外使用，一定會出現某程度的劣化問題，如何確保太陽電池模組的長期信賴性，對製造廠商來說是非常重要的課題。這幾年隨著太陽電池模組的快速普及，產品不良的發生件數也隨之增加。低信賴性產品的氾

濫，除了帶來負面觀感以外，對太陽光發電系統的普及之路也會帶來阻礙，為此，謹慎的結構設計以及建立製造條件非常重要。由太陽電池模組的長期信賴性的觀點來看，主要可以由（1）對於溫度週期的耐性；（2）對於濕度的耐性；（3）太陽電池於製造時出現裂縫等課題來探討。

於日本的太陽電池產品必須通過 IEC 以及 JIS 所規定的測試條件，通過上述測試之後，製造廠商對模組性能提供保障，以日本國內廠商為例，系統的保障期間為十年。除了通過基本測試以外，製造廠商還必須自行實施多項嚴苛的環境測試，以確保產品在實際使用狀態下，能夠維持長期的信賴性。

### 一、對於溫度週期的耐性

IEC61215 規定的合格條件為 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ 、200 次循環之後，初期輸出可確保 95% 以上的輸出量。測試當中可能出現輸出突然降低的問題（圖五），一般多為太陽電池間所連接的 Tab 線斷線之故。該斷線發生的主要原因為太陽電池封裝的 EVA 膜之熱膨脹，在收縮之下 Tab 線的反覆應力，以致於 Tab 線因為加工硬化，遂出現斷線的問題。為減少斷線問題的發生，必須從鐳錫條件，以及 EVA 膜厚度等方向探究，找到最佳化的條件來對應。



資料來源：月刊 Display 2011 6 月號

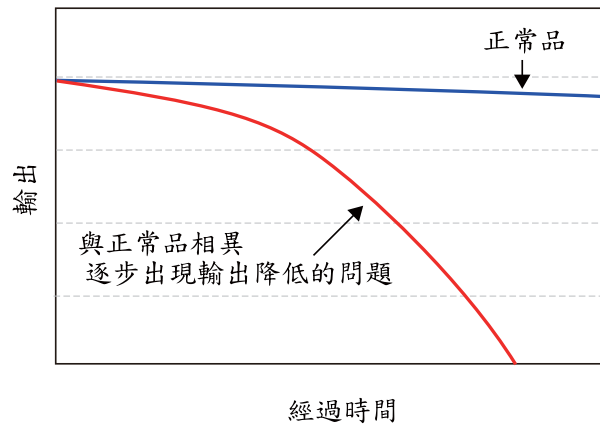
圖五、溫度循環測試

### 二、對於濕度的耐性

針對 IEC61215 的合格條件，規定必須要通過  $85^{\circ}\text{C}$ 、濕度 85%、1000 小時的高溫高濕測試條件，並且初期輸出必須確保 95% 的輸出量。圖六為劣化品與正常品比較圖，於高溫高濕條件的劣化與前述的斷線模式不同，以緩慢速度逐步出現劣化。該現象主要出自模組的直列阻抗逐漸加，經過實際調查，發現大部分的問題出現在太陽電池本身的直列阻抗（電極與矽材料之間的接觸阻抗）增加。



不過，要釐清該問題的生成原因相當困難原因可能來自於所使用太陽電池（特別是電極的形成條件），或是鋅錫所使用的助鋅劑種類及數量，抑或積層之後 EVA 膜的架橋狀態（架橋率）、Back Film 的選用（透濕性）等多種可能的因素。必須重新檢視實際的製造條件，並將信賴性測試的結果即時回復，以找出最佳化的製造條件。



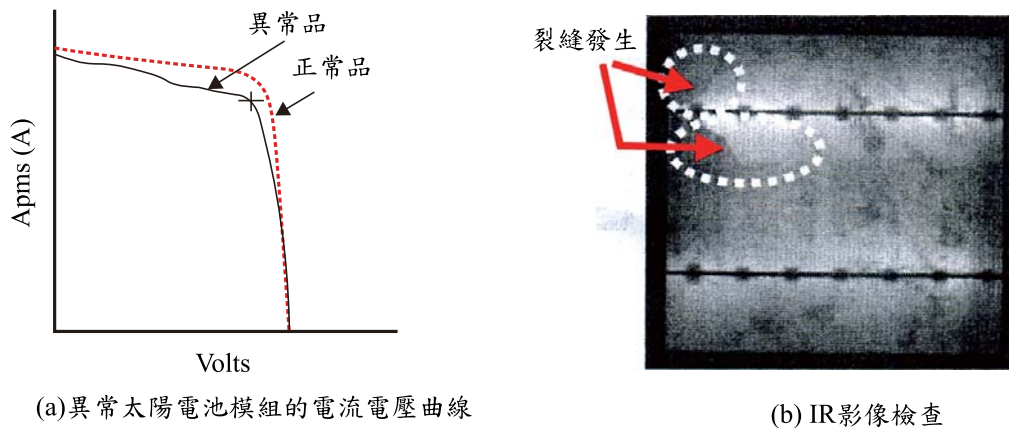
圖六、高溫高濕循環測試

### 三、太陽電池於製造時出現裂縫問題

於模組製造時的低成本要求，已是現在的趨勢。於結晶矽太陽電池方面，可藉由矽晶圓的輕薄化，來達到降低材料成本的目標。不過矽晶圓的薄型化，對太陽電池的製程以及模組的製程，會增加裂縫發生的機率。對於有裂縫的太陽電池產品，在初期雖可確保輸出量，不過隨著溫度循環的增加，縫隙可能帶來輸出降低的問題。為減少製造過程中裂縫的發生機率，可利用積層條件的調整來改善。

圖七為當太陽電池出現裂縫問題時，太陽電池模組的電流電壓曲線，以及針對有縫隙之太陽電池的紅外線畫面。若該項檢查項目可以納入實際的太陽電池量產製程中，將有助於大幅降低不良品的流出數量。不過，以時間來看將會於檢查製程中耗費過多時間，不過專家認為近期內有可能將上述檢查納入一般線上檢查當中，屆時將可大幅提升太陽電池的信賴性。

TPVIA



圖七、出現裂縫問題的太陽電池模組特性

### 參考資料

1. Nikkei Electronics 2011 10 月號
2. 月刊 Display 2011 6 月號
3. <http://taiyoseikatsu.com/news/201104/tn201104-01.html>
4. [http://www.eettaiwan.com/ART\\_8800654177\\_675763\\_NT\\_10a59f9e.HTM](http://www.eettaiwan.com/ART_8800654177_675763_NT_10a59f9e.HTM)
5. [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2011/pr20111004/pr20111004.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2011/pr20111004/pr20111004.html)
6. <https://www.fuji-keizai.co.jp/market/11082.html>
7. <http://www.japanfs.org/ja/pages/031303.html>
8. <http://www.ecool.jp/press/2011/07/solarfrontier11-0729.html>
9. <http://www.sharp.co.jp/corporate/report/solar/index.html>

TPVIA