

# 太陽能

日期：2011 年 經濟部技術處 產業技術白皮書

出處：產業篇 標題貳

主題分類：綠能科技領域 第三章

## 文章內容

### 一、CIGS 太陽能電池關鍵材料與製程技術

#### (一) 技術研發目標

太陽光電(PV, Photovoltaic)台灣產值近年來倍增。根據綠能產業旭升方案，預測 2015 年全球太陽光電產值將達新台幣 2 兆元，台灣整體太陽光電產值可望突破新台幣 4,500 億元。目前台灣整體太陽光電產業仍以矽晶太陽能電池為主，矽晶產業技術發展已趨成熟，競爭極為激烈。台灣產品與中國大陸的差異化不大，產業欠缺垂直整合。目前雖有政府資源投入、推動健全產業結構，但長期難有其他突破性優勢，應朝向具有前瞻競爭優勢的技術，以及太陽光電模組發展。在下世代薄膜太陽能電池(Solar Cell)技術中，銅銦鎵硒型(CIGS,  $\text{CuInGaSe}_2$ )太陽能電池是目前效率最高者，小面積電池效率已經達到 20.3%，模組的效率也已經達 14%。若 CIGS 太陽能電池搭配軟性基板，將可降低太陽能電池之重量及封裝材料之成本，應用領域可包含太陽能田、屋頂型太陽光電、建築整合太陽能電池系統(BIPV, Building Integrated Photovoltaic)及消費性電子產品等，極具市場機會與潛力。

目前 CIGS 太陽能電池技術以共蒸鍍及真空濺鍍製程為主，製造成本仍高昂。在軟性基板技術上，只有美國的 Global Solar 利用捲繞式傳輸製程(R2R, Roll to Roll)成功量產商品。但 Global Solar 使用的仍是真空技術，其他同樣採用軟性基板廠商大多都還受困於效率不佳、良率低等瓶頸。因此，如能採用非真空製程搭配軟性基板(金屬軟性基板或塑膠基板)，配合可高速生產的 R2R 將可以大幅提升產量。故以非真空製程取代真空製程(例如刮刀塗佈、電鍍或是噴塗方式)，不但可減少真空設備昂貴支出，也可提高材料利用率，節省材料成本。此外，無鎘緩衝層為發展 CIGS 薄膜太陽能電池不可或缺的一環。因硫化鎘緩衝層雖具有較高的轉換效率，但其生產成本、副產物處理、環境成本等問題，與環保意識背道而馳。目前 HONDA 公司以硫化銦、Solar Frontier 以硫化鋅分別在無鎘製程上取得成功。倘若國內產業再不自行研發，恐受到國際牽制而被迫以高成本進行專利授權。在薄膜 CIGS 太陽能電池製程中，吸收層薄膜製程與設備在產品的製造上扮演重要角色，特別是發展低成本的非真空製程。常壓電漿技術為一種新興的科技工藝技術。現階段 CIGS 產業界尚未應用常壓電漿硒化技術的能力，目前硒化普遍作法仍以爐管硒化來進行。在考量反應性之下，硒來源多採用極毒氣體硒化氫

(H<sub>2</sub>Se)，除設備成本昂貴、基板尺寸受限腔體大小外，劇毒性氣體可能造成之風險也抑制了低成本非真空 CIGS 製程發展。

綜上所述，缺乏掌握關鍵技術與專利布局，且產線投資高昂，是 CIGS 產業發展當前面臨最主要的問題。因此本技術的研發主軸主要分成三方向：開發 CIGS 前驅物薄膜技術，以掌握自主奈米材料；無鎘 CIGS 電池模組製程技術，開發新型可撓式無鎘緩衝層材料；常壓電漿輔助硒解離技術，開發置換目前爐管硒化之新方式，避免劇毒性氣體 H<sub>2</sub>Se 所造成的風險，抑制低成本非真空 CIGS 製程發展。短期技術研發目標為完成可調控組成之奈米粉體製程平台，開發不同能隙(Bandgap 1.1~1.4 eV)與組成之漿料、開發具獨特自有專利之無鎘硫化物薄膜，及完成線型電漿源(幅寬 100 mm)、建立半自動化之常壓電漿輔助硒解離技術平台，使所製取 CIGS 太陽能電池元件效率達 11%。中長期目標為低成本無毒性之 CIGS 太陽能電池與模組開發，元件效率 15% (< 1 cm<sup>2</sup>)、100 cm<sup>2</sup> 可撓式模組效率達 10%。希望同時結合業界以精緻化、高值化層面，提升太陽光電產業價值，協助產業創新轉型。

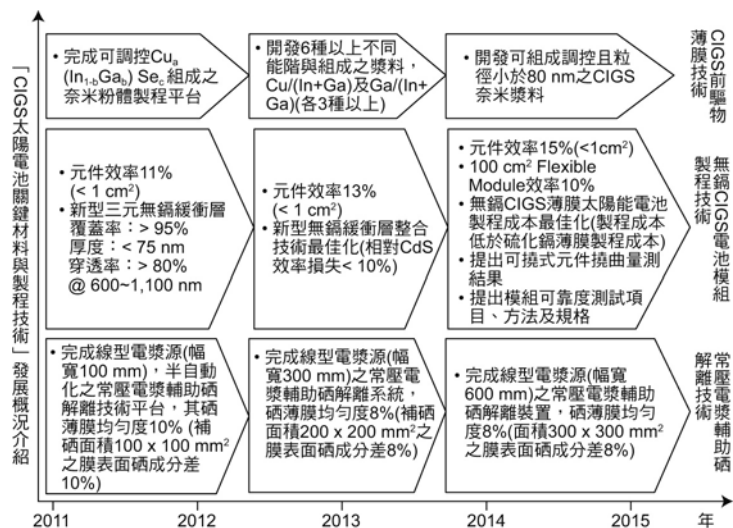
## (二) 技術發展藍圖

新型印刷式太陽能電池技術開發重點在於開發奈米材料合成與漿料調製技術，搭配後續的硒化技術、創新緩衝層、透明導電層及金屬導線技術，以形成結晶性 CIGS 薄膜。接著將此 CIGS 薄膜製作成元件。短期目標為利用電性分析量測新型印刷式太陽能電池效率達 11% (< 1 cm<sup>2</sup>)，實現非真空漿料印刷式太陽能電池。而後以大面積奈米漿料塗佈與奈米材料合成技術放大為主要開發方向，導入新型無鎘緩衝層整合技術最佳化，元件效率達 13% (< 1 cm<sup>2</sup>)。進行 H<sub>2</sub>Se 硒化製程與技術開發，以驗證 H<sub>2</sub>Se 硒化製程對具有氧化物 CIGS 薄膜前驅物影響評估。中長期目標將利用金屬基板，結合開發的奈米漿料與塗佈技術，在軟性金屬基板上製作新型印刷式太陽能電池，目標為完成 100 cm<sup>2</sup> 軟性新型印刷式太陽能電池次模組製作，元件效率 > 10%。

根據美國再生能源實驗室(NREL)及其他國際 CIGS 研發團隊發表的實驗結果顯示，CIGS 吸收層內的能隙分布對於光電轉換效率有顯著的影響，並證實 CIGS 吸收層若能呈現雙梯度能隙分布(Double Gradient Bandgap)，將會得到最佳的光電轉換效率的表現。然而目前 CIGS 非真空技術受限於可調控能隙的材料難尋，轉換效率的提升因而陷入瓶頸。CIGS 前驅物薄膜技術藍圖規劃的開發重點，在於具可調控組成之奈米粉體製程平台，及不同能隙(Bandgap 1.1~1.4 eV)組成之硒化物漿料，製備出以塗佈方式即可達成雙梯度能隙分布的 CIGS 前驅物薄膜。短期目標以完成可調控銅銦鎘硒組成之奈米粉體製程平台及粒徑小於 80 nm 的奈米漿料，中長程目標放大奈米粉體製程平台及完成每批次大於 200 mL 的漿料分散製程，同時開發含納離子、粒徑小於 50 nm 且能承受 480°C 之硒化溫度之奈米漿料。

目前 CIGS 太陽能電池在追求低污染、甚至是無污染化的目標時，仍無法克服緩衝層材料中須含有重金屬硫化鎘的問題，使其在生產及使用上產生了對環境汙染及生態衝擊的隱憂。無鎘 CIGS 電池模組製程技術擬開發無毒，具專利性且不致降低轉換效率之三元無鎘緩衝層薄膜材料，使替代能源研發滿足環境保護及產業長遠發展的雙重考量。此外，利用奈米漿料與塗佈技術，在軟性金屬基板上製作新型印刷式太陽能電池，效率須達到 11%。短期目標將利用無鎘緩衝層進行元件整合之最佳化，比

較含鎘與不含鎘之緩衝層在製備好的電池元件效率，兩者差異需小於 10%。同時仍持續提升軟性金屬基板上製作新型印刷式太陽能電池之效率至 13%。中長期目標元件效率須達到 15%，且進行製程放大實驗；在大面積的可撓式 CIGS 太陽能電池次模組(100 cm<sup>2</sup>)效率須達到 10%。進行無鎘 CIGS 薄膜太陽能電池製程成本最佳化，無鎘緩衝層製程成本需低於硫化鎘薄膜製程成本。最終朝向開發材料使用率高、製程設備成本低、高效率且可大面積之太陽能電池技術；並以可撓式基材應用為導向，建構輕量、可撓式、無鎘型 CIGS 太陽能電池及模組技術。



資料來源：工研院綠能所整理，2011年8月。

圖 2-2-3-1-1 CIGS 太陽電池關鍵材料與製程技術發展藍圖

常壓電漿輔助硒解離技術的開發重點在於應用線型(幅寬 100 mm)大氣電漿技術游離化硒分子，使形成具反應性之硒活性物種，進而提升吸收層之硒化效果。當中，其技術以硒粉取代具毒性之 H<sub>2</sub>Se 為硒蒸氣源，搭配光譜分析之電漿診斷技術，即時分析物種濃度，及其裝置系統氣流流場分析技術，控制硒化均勻性及硒薄膜均勻度達 10% (面積 100 x 100 mm<sup>2</sup> 之膜表面硒成分差 10%)。短期目標以放大線型電漿源技術為主要開發方向，幅寬達 300 mm，以利放大處理面積；其硒化均勻性及硒薄膜均勻度於 200 x 200 mm<sup>2</sup> 面積達 8%。中長期技術研發將應用所開發的技術平台，建立常壓電漿輔助硒解離製程技術，同時放大處理面積至 300 x 300 mm<sup>2</sup>，而膜表面硒成分差亦達 8%。

### (三) 產業效益

CIGS 前驅物薄膜技術所建立之可調控組成奈米粉體製程平台，其 CIGS 粉體除了供應奈米漿料所需之奈米粉材，亦可應用至真空系統所需的多元硒化物靶材原料，以提高台灣產業於上游材料的自主性。而 CIGS 奈米漿料技術開發將可與國內設備商合作開發印刷式製程設備，使國內印刷式薄膜太陽能產業鏈更趨完整。

而無鎘緩衝層技術不僅降低製程對環境的衝擊，使 CIGS 太陽能電池產品符合先進國家的綠色規範，防止未來產業出口受限，並可降低製程危險性、製程成本，增加產業競爭力。此外，藉由專利的申請，有利國內廠商技轉使用，避免專利受制於人的不利點，對產業發展預計將有極大助益。

此外，發展吸收層薄膜關鍵設備模組技術，除可補足國內機械設備在 CIGS 產業的技術缺口，進而加速國內產業提升其太陽能電池設備開發能力，及相關製程研究之基礎。藉由常壓電漿輔助硒解離技術的建立，取代傳統硒蒸氣及真空電漿補硒方式，預期可提升原始效率的 10~20%。而常壓環境的製程，對 CIGS 太陽能產業朝向非真空 R2R 及大面積製程技術，不僅提升製程相容性，更可降低生產成本。

所建立之線型常壓電漿系統，其裝置亦可應用在民生、顯示器產業及其他光電領域產業。大氣電漿具有乾式且常壓製程的優勢。同時可藉由模組化電漿噴頭達大面積化，應用於光阻灰化及有機薄膜(例如聚醯亞胺薄膜(PI, Polyimide)與彩色濾光片(Color Filter)用之黑色矩陣(BM, Black Matrix))的剝膜製程。未來若成功開發並導入產業，台灣市場而言，每年即有數十億元的設備市場需求；此外，如觸控面板及太陽能電池用之透明導電薄膜(Transparent Conductive Oxide Thin Film)，亦可藉由裝置之特定需求設計，進行透明導電氧化物(TCO, Transparant Conductive Oxide)的製備。

在整體 CIGS 太陽能電池與模組產業推動方面，將能協助國內相關廠商如台積電、聯相、旺能、新能、正峰等指標公司的投入，利用技術交流或共同開發的合作模式，縮短切入關鍵製程如 R2R、無鏽緩衝層的技术開發時程，預期將可提供國內欲投入 CIGS 設備廠商或模組廠商一個技術驗證與評估的平台，或協助輔導設備廠商國產化關鍵元件，提升台灣 PV 產業之國際競爭力。

## 二、薄膜太陽能製程設備及模組關鍵技術

### (一) 技術研發目標

近年來地球暖化效應日趨嚴重，各國政府紛紛強化潔淨能源產業技術與產能方案。台灣亦將低碳家園潔淨能源列入國家發展重要策略，行政院於 2008 年提出永續能源綱領及節能減碳行動方案後，綠色能源便列入 2009 年六大新興產業之一，期望太陽能光電產業於 2015 年達到產值新台幣 4,500 億元之綠色能源旭升方案目標，使台灣成爲全球前三大太陽能電池生產，及完整之產業群聚國家。

太陽能電池技術演進可分爲三個世代，第一代太陽能電池爲矽晶太陽能電池，其技術發展較爲成熟，目前市場占有率將近八成。第二代太陽能電池爲薄膜太陽能電池包括矽薄膜技術(非晶矽(a-Si, Amorphous Silicon)、微晶矽( $\mu$ c-Si, Micro-crystalline Silicon)及薄膜多晶矽)、化合物半導體薄膜技術(銅銦鎵硒型、III-V 族及碲化鎘(CdTe, Cadmium Telluride))以及新興材料技術(如染料敏化、奈米技術等)，目前市場占有率將近二成。第三代太陽能電池爲利用奈米結構、結合有機或高分子材料，開發出來的先進太陽能電池，仍以實驗室發展中爲主，距離商品化仍有一段差距。目前太陽能電池市場雖仍以矽晶爲主，但由於薄膜太陽能電池的材料成本較低、製程相對簡單、能源消耗較少，藉著太陽能電池轉換效率技術的不斷提升，其製造成本有降至每瓦 1 美元以下的潛力，已具備市場的實用性與競爭力。

各種太陽能電池之產能比較通常以良率、成本、能量回收期、材料損耗與環境衝擊、產品穩定性與轉換效率等爲綜合衡量指標，2009 年正值矽晶材料缺貨，亦是矽薄膜技術發展之高峰，然而大量生產且商品化者仍以非晶矽電池爲主，但囿於照光穩定與光電轉換效率僅達 6%，市場競爭能力不足，過去兩年，產業技術發展乃重於製程改善與關鍵鍍膜設備技術之開發，過去利用電漿輔助化學氣相沉

積(PECVD, Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)鍍膜系統中使用的射頻電源已漸由高頻電源取代，除可增加鍍膜速度外，亦可有效降低離子對薄膜轟擊效應。在沉積薄膜上，可產生具有照光穩定性較高之微晶矽薄膜，進而將非晶-與微晶-薄膜太陽能電池串聯的堆疊式太陽能電池 a-Si/ $\mu$ c-Si 之應用；可更有效增加太陽光譜的吸收範圍，效率超過 10%，並提高照光穩定性。因此，堆疊式薄膜太陽能電池已成為目前矽薄膜太陽能電池的主要發展技術之一。

為能達成矽薄膜電池低成本與高轉換效率品質優勢，鍍膜機台與製程改進必需配合技術提升，目前電池量產仍有技術瓶頸待突破，諸如非晶矽薄膜穩定化技術、高品質  $\mu$ c-Si 薄膜快速鍍膜技術、透明導電薄膜製程技術、介面層/中間層的結構設計技術等、而關鍵之鍍膜設備及其模組，發展以超高頻微波為主之高密度電漿鍍膜機台，如電子迴旋共振鍍膜機台(ECRCVD, Eletron Cyclotron Resonance CVD)，配合產業上下游量產化能量，及 a-Si/ $\mu$ c-Si 堆疊式薄膜太陽能電池製程技術發展，期於 2015 年能達成元件轉換效率 13%以上，均勻度亦能控制於 10%以下之大面積(1.1 m x 1.4 m)整體技術目標。

CIGS 太陽能電池具有低成本與高效率的潛力，國外實驗室亦有達 20%轉換效率之成果，但實際大面積量產技術仍有待突破，包括以各種低廉價格、不同材質如玻璃、不鏽鋼、聚合物等做為基板之光電吸收層材料，採用真空與非真空製程，真空製程如共蒸鍍(Evaporation)技術、濺鍍硒化(Selenization)技術；非真空製程如電鍍硒化、熱硒化塗佈硒化，甚而配合捲繞方式生產之製程與設備等，如何提升良率，降低生產成本、提升轉換率(CIGS 成分的黃金比率及最佳化厚度)、大尺寸面板塗佈(Coating)的均勻性，均已成爲當前各國研發技術重點。

目前產製 CIGS 較爲成熟的製程係採用真空濺鍍和高溫爐  $H^2Se$  硒化技術。但由於量產化過程中，產能提升困難及環境污染瓶頸，難以形成統一成熟的製程技術。為能補足此項技術缺口，在 CIGS 的技術開發上，除了材料、結構、製程、設備的開發外，尚須輔以提升產能及良率的智慧自動化製造系統。本項技術開發將以軟性基板採用非真空之製程方式，以大幅降低生產成本。技術聚焦於開發 CIGS 薄膜製程與快速熱處理(RTP, Rapid Thermal Processing)整合設備，以智慧化之先進製程控制技術，結合線上檢測及診斷技術，建立薄膜成型及快速熱處理自動化量產系統，以提升產能並獲得較高之良率與產能。

由於軟性基板在應用面上的潛在效益，技術開發將以捲軸方式薄膜太陽能電池之開發爲架構。發展捲繞式 CIGS 薄膜成型製程設備系統技術，包含微凹版(Micro-gravure)塗佈技術、狹縫式(Slot-die)塗佈技術並且以達到次微米塗佈層次爲目標。同時開發熱處理製程技術並以智慧型自動化技術整合製程線，在 CIGS 薄膜製備之製程設備系統中，快速熱處理硒化製程設備系統，具有低溫預熱、快速加熱、快速冷卻等功能，是以非接觸式、即時量測技術進行薄膜溫度控制，可有效率節省能源，完成高重複性、高均勻性之薄膜製備，並以此關鍵設備之完成，促使非真空軟性太陽能電池於 2015 年達成 15%之轉換效率目標。

## (二) 技術發展藍圖

國內業界基於半導體(Semiconductor)與液晶顯示器(LCD, Liquid Crystal Display)產業經驗與基

礎，在發展矽薄膜電池技術上，主要仍在開發自有之專利製程與關鍵鍍膜設備，以能產出良率高，大面積與可與其他電池競爭之轉換效率，矽薄膜製程生產線使用之重要關鍵設備，包括物理氣相沉積設備(PVD, Physical Vapor Deposition)、化學氣相沉積設備(CVD, Chemical Vapor Deposition)、導電膜濺鍍設備、鐳射微刻機(Laser Scriber)等。過去業界雖已有量產實績，然關鍵設備仍由國外引進，為能快速達成整體研發目標，本項技術開發電子迴旋共振化學氣相沉積機台及其關鍵模組如微波電漿模組技術、加熱模組技術，及驗證大面積化、均勻分布機制。電子迴旋共振化學氣相沉積機台製程技術目標，包括開發高速矽薄膜鍍膜(非晶矽鍍膜速率 50 Å/S 以上、微晶矽鍍膜速率 10 Å/S 以上)、即時摻雜技術等，配合非晶矽與微晶矽堆疊式製程與鍍膜精進，提升堆疊式薄膜太陽能電池轉換效率達到 10% 以上。期能配合產業上下游量產化能量，開發高效率與良率之化學氣相沉積鍍膜設備，發展非晶矽與微晶矽堆疊式製程技術。其發展藍圖見圖 2-2-3-2-1，小面積之測試到大面積(1.1 m x 1.4 m)玻璃基板之量產化，期望 2011 起至 2015 年，效率由 9% 成長至 12% 以上。

在 CIGS 薄膜電池技術發展上，捲軸軟性基板太陽能電池的開發如前述，在成本及應用面考量下，將可成為引領台灣太陽科技產業進入競爭領先群的重要發展藍圖。開發關鍵設備以及經由關鍵技術之開發，建立智慧自動化之 CIGS 薄膜製備系統，先經由先導設備製程驗證，再配合業界之量產規劃，將是快速而直接之發展途徑。製程中，玻璃基板大面積 RTP 爐設備、濺鍍設備，蒸鍍設備、塗佈設備等，國內已有研究單位或業界投入，但對於現階段捲軸製程設備之開發，仍存在關鍵技術缺口，在達成整體研發目標下，亦逐年規劃發展藍圖見圖 2-2-3-2-1 所示。由 2011 起，將整合業界科專與研究單位之技術投入，先由單機發展製程驗證；並逐年提升與量產化發展，期於 2015 年，達成效率 15%，成本降至每瓦 1 美元以下之整體技術目標。



資料來源：中科院飛彈火箭研究所整理，2011 年 8 月。

圖 2-2-3-2-1 薄膜太陽能製程設備及模組關鍵技術發展藍圖

### (三) 產業效益

根據 Solarbuzz 年度太陽能市場報告，2010 年全球太陽能市場安裝量達到 18.2 GW。從產量來看，全球太陽能電池產量達到 20.5 GW，其中薄膜電池產量占總產量 13.5%，約 2.8 GW，在未來四年新增太陽能電池安裝量將超過 100 GW。依據 VLSI 調查 2010 年電池製程設備銷售額亦達到 104 億美元。預測未來五年太陽能電池組件銷售額複合成長率可達 22%，其中設備複合成長率約可達 10%。

矽薄膜太陽能電池產業於 2008 年因矽晶電池缺料而有發展空間，2010 年也受到矽晶缺料問題獲得改善反受到擠壓，雖然目前矽薄膜效率仍無法與傳統矽晶圓電池比擬，業者仍能運用其上下游一貫之生產線，開發堆疊式之製程以提高效率，同時改善鍍膜設備良率與速度，加大面版面積，再配合終端市場之區隔，其生產利潤仍屬可觀，產業效益仍然可期。

相較於矽薄膜太陽能電池產業，國內 CIGS 薄膜太陽能電池的發展雖較晚，各種漿料配方、製程技術與設備均仍處於萌芽開發階段，依據 IEK 分析，過去五年，CIGS 全球生產量年複合成長率以 240% 速度擴充，CIGS 產品目前雖仍以德、美、日為主，國內業者於 2010 年也有市場調整，部分掌握專利、技術之廠商有所投入，如綠陽光電已有市場實績，台積電則取得美國 STION 授權以濺鍍技術生產 CIGS 產品，華新麗華與德國 SOLARION 合作，以共蒸鍍技術開發產能，其他如友達、正鋒、新能等仍持續耕耘中，經濟部透過國內研究機構配合業界，分別針對乾式真空鍍膜製程與濕式塗佈，以及捲繞式製程等軟板製程進行前瞻技術研究，並對關鍵設備重點支持開發，有效協助國內業界突破自主發展瓶頸。預估整體效益，2015 年將有新台幣 1,710 億元投資於 CIGS 產業，研發國內自製材料及設備技術，有機會取代進口，並協助降低 CIGS 生產成本，提供優質客服，設備迅速交機服務，提升國內 CIGS 產業競爭力。

同時，CIGS 產品應用範圍廣泛，包含玻璃基板、金屬基板、塑膠基板等以及濺鍍、蒸鍍、電鍍、印製等不同製程技術，除一般電廠外，尚可應用於太陽能電池整合電子模組 (EIPV, Electronic-integrated Photovoltaics)、建築整合太陽能電池系統、建築應用太陽能電池 (BAPV, Building Applied PV)、太陽能電池整合車輛 (TIPV, Transpotation Integrated PV) 等利基產品。特別是軟性基板除電廠之應用外，更具有其他創新性終端應用之潛能。未來市場潛力預估：至 2015 年平均有 30% 之特定應用市場之成長，需求高達 2 GW，產業效益可期。

## 三、新世代能源關鍵技術

### (一) 技術研發目標

在東日本大震災引發福島核災之後，全球開始重視核電廠安全與存廢問題，同時思考使用替代能源取代核能發電的方案。在各種替代能源中，太陽能源可說是地球生命之根本，乾淨且取之不盡用之不竭，是各國政府全力推展之產業。自 2002 年起全球太陽光電市場即以每年 35.5% 之速度成長。台灣政府亦在 2009 年的「旭升方案」、2010 年的「綠能突圍」中，明確將太陽光電產業列為能源科技重點產業。其中薄膜型太陽能電池在材料耗量及製程道次上之優勢，極具發展潛力。

在目前已發展的薄膜型太陽能電池材料中，主要有 IV 族的非晶矽/微晶矽、II-VI 族的碲化鎘、I-III-VI

族的 CIGS 及 III-V 族的砷化鎵(GaAs)等。分析四種電池材料的優缺點，其中非晶矽在 2007~2008 年曾是台灣成長最快的薄膜太陽能電池，但因本質結構缺陷多、轉換效率低、穩定性不佳、製程繁瑣，以致整體成本不易降低等因素，不利於台灣本土發展，從 2009 年開始廠商紛紛移轉至對岸，甚至是關廠。碲化鎘太陽能電池轉換效率雖可達 10.6%，但此型電池最大缺點是含有環境污染之毒素-鎘，未來之普及及應用將受到環保考量而有所限制，亦不適合台灣本土發展。反觀銅銦鎵硒型薄膜太陽能電池因具有較佳的光電轉換效率(實驗室可達 20.1%)及可大面積量產外，更有長效期穩定性；而砷化鎵聚光型太陽能電池(CPV, Concentration Photovoltaic)則具有最高之光電轉換效率，因此新世代能源將朝 CIGS 及 CPV 太陽能電池發展關鍵技術。

CIGS 太陽能電池因技術發展逐漸成熟，先進國家目前逐漸由第一代硬板(玻璃)，朝第二代軟板(批式)，甚至第三代軟板之 R2R 生產邁進。由於各國政府在太陽能電池建置之獎勵措施已逐漸限縮，加上短期供過於求，以致矽晶太陽能電池的價格已滑落至每瓦 1 美元以下，CIGS 太陽能電池要有競爭力就需提高轉換效率，並結合 R2R 大量生產以降低成本。而要達到高轉換效率及符合 R2R 的量產技術，首要掌握可撓式基板的自主技術及品質控制，其中 400 系列不銹鋼材之熱膨脹係數與 CIGS 接近，相對於塑膠基板，可獲得較高之轉換效率，且因不含鎳故成本低，及早建立 R2R 不銹鋼基板之表面平坦化與絕緣層技術開發，將有助於國內業界切入可撓式 CIGS 太陽能電池領域。

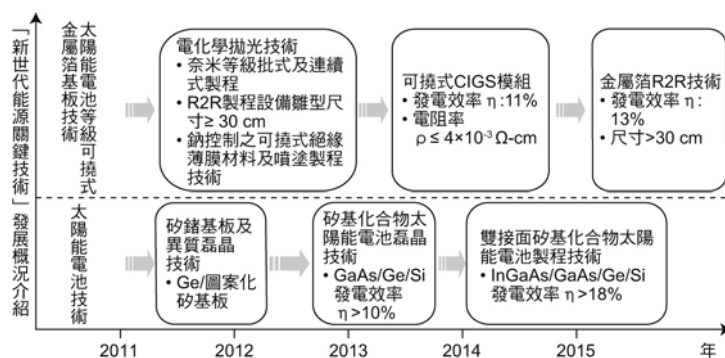
III-V 族砷化鎵多接面的光電轉換效率最高，被廣泛應用於航太工業，如衛星上之太陽能板；加上聚光模組後發電效率可達到 40%以上，可運用於太陽能發電廠。唯此型電池元件以鍺單晶為基板，除單價過高外，其尺寸僅能達 4 吋無法做大，以致成本居高不下。開發矽基板取代鍺基板，除了物理特性符合太陽能電池的需求外，將可大幅降低材料成本。但此技術發展的最大瓶頸為矽晶與 III-V 族化合物半導體間晶格不匹配問題，突破此瓶頸的方法為運用低溫緩衝層技術，或奈米技術在矽基板形成圖案化，再進行鍺矽異質磊晶，藉由控制陣列型奈米圖案之大小、間隙及緩衝層之成分，將可成長出高品質磊晶。初期須將鍺磊晶層之品質提升至接近鍺基板，接續進行 GaAs/Ge/Si 之結構設計及磊晶成長參數最佳化。本技術的最終研發目標為發展出高效率的太陽能電池，矽基板磊晶之單層化合物太陽能電池光電轉換效率> 10%，雙界面之轉換效率> 18%。有鑑於國內在 III-V 族光電產業與矽產業日趨成熟，結合化合物半導體與矽的優點實為未來光電產業發展的趨勢。

## (二) 技術發展藍圖

不銹鋼箔要做為第三代可撓式 CIGS 太陽能電池基板，以國內目前生產之冷軋不銹鋼捲而言，除了厚度太厚(一般為 0.3~0.4 cm)，加上表面粗糙度太大，必需加以精密壓延、整平薄化(0.1 mm 以下)及鏡面拋光達到< 100 nm 的表面粗度，才能符合基板使用規格。雖國內半導體設備業界，過去對管件、腔體表面處理有電化學拋光經驗及技術，但主要以微米尺度之拋光整平為主，相對於高效率 CIGS 太陽能電池所需之奈米尺度等級而言(表面粗糙度 20~60 nm)，除了冷軋環境之建構改善，又因金屬箔導電較差，大面積幅寬之電流密度均勻性掌控不易，再加上 R2R 連續式動態處理製程，實為技術上之嚴苛挑戰，藍圖規劃詳見圖 2-2-3-3-1。本技術於 2012 年，將以批式電化學拋光製程為基礎，結合有能力製作幅寬為 30 cm 之 R2R 設備業界，導入連續式電化學拋光技術，開發出 R2R 電化學拋光製程設備雛型。另輔導國內不銹鋼箔業界，建立精密壓延整平之不銹鋼捲生產技術，先期採 10 cm 幅



寬，後採 30 cm 幅寬之不銹鋼捲，進行電化學拋光製程驗證，以因應國際上預估 2015 年，R2R 生產 CIGS 太陽能電池元件模組發展需要。適時促成國內產業鏈成型，建立基板自主關鍵技術，未來創造新一代太陽能產業產值。在技術上，除表面整平拋光外，因不銹鋼箔為導體，故表面尚需絕緣處理，本技術開發摻雜鈉之絕緣層材料，及薄膜噴塗製程技術，除了確保薄膜可撓性外，另因控制適量鈉含量之輔助作用，預期可同時提高元件發電效率。



資料來源：中科院材料暨光電研究所整理，2011 年 8 月。

圖 2-2-3-3-1 新世代能源關鍵技術發展藍圖

以 R2R 的方式製備可撓式 CIGS 太陽能電池，目前在國外宣稱可以進入小量生產的廠家，如美國的 Global Solar 及 Ascent 等，尺寸大小大約 30 cm 幅寬、200 m 長、均採用四元共蒸鍍方式，轉換效率約在 10% 左右。而本技術除了使用共蒸鍍方式製備 CIGS 吸收層外，還會嘗試濺鍍硒化法進行製備，以利後續更大幅寬的 R2R，過程中也將考慮搭配真空無錫緩衝層，形成全真空式的 CIGS 太陽能電池製程，控制 CIGS 元件膜厚達 3  $\mu\text{m}$  的超薄化及 11% 以上的高效率。

現今為使 11% 的 CIGS 太陽能電池提升至 15%，控制基板的鈉含量將是一個相當重要的手段，一般在可撓式的金屬基板都無鈉金屬的添加，因此，後段製程的添加方式，一般都會選用蒸鍍 NaF-50 nm，提升 CIGS 的載子移動率  $> 10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。未來本技術將會進行 Mo/NaF/CIGS 及 Mo/CIGS/NaF(熱擴散)，期望能藉由 Na 離子的擴散增加 CIGS 的載子移動率，提升 CIGS 太陽能電池效率達 15%。

在聚光型太陽能電池技術發展趨勢，因業界在多界面砷化鎵太陽能電池之轉換效率已具備一定水準，故如何以矽晶圓取代鍺基板、降低生產成本及提升產品尺寸，為首要建立技術。矽基板磊晶化合物之首要技術，在矽晶片上製作陣列型奈米圖案，或漸近式緩衝層，以阻擋差排之延伸。做為太陽能可用之矽基板，初期奈米圖案之尺寸由 1 微米至 500 奈米，最終將達成 300 奈米，矽基板磊晶化合物太陽能電池單層之轉換效率目標大於 10%，雙界面則提升至 18%。藉由此技術，將可以低單價大面積積矽當基板，取代昂貴之鍺基板，未來矽基板磊晶化合物半導體之架構，將融合矽半導體之積體電路 (IC, Integrated Circuit)，及 III-V 族砷化鎵之高速元件與光電特性等，繼而衍生為新一代多功能元件。

### (三) 產業效益

根據 Solarbuzz Marketbuzz 於 2011 年 3 月發布之太陽能市場報告指出，2010 年全球太陽能市

場安裝量達 18.2 GW，2011 年全球太陽能電池市場需求將達 20.5 GW。單就金屬箔基板而言，一般亮面不銹鋼箔材料，目前每公噸市價約新台幣 17~18 萬元，而符合太陽能等級之金屬箔基板，依表面平坦度等級規格，可提高價格達每公噸新台幣 30~150 萬元，其最高等級規格，例如表面粗糙度至 5 奈米等級，若厚度能進一步薄化至 50~60 微米時，將可適用為可撓式顯示器基板，屆時將可創造顯示面板相關衍生價值，進一步提升相關技術之經濟效益。美國 United Solar 預估 2012 年不銹鋼箔每月用量將達 2,000 噸，其年產值將達新台幣 72 億元以上，若再結合國內太陽能上下游形成可撓式 CIGS 太陽能產業鏈，則相關產值將高達百億元以上。

GTM 研究中心市場分析，未來 4 年 III-V 族高效率太陽能電池在系統整體成本將降低 30%，CPV 在 2015 年將有 1 GW 之安置量。以低成本矽替代基板技術為主之聚光型太陽能電池模組若開發成功，將可適時切入市場並創造產品競爭力。

一般具備有高效率及可撓性的太陽能電池，其應用性較廣，像是 i-Pad、i-Phone、筆電、露營帳棚等，都可做為攜帶式電子產品的充電能源裝置。而鋪設建築屋頂及大樓帷幕，也都是未來新產品目標，其售價也較裝設電廠的價錢來得高。因此，目前國外廠商都朝向積極布局其產品的應用價值，並提升自家產品的效率及環境適用性，以因應未來市場需求。

## 參考文獻

陳婉如、何孟穎，2011，*2011 年太陽光電市場與產業技術發展年鑑*。台灣：光電科技工業協進會。6 月初版。

王孟傑. 2011. 「太陽光電產業近期發展狀況」。工業材料雜誌，第 295 期，頁 62-69。