

共蒸鍍銅銦鎵硒(CIGS)太陽電池之發展現況及未來展望

Coevaporation Cu(InGa)Se₂ Solar Cells — Recent Progress and Future Prospects

謝東坡 T. P. Hsieh¹、張仁銓 J. C. Chang¹、莊佳智 C. C. Chuang²、蔡松雨 S. Y. Tsai³
工研院太電中心(PVTC/ITRI) ¹ 研究員、² 副理、³ 組長

為因應石化燃料對全球環境的巨大影響，全力推展乾淨無污染的能源刻不容緩，太陽光電已成為目前世界各國關注的焦點，近年來銅銦鎵硒(CIGS)薄膜太陽電池具有高效率、低成本的潛力，有機會取代成本昂貴的矽晶圓太陽電池。目前正處於CIGS產業發展的關鍵期，唯有掌握關鍵技術才能降低製造成本，進而推行永續的綠色能源。本文旨在探討CIGS太陽電池之技術發展，同時介紹幾種不同CIGS吸收層製程的優缺點，並進一步分析共蒸鍍製程的產業現況及未來展望。

Photovoltaic has become an important area of research owing to economic, energy-related and environmental issues. An interest in thin-film solar cells is motivated by the potential of producing them at low cost. Of all thin-film solar cells, CuInGaSe₂ (CIGS) solar cells have the greatest potential for replacing present technologies because of the low-cost of their production and high conversion efficiency (19.9%). This paper is aimed to introduce the CuInGaSe₂ solar cells based on coevaporation techniques. The current status of industry and future prospects are also remarked.

關鍵詞 /Key Words

太陽電池(Solar Cell)、銅銦鎵硒(CuInGaSe₂; CIGS)、共蒸鍍製程(Coevaporation)

簡 介

近年來，由於新興國家的快速發展，導致各種能源短缺，全球的氣候變異、環境污染及生態浩劫均顯示危急的情況，無污染、無虞匱乏並足夠全世界長期使用的綠色能源 - 太陽能，備受各界的矚目與期待。就現況而言，太陽能所產生的電

力仍無法取代現有的石化能源，主因在於成本較高及供電時間的不穩定性，但是長遠來看，導致溫室效應的二氧化碳必須減量及石化燃料總有耗盡的一天，讓世界各國無不卯足全力補助太陽能產業的發展，希望藉由太陽能製作技術的進步，使其成為未來能源的主流，然而成本過高的問題是目前技術必須克服的最大關卡，2008年

▼表一 薄膜太陽電池效率比較

Thin-film Technology	CIGS	CdTe	Thin-film Si
Cell Efficiency	19.9% NREL ⁽²⁾ (0.42 cm ²)	16.5% NREL ⁽³⁾ (1 cm ²)	12.5% United Solar ⁽⁴⁾ (0.27 cm ²)
Module Efficiency	13.4% Showa Shell ⁽⁵⁾ (3459 cm ²)	10.9% BP Solarex ⁽⁶⁾ (4874 cm ²)	8.2% Pacific Solar ⁽⁷⁾ (661 cm ²)

底的金融風暴，可說是吹皺了一池春水，原本蓬勃發展的太陽能業者無不吃足苦頭，卻提早讓成本的管控浮上台面，提升電池效率及降低成本是目前產業發展的最大關鍵，現今市場上的太陽電池仍以矽晶圓太陽電池為主，但目前製造成本仍高，因此低成本的薄膜太陽電池趁勢而起，除了具備可大面積化、低溫製程的優點，且只需少量的吸收材料（~數微米）。目前薄膜太陽電池的主要材料有銅銦鎵硒(CIGS)、碲化鎘(CdTe)、非晶/微晶矽薄膜(a-Si/ μ -Si)，以實驗室單一電池的最高轉換效率而言，CIGS、CdTe及a-Si/nc-Si/nc-Si（堆疊式結構）分別可達19.9%、16.5%及12.5%⁽¹⁻⁴⁾；至於模組轉換效率，若以正式發表轉換效率來討論，仍然以CIGS的13.4%為最高⁽⁵⁾，其次是CdTe模組10.9%⁽⁶⁾，矽薄膜模組的效率最低為8.2%⁽⁶⁾，其相關面積及發表機構可見表一；在模組的數據，部分廠商有更前瞻效率的製程，CIGS模組效率可能已經達到14%。CdTe薄膜太陽電池成為這兩年太陽能市場的最大驚奇，美商First Solar幾乎已成為CdTe的代表，三年前First Solar是一個沒沒無聞的薄膜小廠，2008年已躍居全球太陽能製造商第二位，在2009年更有可能拿下龍頭寶座，幾乎可以宣告薄膜太陽電池的局面提早到來，而關鍵就在成本，

雖然以CdTe為主的模組效率大約只在10%左右，但就成本而言，First Solar已經抵達矽晶圓無法超越的門檻—每瓦1美元，正朝向每瓦0.5美元的目標前進，達成市電並聯網的電價需求。雖然今年全球太陽電池逐漸產生供過於求的現象，矽晶廠商低價求售、賠本消耗庫存的情況下，First Solar毛利率持續維持50%以上，獨占薄膜太陽電池出貨的50%以上，此結果給薄膜電池廠商打了一劑強心針，只要成本夠低，未來薄膜太陽電池將大幅改變目前的市場現況，然而，CdTe中所含鎘對環境的危害疑慮，可能影響CdTe太陽能技術的未來發展，雖然First Solar目前已經提出完整回收機制，另外提撥回收基金給第三者，但是環境污染的疑慮仍未完全解除。另外，矽薄膜本身材料源充足，因此投資發展的廠商眾多，不過矽薄膜的整體轉換效率目前仍然偏低，仍難以威脅矽晶圓的市場，若效率無法有效提升，將成為長期發展的瓶頸。以CIGS為材料的電池在小面積電池效率已達到19.9%，模組的效率也已經高達14%，都是薄膜太陽電池中最佳者，主要是CIGS擁有相當寬廣的吸收波長(400~1200 nm)，同時具備最好的光學吸收係數，只需厚度約2微米的CIGS吸收層，便足夠吸收所有入射的太陽光，其模組的效率(~14%)也是唯一能夠與多晶矽晶圓的效率(~15-16%)相匹敵，就成本考量來說，因為製程與CdTe接近，成本相信很快能降到每瓦1美元以下，未來發展潛力十足。CIGS吸收層的技術大致可以分為：①真空共蒸鍍技術；②真空濺鍍硒化技術；③電鍍硒化技術；④漿料塗佈硒化技術等，而部分相關技術介紹或市場分析可參考先前著作⁽⁸⁻¹³⁾，各種技術皆有不同

▼表二 CIGS 及多晶矽能源回收時間比較

Production Mass	Poly-Si	CIGS	Shortening Ratio
10 MW	2.6 Year	1.2 Year	54%
30 MW	2.2 Year	1.1 Year	50%
100 MW	1.5 Year	0.9 Year	40%

優缺點，本文將分析 CIGS 幾種製程的發展近況，另分析共蒸鍍技術的優勢及未來產業化的挑戰。

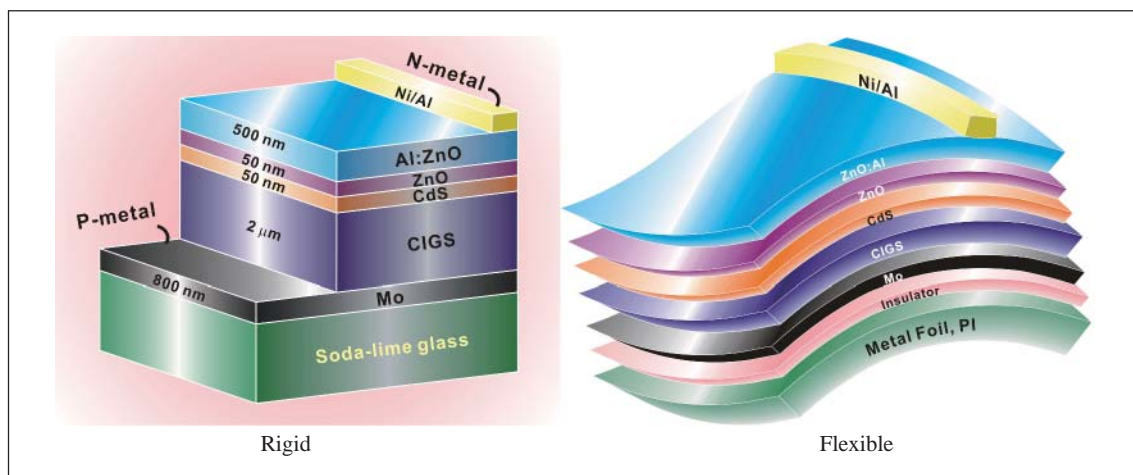
CIGS 製程之發展現況

CIGS 太陽電池發展已經有了 30 年以上的歷史，雖然進展的腳步並不算快，但現有 CIGS 薄膜太陽電池光電換效率已相當接近 20%，已足以支撐產業化所需的技術，而且實際長時間使用不衰減及擁有亮黑色的外觀，讓 CIGS 的應用層面更為寬廣。CIGS 的能源回收時間相對於多晶矽而言也有優勢，在產能為 10 MW 時，多晶矽需要 2.6 年的時間才得以回收，而 CIGS 只需要 1.2 年即可回收；當產能擴展到 100 MW，

多晶矽仍需要 1.5 年才得以回收，而 CIGS 只需要 0.9 年則可回收（表二）。CIGS 材料本身多元複雜，不過對於缺陷的容忍性極高，因此許多差異化的製程使用在 CIGS 太陽電池上都有不錯的結果，其中真空製程具有良好的製程控制能力，非真空製程擁有大量製造的優勢，各種製造技術推陳出新，令人驚訝的是，不論是共蒸鍍及濺鍍模組最好效率都已經超過 13%，讓各界為之振奮。而電鍍硒化技術及漿料塗佈硒化技術在小面積的電池也已突破 10% 的基本門檻，然而大面積的模組效率仍然不佳，無論是真空或非真空製程，元件結構基本上皆如圖一所示，分別代表玻璃及軟性基板之結構示意圖，為了因應不同的應用層面，也在元件結構上做了部分調整，各有其優缺點，詳述如下。

1. 基板

便宜的鈉玻璃目前依舊是 CIGS 太陽電池的首選，玻璃內部鈉離子的擴散是目前被認為提升效率及良率最簡單的方式，其



▲圖一 CIGS 太陽電池結構示意圖

整體製程類似目前的 LCD 面板製程，採用全自動 In-Line 製程，可提高製程穩定性，而且在後續的玻璃封裝技術較為容易，長時間使用穩定性較高，玻璃基板所製造 CIGS 的轉換效率也較高，目前實驗室所發表的世界紀錄還是以玻璃製造為主，但缺點是體積較大、重量較重，因此第二種改良製程採用可撓曲式基板也趁勢而起，一般搭配全自動捲式(Roll-to-Roll)製程，產能輸出大幅提升，也可大幅降低成本，其中可撓曲軟性基板包括可耐高溫製程的不鏽鋼箔(Stainless Steel Foil)、鋁箔(Al Foil)、銅箔(Cu Foil)、鈦箔(Ti Foil)等金屬箔已被廣泛使用，研究機構中以日本 AIST 及德國 ZSW 發展較佳，AIST 在厚度 20 μm 之 Ti-foil 基板上，小面積電池最高轉換效率可達 17.4%，其他量產公司(Global Solar、Nano Solar、Solopower)也均朝此方向發展。另外一種方法是使用有機聚合物(Polyimide)基板等，有機聚合物的耐溫極限大約在 400°C 左右，只能使用低溫製程，較佳的 CIGS 長晶溫度卻要到 550°C，美國 Ascent Solar 及德國 Solarian 都在進行低溫製程改善 CIGS 的晶體品質之方法，但是軟性材質的模組效率仍待改善，且必須考量封裝可靠度的問題。

2. CIGS 背電極

玻璃上方的背電極大多採用 Mo 與 CIGS 接觸，發展 30 年來幾乎沒有太大的改變，主要是 Mo 本身導電性佳、高溫的穩定性佳，且能與 CIGS 形成良好的歐姆接觸，另外，Mo 的熱膨脹係數與玻璃及 CIGS 相近，可以容忍較大的製程變異。此外，部分採用金屬基板的製程必須先鍍上一層絕

緣層，再將 Mo 鍍於絕緣層上。

3. CIGS 吸收層技術

此技術可以區分為兩大部分：①單一階段製程：以真空共蒸鍍製程為代表；②連續二階段製程：真空濺鍍、電鍍及漿料塗佈技術，再加上後續的硒化處理，都屬於二階段製程。共蒸鍍單一階段製程擁有較佳的成分控制能力，也較容易設計不同能帶漸變的結構，可以實現較佳的轉換效率，是共蒸鍍製程的優勢之一，直到目前為止，小面積高效率(>17%) CIGS 太陽電池大都是利用共蒸鍍製程製作。連續二階段製程還可細分為：

①先鍍上 Cu、In、Ga 等前驅物，再利用硒蒸氣進行硒化。

②先鍍上 Cu、In、Ga 等前驅物，再利用 H_2Se 進行硒化，此製程之 H_2Se 具有極佳的還原特性，非常適合用於非真空製程以去除不純物，此法硒化形成 CIGS 的品質較佳，但是 H_2Se 具有高毒性，所需成本較高。(目前真空濺鍍製程有 Showa Shell、Honda 使用，非真空製程有 Heliovolt、ISET 及 Unisun 等公司使用)

③先鍍上 Cu、In、Ga 等前驅物，再鍍上一層硒薄膜，進行快速熱處理，此製程能夠快速完成硒化步驟，是未來相當看好的技術之一。(目前真空濺鍍製程有 Centrotherm 使用、非真空印刷製程有 Nano Solar 等使用)

④先鍍上 Cu、In、Ga、Se 等前驅物，再進行後續熱處理或硒化製程，本製程的概念極佳，可惜直到目前為止尚未有較好的效率表現。

▼表三 CdS 與 Cd Free 緩衝層對 CIGS 電池特性比較

Device Structure with CdS					Area (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	F.F. (%)	Efficiency (%)	Year	Institute
MgF ₂	AZO	ZnO	CdS	CIGS	0.42	0.690	35.5	81.2	19.9	2008	NREL
	AZO	ZnO	CdZnS	CIGS	-	0.705	35.5	77.9	19.5	2006	NREL
	AZO	ZnO	CdS	CIGS	0.41	0.694	35.2	79.7	19.5	2005	NREL
MgF ₂	AZO	ZnO	CdS	CIGS	0.50	0.718	34.3	78.4	19.3	2007	U. Stuttgart
	AZO	ZnO	CdS	CIGS	0.41	0.689	35.7	78.1	19.2	2003	NREL
MgF ₂	BZO	ZnO	CdS	CIGS	0.20	0.645	36.8	76.0	18.0	2001	AGU
	AZO	ZnO	CdS	CIGS	0.50	0.695	34.1	77.3	18.3	2009	ZSW
	AZO	ZnO	CdS	CIGS	0.52	0.687	34.0	74.9	17.5	2007	AIST
Cd Free:											
			ZnS(O,OH)	CIGS	0.40	0.661	36.1	78.2	18.6	2003	AGUNREL
MgF ₂	AZO		ZnS(O,OH)	CIGS	0.40	0.670	35.1	78.8	18.5	2004	NREL
MgF ₂	AZO		ZnS(O,OH)	CIGS	0.16	0.671	34.9	77.6	18.1	2002	AGU
	AZO	ZnMgO	ZnS	CIGS	0.50	0.661	35.1	74.9	17.3	2009	ZSW
	AZO	ZnO	In ₂ S ₃	CIGS	0.10	0.665	31.5	78.0	16.4	2003	France/ZSW
	ITO	ZnMgO		CIGS:Zn	0.96	0.587	40.2	68.9	16.2	2002	Matsushita
MgF ₂	AZO		ZnSe(OH)	CIGSS	1.08	0.566	36.0	71.0	15.7	2001	HMI/Siemens
MgF ₂		ZnO	In _x (S,OH) _y	CIGS	-	0.594	35.5	74.6	15.7	1996	U. Stuttgart
MgF ₂	AZO	ZnO		CIGS	0.46	0.604	36.2	68.6	15.0	1999	NREL
MgF ₂	AZO		ZnS(OH)	CIGSS	0.50	0.588	33.7	73.7	14.6	2003	HMI/Siemens

4. 緩衝層(Buffer Layer)

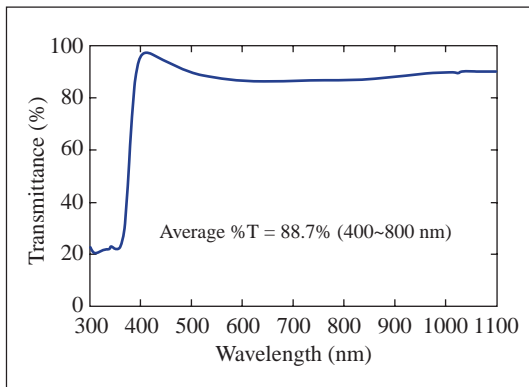
常用 CdS 加上高阻值 ZnO 為主，目的在於形成良好的半導體異質界面並抑制材料的寄生漏電流，可得到較高的轉換效率，製程方式以濕式化學浴鍍膜(Cheical Bath Deposition; CBD)較普遍，一般使用三種化學原料：①氨水；②硫的前驅物：(Thiourea; SC(NH₂)₂)；③鎘的前驅物：CdSO₄、CdCl₂、CdI₂、Cd(CH₃COO)₂等，反應環境大約在 60~80°C，但是重金屬鎘的疑慮讓許多量產的計畫漸漸朝向無鎘緩衝層，有些研究直接採用 ZnO，另外有使用 ZnS、Zn(O,S,OH)_x、ZnSe、InS、In(O,S,OH)_x、InSe 等替代緩衝層，其效果如表三所示，相較於 CdS 緩衝層，效率大約會下降 1~3%，是

未來研究突破的重點之一。高阻值 ZnO 一般常用濺鍍製程，電阻率最好大於 10⁶ Ω-cm，可以減緩 CdS 覆蓋不完全所產生的問題，可有效抑制材料的寄生漏電流。穿透率則是越高越好，增加 CIGS 的進光量，ZnO 成長於玻璃上之穿透頻譜(圖二)，另一方面可對接續成長的透明導電薄膜之結晶性有正面輔助的功用。

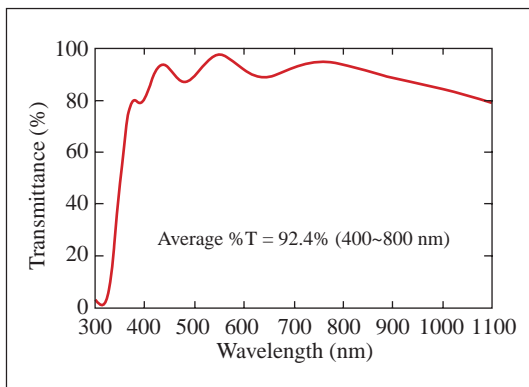
5. 透明導電層

元件結構最上層為透明導電薄膜，由於 ITO 之成本較高，透明導電氧化物薄膜較常被使用，大多採用硼、鋁、鎵、銦摻雜之 ZnO，其中又以鋁摻雜(俗稱 AZO)最受商業化歡迎，其同時具備高導電性、高溫穩定性、無毒性及成本低廉的優點。

透明導電薄膜在波長 350~1250 nm 必須具備高穿透度，以減低太陽光之吸收，為了提高穿透度，有時還會加入抗反射層，常使用的材料為 MgF_2 抗反射層，減少光在入射表面的反射損耗；此外，還需有良好的導電性質，減少電阻所造成的損失，以利電子的收集。AZO 一般使用真空濺鍍製程，優點在於容易控制製程、低溫成長、大面積化、易成長附著佳且品質良好的薄膜，如此可獲得具有較佳導電特性 ($\sim 4 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$) 且平均穿透度大於 90% 之透明導電薄膜 (圖三)。

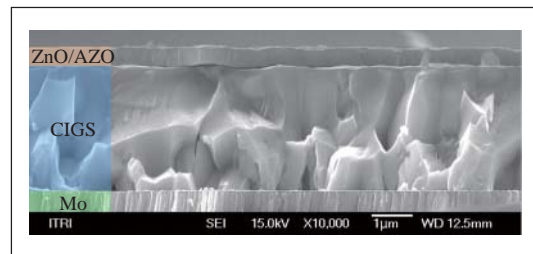


▲圖二 ZnO 薄膜成長於 SLG 基板之穿透度頻譜圖

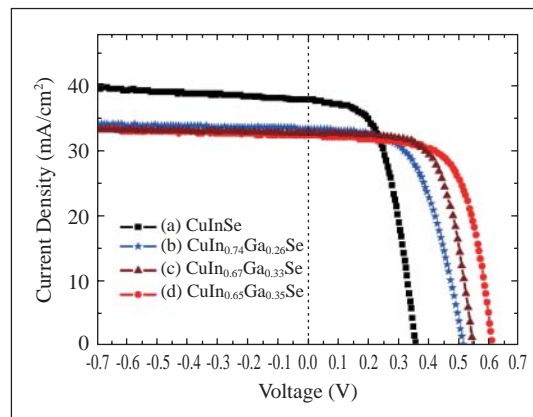


▲圖三 AZO 薄膜成長於 SLG 基板之穿透度頻譜圖

CIGS 電池元件完成剖面圖 (圖四)，CIGS 長晶除了孔隙少，減少漏電流之外，表面平整有助於後段製程，晶粒大小可達數微米，晶粒介面有緊密的介面，這些都足以影響元件好壞。另外，控制 CIGS 成分組成是很重要的關鍵，成分組成可以決定 CIGS 電池的效率高低。目前的技術來說，高效率的 CIGS 電池成分組成落在 $Ga/(In + Ga) = 0.25 \sim 0.4$ 、同時 $Cu/(In + Ga) = 0.8 \sim 0.9$ ，組成分布隨各家製程及設備有些許不同 (圖五)，隨著 Ga 含量提高，效率逐步提高至 13%，精準的成分控制以共蒸鍍製程較容易達成，也是共蒸鍍製程的優勢。反觀其他連續二階段製程進行後續的硒化過程時，容易出現材料控制的問題，吸收層的穩定



▲圖四 CIGS 太陽電池結構剖面圖



▲圖五 不同 Ga 含量之 CIGS 太陽電池 I-V 曲線

性及良率較容易受到影響，就現今技術而言，真空蒸鍍或真空濺鍍製程所得到的最佳模組效率大致相同，大約在 13~14% 左右。而一般市售模組效率大約可達 11% 左右，非真空製程製造的太陽電池由於材料純度較低，製程控制也較為困難，因此模組效率往往較低，且良率及大面積均勻性都仍待改善，若有明顯改善，高產率的非真空製程才有較大的發展空間。傳統上認為真空設備成本大幅提高，但是共蒸鍍製程由於只需要一階段製程，可省下硒化的設備成本，反觀其他二階段製程，在硒化階段所需要的成本頗高，再加上考量效率、穩定性及量率的前提下，共蒸鍍技術的整體成本有可能較低。

共蒸鍍 CIGS 太陽電池產業近況

提到產業必須由應用端來看，大致可以分為幾種不同的應用：

1. 太陽能電廠(Solar Farm)

市場需求量較大，基本上建置在較空曠的地區，最重要就是最低成本的需求，但有時會有較惡劣的環境，故需因地制宜，可能會有自潔、除污、耐磨、耐水、耐雪的需求，就目前而言，玻璃封裝 CIGS 的模組通過 IEC 等的 20 年認證並非難事，而 CIGS 未來成本預估有機會達到每瓦 0.5~1 美元，對於 CIGS 模組需求將有突破性的成長。

2. 屋頂獨立型 / 並聯網(Roof Top)

建置在有限的空間，因此同時需要高效率及低成本的需求，目前以高效率矽晶太陽電池為主，但是價格過高，因此一般安裝的意願較低，CIGS 模組是目前薄膜太

陽電池效率最高者，CIGS 數年後可望有 14% 的模組，有機會挑戰矽晶太陽電池屋頂的市場，除了傳統的玻璃基板外，CIGS 還擁有輕量化軟性基板可貼合於不同型式的屋頂，也有玻璃管模組可應用在平面屋頂上，相較於矽晶模組來說，具有更高的競爭力。

3. 建材一體太陽電池(BIPV)

利用封裝後之電池模組當作建材主體，可實際融入建材的一部分，減少搭建的成本，改善目前太陽電池大多使用在遮雨板、遮光罩、屋頂等小面積應用的情況，除了低成本的要求外，必須同時講究外觀藝術，CIGS 太陽電池呈現亮黑色，能讓大樓外觀呈現高貴質感，另外還可依照需求刻畫出不同的透光感，同時表面最好具有自潔、除污、耐磨、耐水、耐雪之功能，得以保持玻璃表面之高光穿透性，有助建材在長年使用之後可維持其高發電效能之功效。但是建材的角度或方向必須配合建築主體，因此發電效率通常不是最重要的因素。

4. 太空、攜帶式電池特殊應用

發展輕薄短小的太陽電池，CIGS 模組已有多家量產公司製作在軟性基材上，一般採用 Roll-to-Roll 製程，高產率可以大幅降低製程成本，且可以客製化模組，無論是消費性電子產品、太空應用或軍事用途的產品，都是 CIGS 主攻的項目。

上至太空科技、下至民間需求都可以看見龐大的應用市場，由技術面來看，CIGS 太陽電池幾乎能夠滿足所有應用端的需求，以下介紹目前已有量產規模的共蒸鍍 CIGS 大廠。

德國 Würth Solar 目前仍是共蒸鍍 CIGS 的領導者，量產模組大小為 60 cm × 120 cm，使用玻璃基板及 In-line 共蒸鍍製程，模組效率一般已經可以達到 11%，目前的產能約為 30 MW，另外試量產線模組效率已達到 13~14%，已接近多晶硅模組效率，其執行長 B. Dimmler 在 PV Taiwan 2009 上也宣稱兩年後讓 14% 的模組上市，無論是否能如期達成，總是留下許多期待。

德國 Q-cell 近期併購 Solibro AB，取得 CIGS 的門票，同樣使用玻璃基板及 In-line 共蒸鍍製程，急起直追 Würth Solar 的領先地位，目前模組效率大約 11% 左右，較好的模組可達 12%，宣稱 2009 年底完成 90 MW、2010 年達到 135 MW 的廠房建置。

美國 Global Solar 發展特點在於使用輕巧的軟性基板（較常使用不銹鋼基板），也是第一家軟性 CIGS 電池製造商，擁有最早的 Roll-to-Roll 製程專利，而其 CIGS 製造方式採用高產率的 Roll-to-Roll 製程，其相關介紹可見文獻[11]，值得一提的是，Global Solar 的表面金屬採用印刷方式進行，可以縮短製程時間，一整捲的不銹鋼面積約為長 700~1000 m × 寬 0.3 m，製程進行完畢之後，裁切為長 10 cm × 寬 21 cm 的小模組，進行最後量測後，還可以進行小模組效率排序，以達到效率的最佳化，目前最佳模組的效率已達到 11.7%，預計 2010 年的用電成本可降至每瓦 2.5 美元。

美國 Ascent Solar 發展特點在於使用輕巧的 PI 軟性基板及 Roll-to-Roll 製程，可以大幅降低成本，輕量化基板可以降低後續的系統運送及安裝的成本，可輕易的用人力搬運移動，最近小電池效率已達到 14.1%，目前量產小模組的效率已可達到 11.7%，單

一模組的輸出為 123 瓦，目前正在 Thornton, Colo 設置 30 MW 的產線，預計 2010 年進行量產。

德國 Solarion AG 也採用 PI 軟性基板製作 CIGS 太陽電池，製程類似於 Ascent Solar，自身擁有特殊的離子助鍍製程，輔助 CIGS 在低溫的晶體成長，最近小電池效率已經達到 13.4%。

台灣鍊德轉投資太陽海科技 (PV Next)，近期將試產首片 60 cm × 120 cm 規格的 CIGS 薄膜太陽能模組，實際模組效率仍未見相關數據。

共蒸鍍製程在實驗室的驗證下，證明其擁有高效率、高穩定性的潛力，目前各家的製造成本尚未完全透明，提升到量產規模可能在每瓦 0.5~2 美元，未來仍有大幅降低製造成本的空間，一旦大規模量產及提升轉換效率並進下，距離每瓦 1 美元以下的目標指日可待。

結語

台灣大部分的能源需仰賴進口，拓展綠色能源的使用確有其必要，但普及的速度將取決於價格，薄膜太陽電池雖然在成本上有極大的潛力，First Solar 替所有薄膜電池大廠打破了矽晶圓壟斷的障礙，只要成本夠低，取代矽晶圓已經不再困難重重，因此成本管控及提升模組效率是當務之急。目前 CIGS 在薄膜太陽電池中有最好的轉換效率，同時擁有高效率及低成本的優勢，依據歐洲 EPIA (European Photovoltaic Industry Association) 與美國 NREL (National Renewable Energy Laboratory) 所提出的發展藍圖都設定在 2015 年 CIGS 薄膜太陽電池模組效率達 14~15%，CIGS 太陽電池模組生產成本在

數年內有機會降至每瓦 1 美元，甚至挑戰 First Solar 的成本。CIGS 薄膜太陽電池模組最佳轉換效率達 14%，接近多晶矽太陽電池效率，為所有薄膜太陽電池最高者，但是目前效率還可以更高、更穩定，成本也不夠低，有待各界努力突破。最近，德國太陽能巨人 Q-cell 買下 Solibro 的所有股權，正式大幅擴大 CIGS 產能，看來 CIGS 離浮出檯面的時間越來越近；另外有數家 CIGS 大廠紛紛宣稱 2013 年上看 1 GW，而國內國發基金決定參與太陽海科技現金增資案，再次讓 CIGS 的未來備受矚目。

工研院不論在真空共蒸鍍、真空濺鍍、非真空印刷製程都有不錯的成果，目前積極進行 CIGS 薄膜太陽電池技術專利布局，以建立自主 CIGS 薄膜太陽電池製作技術與自有專利，防止國際大廠的壟斷，即將與業界合作夥伴共同開發大面積高效率 CIGS 太陽電池技術，帶動太陽電池產業及早邁入低成本高效率的太陽電池時代，有責任也有義務推動國內 CIGS 薄膜太陽電池產業的發展。☒

參考文獻

1. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa and W. Warta, "Solar Cell Efficiency Tables", Prog. Photovolt: Res. Appl. 17, 320 (2009)
2. I. Repins, M. A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C. L. Perkins, B. To and R. Noufi, "19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ solar cell with 81.2% fill factor", Prog. Photovolt: Res. Appl. 16, 235 (2008)
3. X Wu, JC Keane, RG Dhere, C DeHart, A Duda, TA Gessert, S Asher, DH Levi, Sheldon P, "16.5%-efficient CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cell", Conf. Proceedings, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 22-26, 995 (2001)
4. B. Yan, G. Yue, S. Guha "Status of nc-Si:H Solar Cells at United Solar and Roadmap for Manufacturing a-Si:H and nc-Si:H Based Solar Panels" in "Amorphous and Polycrystalline Thin-Film Silicon Science and Technology 2007", edited by V. Chu, S. Miyazaki, A. Nathan, J. Yang, H-W. Zan Materials Research Society Symposium Proceeding, 989 (2007)
5. Y. Tanaka, N. Akema, T. Morishita, D. Okumura and K. Kushiya, "Improvement of Voc upward of 600 mV/cell with CIGS-based absorber prepared by Selenization/Sulfurization", 17th EC Photovoltaic Solar Energy Conference, 989 (2001)
6. D. Cunningham, K. Davies, L. Grammond, E. Mopas, N. O' Connor, M. Rubcich, M. Sadeghi, D. Skinner and T. Trumbly, "Large area ApolloTM module performance and reliability", 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 13 (2000)
7. PA. Basore, "Pilot production of thin-film crystalline silicon on glass modules" 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 49 (2002)
8. T.-P. Hsieh and Y. Huang "Coevaporation deposition of CuInGaSe₂ - Introduction", 工業材料 264, 71 (2008)
9. C.-Y. Chiu, Y.-C. Liao, M.-J. Young, M.-W. Huang and Y.-L. Lo "Non-vacuum process for CIGS solar cell", 工業材料 264, 79 (2008)
10. H.-H. Chang and Y. Huang "Progress in PV industry - R&D and mass production of CIGS thin film solar cells in Japan", 工業材料 264, 89 (2008)
11. C.-C. Chuang "Introduction and development of the flexible CIGS thin film solar cell technology", 工業材料 268, 82 (2009)
12. M.-C. Wang "The status of chemical compound thin film solar cell industry", 工業材料 268, 64 (2009)
13. L.-C. Yang, K.-C. Yeh, S.-W. Liao, C.-W. Liu "I-III-Vi", 工業材料 268, 91 (2009)