

# CIGS 薄膜電池產業技術與挑戰

## CIGS Technologies & Challenges in Taiwan

林華愷、藍崇文

Hua-Kai Lin, Chung-Wen Lan

隨著全球暖化問題的日益嚴重，再生能源這幾年廣受重視，特別是太陽光電能，但矽晶太陽能的成本要遠低於 \$1/Wp 仍十分遙遠。未來要快速達到市網同價 (grid parity) 的目標，材料用量小的低成本薄膜電池自然被賦予很大的期望，而其中，銅銦鎵硒 (CIGS) 化合物電池更因為已達超過 20% 的光電轉化效率，幾乎是被公認有機會超越矽晶成為太陽光發電主流的明日之星。本文就這個 CIGS 薄膜電池的產業技術與挑戰做個簡單的介紹。

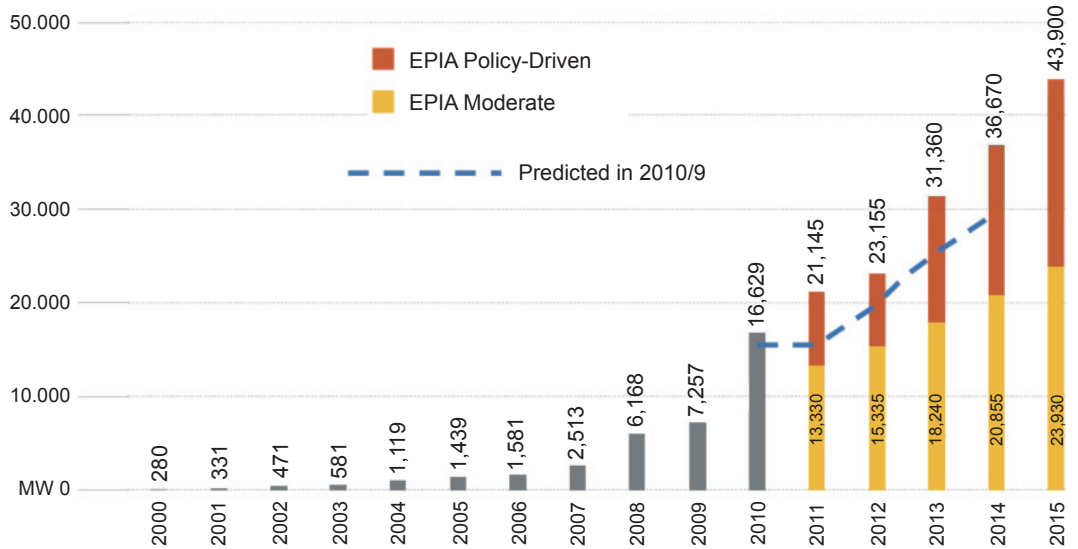
According to the global warming, renewable energy gets great attention in recent years, especially solar energy. But it still has a long way to go with the cost of silicon based solar cell to be lower than \$1/Wp. To reach the target of grid parity, thin-film solar cell which has small amount of material has been given high expectations. Copper indium gallium selenide (CIGS) compound solar cell is almost recognized the opportunity to go beyond silicon because its efficiency is higher than 20%. In this article, the challenges and technology of CIGS thin film solar cell are briefly introduced.

### 一、太陽能介紹

近年來由於能源短缺，原油開發亦受到限制，許多替代能源皆極力被開發中，像是風力發電、水力發電等，而其中的太陽能，更是人類可利用的最豐富資源。根據統計，太陽在過去的十一億年中，只消耗了本身能量的 2%，它給地球照射 10 分鐘的能量，就足夠全世界使用一年之久。太陽能又分太陽熱能與太陽光電能，而太陽光電能利用電池模板，直接把太陽光變成電，更被視為最便利的能源，可以是小計算機的發電，可以是屋頂設置的家庭用電，乃至於大型電廠高達數十 MWp 的發電，十分便利。更重要的是，整個技術建構在現在的產業基礎之上，特別是台灣，更有條件發展太陽光電產業。

全球目前有超過五十個國家都支持且投入太陽光電產業，圖 1 即為近十年太陽光電的總產能圖<sup>(1)</sup>，可以看出全球光電產能正在逐步上升中，而且總產能會超出 2010 年預期的結果，根據 European Photovoltaic Industry Association (EPIA) 的報導指出，2010 年太陽光電總產能已達到 16 GW。由於各國對此能源的開發與重視，研發經費不斷增加，使得太陽能電池價格正在逐年下降，在近兩年內已經下降了將近 40%，預估在 2020 年更可能降低 60%。當然太陽光電現在成本仍然高，需要靠各國的補貼。過去幾年，透過購電補貼 (feed-in-tariff, FIT)，太陽光電一度電可以三到五倍的電價賣給電力公司，因此，特別在歐洲，設置太陽光發電變成一種投資的商品，誘發大規模的發展。然而，近幾

圖 1. 近幾年來光電設置的發展與 EPIA 的預測<sup>(1)</sup>。

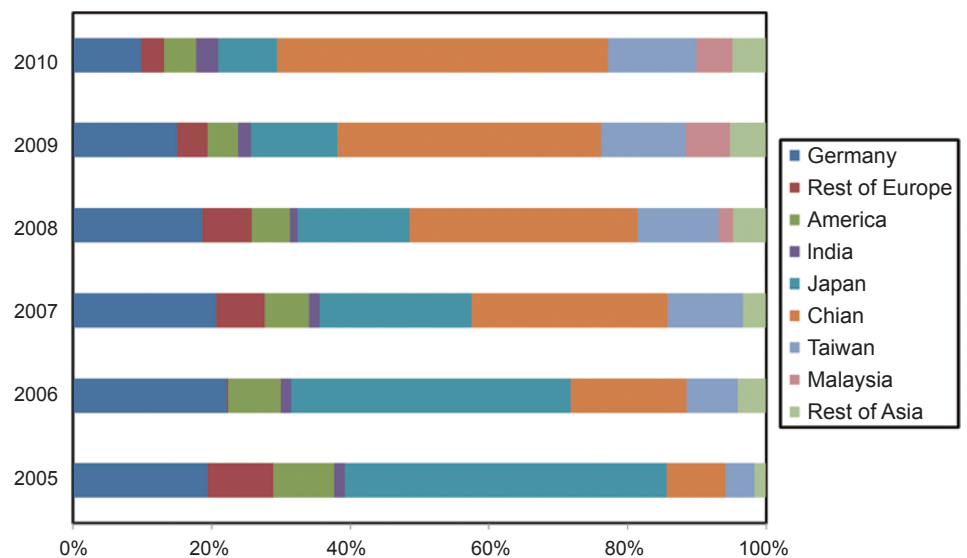


年隨著金融危機與許多政府的赤字預算，補貼逐漸減少，未來要支撐這個產業，還是需要將發電成本降到與市電同價 (grid parity)，而市電同價在這一兩年已漸漸發生，電價高、日照強的國家，例如義大利，便十分有機會了。當然，成本的終極目標是需要在發電端的成本與石化能源相當，但那可能仍十分遙遠。然而從圖 2 的各國產能比較圖可看出<sup>(2)</sup>，中國和台灣佔全世界的比例愈來愈重，也就是各國的發展將逐步分散，而且產業有向亞洲加速移動的趨勢，對於台灣來說是件好事。

太陽能電池的種類主要可以分為第一代矽晶

(Si)，包括單晶矽、多晶矽和非晶矽；第二代薄膜，種類可分為碲化鎘 (CdTe)、砷化鎵 (GaAs)、銅銦鎵硒 (CIGS) 化合物；及第三代的有機太陽能電池、染料敏化太陽能電池、高分子太陽能電池和奈米結晶太陽能電池等。在一般產業化的光電模組效率中，結晶矽的轉換效率約為 17.5%，而薄膜類以 CIGS 的 12% 左右為最佳。雖然目前市場主流仍以矽晶為主，但矽晶的產業價值鏈長，要達到遠低於 \$1/W<sub>p</sub> 的成本目標十分困難。而薄膜類使用材料少，產業價值鏈短，成本下降的機會大。如圖 3 所示<sup>(3)</sup>，材料成本佔總模組成本的比例，由矽晶

圖 2. 由 ITRI 統計各國產能逐年比例圖<sup>(2)</sup>。



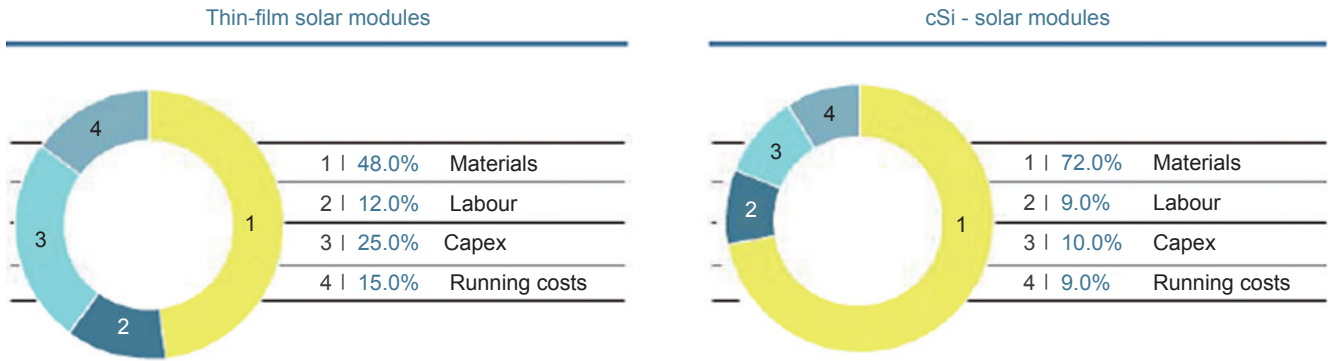


圖 3. D. Manz 分析的薄膜和矽晶模組成本比例圖<sup>(3)</sup>。

的 72% 下降至薄膜的 50%，每瓦的成本亦可降至 0.6 €。

再者，光電系統的總成本，包含電池、模組、安裝等，亦可由圖 4 的各類太陽能電池逐年的預測看出，CIGS 類的總成本下降率比矽晶類的快，尤其是第三代的薄膜類太陽能電池，有著高效率、可丟棄式及無毒的材料等優點，是目前各國重視且欲發展的。

而薄膜裡面又以 CIGS 最有勝出的機會，目前最高轉換效率已達 20.3% (德國 ZSW 實驗室締造)。CIGS 具有極佳的太陽光的吸收能力，隨著 Ga 組成的變化 (1.02–1.68 eV) 更可以涵蓋大部分太陽光可利用的光譜，在 1–2 微米的厚度下足以吸收大部分的陽光。此外，低製造成本、耐用性佳、穩定性良好都是使用 CIGS 薄膜的特點，即使在軟性基板上最佳的效率也可達到 14%。再者，

CIGS 的產業價值鏈相較於矽晶來得短，如圖 5 所示，也是看好 CIGS 發展的原因。許多國際知名公司如 IBM、Honda 等皆相繼投入此領域，2007 年 Showa Shell Sekiyu、Honda Soltec、Würth Solar 也相繼開始商業化量產，大約 15–27 MW/年的產能<sup>(4)</sup>，台灣亦於 2010 年 4 月成立 CIGS 產業聯盟，目標為發展出一套效率為 12% 的量產製程技術，由此可知 CIGS 領域愈來愈受到重視。

CIGS 重要的技術包括製程 (process)、設備 (equipments) 與材料 (materials)，如何針對重點個別擊破，乃是目前這個市場的重大關鍵。就台灣整體的策略來看，目前矽晶很難作出很大的差異化，而且矽薄膜的效率亦無法再有很大的突破，此外，和中國相比，台灣的弱勢仍然在垂直整合部分，所以 CIGS 的潛力和低成本是我們的機會，亦是極大的挑戰。

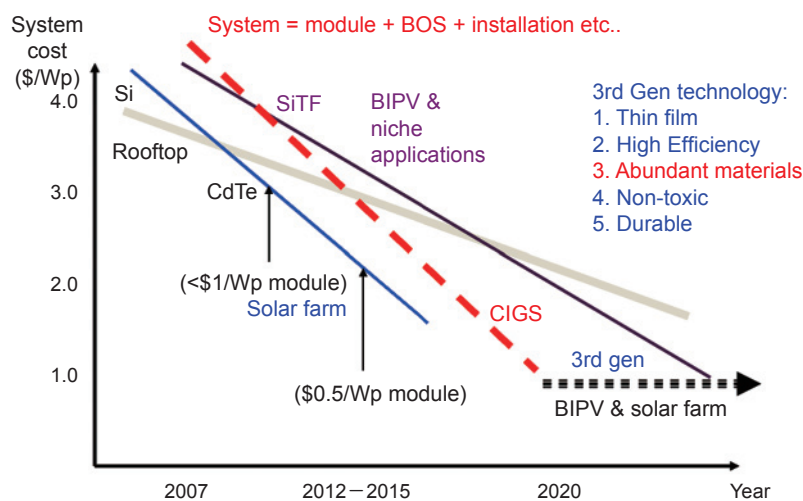


圖 4. 各式太陽能電池系統成本逐年預測圖<sup>(4)</sup>。

### < CIGS 產業價值鏈 >

Feedstock  
Cu/In/Se/Ga



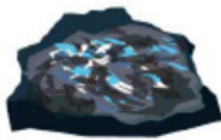
Module



System



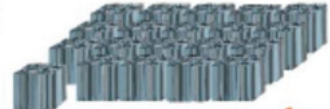
### < Silicon 產業價值鏈 >



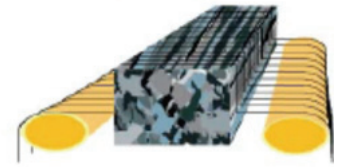
Raw material (silicon)



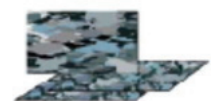
Ingot



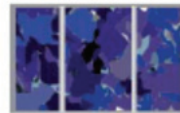
Ingot squaring



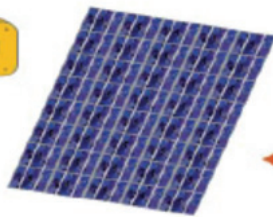
Wafer slicing



Water



Cell



Module



System

圖 5. 產業價值鏈的比較圖。

## 二、CIGS 太陽能電池介紹

第一個 CIS 電池於 1974 年貝爾實驗室發表至今已超過三十年<sup>(4)</sup>，電池的主要結構由 *p*-type 的 CIGS 層和 *n*-type 的 CdS buffer 層，其上下分別為背電極與正面的 window 電極層，如圖 6 所示。CIGS 是一個四元化合物，再加上每一層間的電性匹配及連續性，都已有不少相關的研究。基板的材質主要是以鈉玻璃 (sodalime glass) 為主，其他的可撓式塑膠基板或是不鏽鋼等，在便利性及實用性上比起鈉玻璃都來得好，因此這部分都是日後可研究且發展的課題。在基板上方的電極部分，Mo 是最常用的一種金屬，之前的研究發現 Mo 在 CIGS

上所形成的接觸電阻接近  $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ <sup>(5)</sup>，這使得之後大部分皆使用 Mo 當作背電極。

緊鄰著 Mo 上面的一層即為太陽能電池中最重要吸收層，這一層也有許多種製備的方式，大致上可以分為真空製程和非真空製程。在真空製程方面，共蒸鍍 (co-evaporation) 方法是目前最成功，且在轉換效率上也是最高的，此法是經由 Cu、In、Ga 和 Se 的粉末，高溫加熱使其產生蒸氣且沉積在基板上，藉由此方法可以有效調控其化學成分比例。共蒸鍍為一種連續製程，較容易控制組成，但相對也比較耗電。現在 Mans 與 Wurtz/ZSW 合作要提供的整線 (turnkey) 中，可看出 120 MWp 的製程中，卻要有 12 MW 的用電設施，耗電量為共

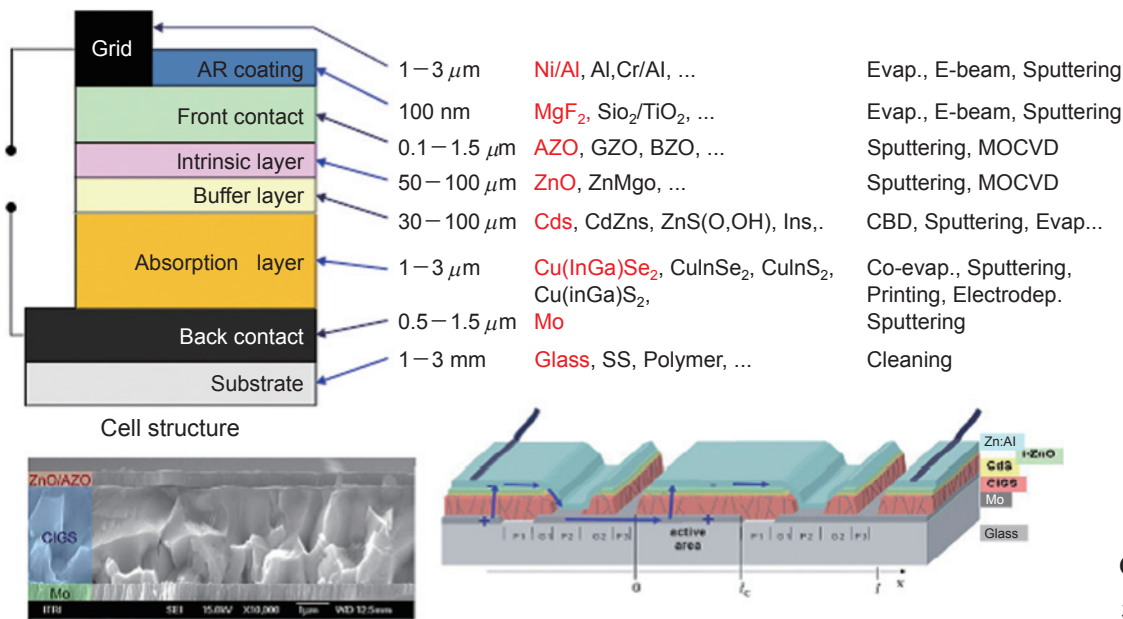


圖 6. CIGS 電池及模組結構圖。

蒸鍍法量產的最大問題。

儘管真空製程所製作出的太陽能電池元件轉換效率仍然較高，但是它所需要的儀器成本相對來說也較昂貴，再加上真空設備，如濺鍍，會使得材料使用率降低，大約只達 30%。相反地，非真空製程的優點卻是材料使用率高與設備便宜，因此，極具降低成本的潛力。非真空製程首先製備一層前驅物於基板上，接著在惰性氣體或是要參與反應的氣體中進行熱處理退火，使其反應而形成硒化物，此法可從圖 7 之 CIS 相圖得知<sup>(6)</sup>，這類的固態硒化需要升溫快速的設備以及均勻性，故硒化程序是一部很重要且困難的步驟。

前驅物的製備大致上可分為電鍍法、噴灑法及塗佈法。電化學電鍍法是一個簡單的技術，需要一個工作電極、對電極及參考電極。另一類 CdTe 太陽能電池也同樣使用過類似的方法，可以個別電鍍每層元素或是直接鍍上所有元素。電鍍法主要困難的地方在於 CIGS 是一種四元化合物，四種元素的標準電位差異性很大，另外每個元素的電負度差異及各種氧化態都是此法可能會遇到的問題，所以需要配置特別的前驅物濃度和沉積電壓，目前在 CIS 上目前利用電鍍 Cu、In、Se 的 1:1:2 比例，其光電轉換效率可達 11.4%<sup>(7)</sup>。

噴灑法又可稱為噴霧熱解法，使用 CuCl、InCl<sub>3</sub>、GaCl<sub>3</sub> 三種化合物<sup>(8)</sup> 和一種有機物當作前驅

物，隨後於 400 °C 下進行熱解噴灑在 100 cm<sup>2</sup> 的基板上，可以沉積出 10–50 nm 的粒子，大部分還是使用 H<sub>2</sub>S 進行硒化的程序，最高的光電轉換效率大約為 4%，故轉換效率仍然是噴塗法的最大問題。

最後一種是塗佈法，使用一層粒子油墨塗佈在基板上，可使效率達 12%<sup>(9)</sup>。不過此方法用在 CIGS 上仍然有很多困難處，最難克服的就是需要找到一個適合的助熔劑幫助其粒子間的互熔及燒

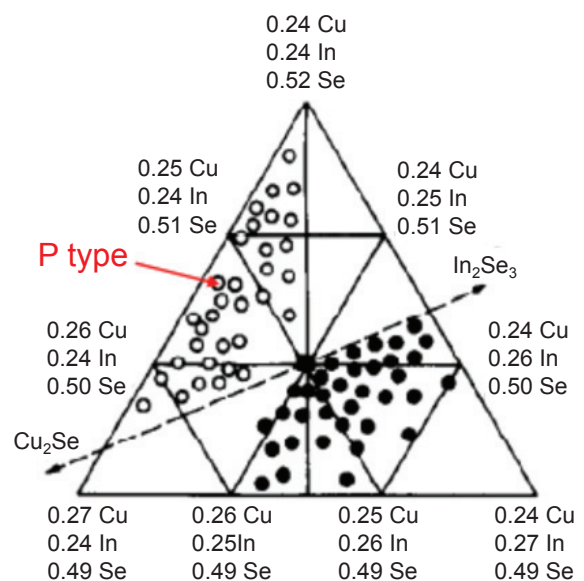


圖 7. CIS 相圖<sup>(6)</sup>。

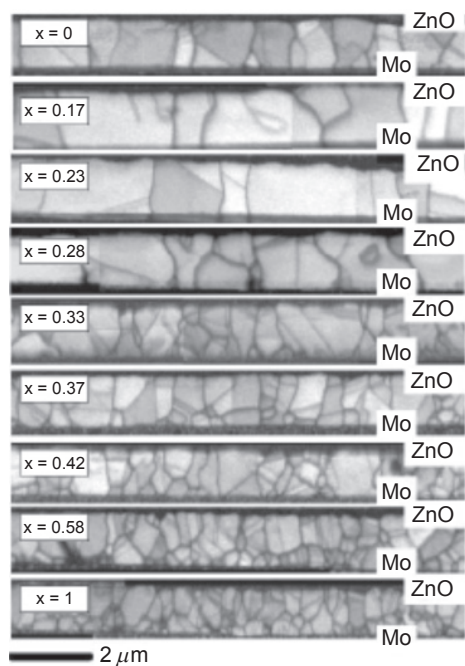


圖 8.  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  電池隨著 Ga 濃度 ( $x$ ) 之 EBSD map<sup>(15)</sup>。

結。在前驅物部分也有著許多不同的選擇，包括 Cu、In 粉末，CuIn 合金、 $\text{Cu}_2\text{Se}$ 、 $\text{In}_2\text{Se}_3$ ，或是氧化物等<sup>(10-12)</sup>，其效率亦可達 13%，然而在製備奈米粒子前驅物時，對於粒子間如何使它們不致於團聚，也就是找到一個適合的分散劑幫助粒子分散，且不會影響長晶的過程，以目前找到的有機分散劑來看仍然會有殘碳的現象<sup>(13)</sup>，所以粒子間若是團聚會導致長出的膜很粗糙且十分不均勻。因此，最佳的選擇應以合金為主。只是目前所有的非真空製程，用無毒的硒做反應長晶，都遇到很大的瓶頸，最高效率仍是瑞士聯邦理工的 Tiwari 教授在 2003 年得到的<sup>(14)</sup>，但之後無毒硒化一直未有大的進展，直到最近 Tiwari 教授才報導新的結果，可以達到 7.9% 的目標。另外，Tiwari 教授也發現，鈉加在最上層所得到的效果最好。

非真空法還有一種溶液法最近幾年也有大的進展，IBM 的科學家利用聯胺溶解硒化物，直接塗佈在鍍鉛基板，再經過簡單的加熱，即可得到好的吸收層，元件效率可達 13%。而最近利用相同的方式，將銮改成鋅，將鎘改成錫，即所謂的 CZTS，也達到 9.6% 的效率。最近台達電也與

IBM 合作，希望將製程商業化，只是聯胺有爆炸的危險，未來要改為安全的溶液，仍有一條遙遠的路。

然而，這些皆是批次程序，要控制組成，特別是鎘的分布，十分不容易。由圖 8 的 Ga 組成的 EBSD 圖也可看出<sup>(15)</sup>，當  $\text{Ga}/(\text{Ga} + \text{In}) = 0.23$  時的晶粒是最大的，由此可知 Ga 的分布和組成必須要能夠有效地控制，如此才能掌握晶粒的大小。

此外，鈉與高的硒化反應溫度對長晶與電性相當有幫助。由圖 9 可知<sup>(16)</sup>，鈉可以適時抓住硒，使硒化更容易進行，且提高其導電性，然而，在實務上卻是面臨兩難的問題。的確，現有的製程多半採用鈉玻璃來提供鈉源，但鈉玻璃的軟化點低，使得製程溫度必須維持在  $550^\circ\text{C}$  以下，過高的溫度會導致變形與破片。近期 Solar Frontier 與 Avancis 都規畫採用低鈉玻璃，且利用外加鈉的方式，例如鍍 Mo 時用摻鈉的 Mo 靶，以期可以提高溫度，得到好的長晶與效率。此外，由於要得到 *p*-type 的 CIGS 層，硒過量是必要的。只是硒或  $\text{H}_2\text{Se}$  的腐蝕性高，要選用耐用的材質，對設備上的考驗不小。

台灣新能公司採用硒蒸氣做硒化，而台積電與綠陽公司都採用  $\text{H}_2\text{Se}$  做硒化，各有各的優缺點。硒蒸氣硒化沒有毒性的考量，但硒化爐的設計相當不容易，因為必須維持均溫與均勻的硒氣氛。不過一旦製程技術克服，一到兩分鐘一片的產率十分有大量生產的優勢。而  $\text{H}_2\text{Se}$  氣體有劇毒與高腐蝕性，反應器材質多半用石英，硒化時間得多達數小時，如果反應器太小，整個的產能並不能很高。只

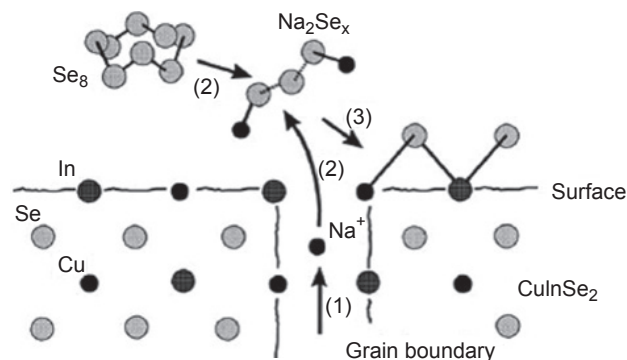


圖 9. 鈉在長晶時影響示意圖<sup>(16)</sup>。

是大型反應器要用到石英的材質，並不是很容易。最近 Solar Frontier 有比較大的突破，找到新的反應器襯底材料，反應器的直徑已可超過一米，可以一批超過 100 片。

在吸收層 CIGS 上方的則為一層緩衝層，一般常用的是硫化鎘 (CdS)，其厚度大約為 50 nm，此層的目的主要是讓電池結構內形成 PN 接面，扮演著 *n-type* 的角色，並且能保護吸收層避免其受到窗口層濺鍍時的影響。一般來說，此層的能帶介於 2.0–3.6 eV 之間，這樣的能帶使其能階可以和上下兩層匹配，並且光學性質上是低吸光的。此層最常用的製備方法即為化學水浴沉積法 (CBD)<sup>(17)</sup>，也是個最低成本、可大面積化的製備方式，比起其他如物理氣相沉積 (PVD)，CBD 製作出來的元件仍然擁有較高的效率<sup>(18)</sup>。但是，CdS/CBD 法的缺點就是它會產生大量的廢液，且 Cd 的毒性仍然是個疑慮。

基於環境保護的考量，近來有許多研究團隊致力於開發無鎘的緩衝層，最常見的就是 ZnS/CBD 製程<sup>(19)</sup>，效率可達 18.1%，他們更說明了 ZnS 比 CdS 有著更大的能帶，可以有效增加在短波長的量子效率。在大面積上 Showa Shell 更在 100 cm<sup>2</sup> 上發展了 14%–15% 的 ZnS/CBD 太陽能電池，因此開發無鎘緩衝層材料及廢液較少的製程技術，如 ALD、MOCVD 等，在 CIGS 太陽能電池產業化中也是一個不可或缺的步驟。目前 CdS 仍然最被採用且是最佳的緩衝層材料。其實，近幾年也有不少進展是用乾式法製做緩衝層，例如 Miezole 的 15.7% 面板，依照 NREL 著名學者 Dr. Noufi 透露，便是以濺鍍的方式製作。

在緩衝層上方則是一層窗口層及正面電極，這部分有兩個條件需要具備，第一是需要有足夠的穿透度使光能透過此層進入主要的吸收層，第二則是要有夠大的導電度使光致電流能有效地流通至外電路。窗口層大多數人使用的材料為 intrinsic-ZnO<sup>(20)</sup>，這層主要的目的大致上可以推論於防止並聯漏電路的產生，以及抑止缺陷再結合中心的形成，透過此層的加入可以使開環電壓增加 20–40 mV 左右。在窗口層上方則為透明導電氧化層，大致上而言最好材料為 ITO (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn)。儘管 ITO 中的 In 價格由於存量的問題波動很大，但根據 Nanomarkets 的觀察，在 2015 年前 ITO 還是不會被取代的<sup>(21)</sup>。

由上述的介紹，我們可以將 CIGS 元件製程流程圖，利用圖 10 表示<sup>(22)</sup>。最大的重點就是在硒化長晶步驟，目前還沒有統一且最具效率的製程，如此可知儘管 CIGS 不是最新的技術，早在 1977 年即有此薄膜型的電池出現，但是目前此技術還沒有收斂的現象，因此還需要有進一步突破性且穩定的製程。

### 三、技術的發展與挑戰

光電產業要能夠蓬勃發展，還是需要各國政府的補助與支持，在 2006 年全球的產能為 1.6 GWp，接著的年成長率逐年增加，到了 2010 年已經超過了 16 GWp，預估 2013 年能夠達到 28.3 GWp<sup>(23)</sup>，特別是在華人國家如中國、台灣等，於 2010 年積極投入這個市場，已經佔有全球 60% 以上的市佔率。儘管結晶矽目前仍然佔了大部分的

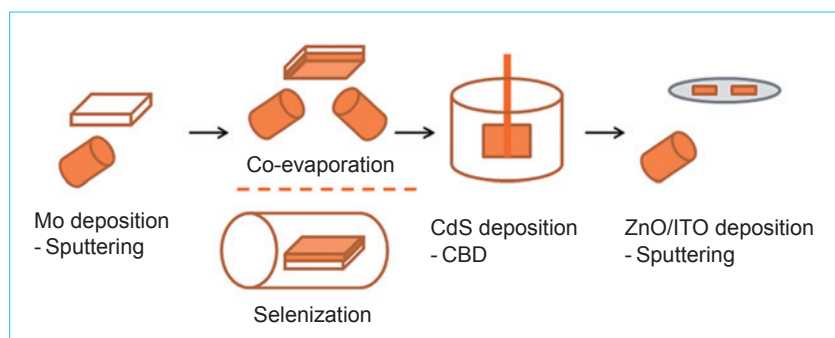


圖 10. CIGS 製程流程圖。

產能，但薄膜太陽能電池所佔的比例有逐年上升的趨勢，從 2006 年的 6.3%，到 2009 年的 20%，預估到達 2013 年薄膜太陽能電池佔有的比例有機會可超過 30%，其市佔率的年成長率比起結晶矽更是高出了 10%，可以看出低成本，效率高的薄膜太陽能電池正在起飛當中。更進一步分析，儘管 CdTe 和 a-Si 在這個領域還是市場的主流，有毒的 Cd 以及效率不高的 a-Si 使得這兩種太陽能電池逐漸失去往前的動力及競爭力，換言之，CIGS 的高效率、低成本及長的穩定期，將會使它在未來幾年增加市場的佔有率，就連主流在 CdTe 的 First Solar，也開始準備投入研發人力及設備於 CIGS 太陽能電池，由此可知 CIGS 在薄膜太陽能電池的影響力及競爭力。國內目前有幾家公司都積極投入此塊領域，如圖 11 所示，模組面積都能達到 1.5 平方公尺，並且效率也都能超過 10%，台灣的 CIGS 產業價值鏈正在產生當中。

以世界各國的 CIGS 市場來分析，歐洲各國如德國、西班牙，美洲的美國以及亞洲的日本、韓國，都有許多大公司已經開始投入這塊領域，各公司大致上的差別在於 CIGS 吸收層製備的不同。日本的 Showa Shell 所採用的是濺鍍的方式，並且使用無毒的 ZnS 緩衝層，每年至少已有 80-100 MW 的產能，預計將於今年建造出 1 GW 的產能。另一家日本公司 Honda 亦利用濺鍍的方式，並且使用

很特別的 InS 緩衝層，也可達到 13.9% 的效率，每年 30 MW 對於 CIGS 的貢獻亦不可忽視。韓國的 LG、Samsung 等大公司也開始發展這方面的研發人才，不論是濺鍍或是共蒸鍍法，都顯示他們對此領域的興趣及信心。德國的公司如 Wurth Solar 則是第一家製造出量產 CIGS 太陽能電池的公司，他們所使用的方式為共蒸鍍法，在 2008 年的效率為 11%，並於 2010 決定與 Mans 技術合作。另一家 Q-Cell 的子公司 Solibro，以同樣的共蒸鍍法，在模組效率 10.5% 的情況下，2010 年的產能亦可至 135 MW。美國的 Nanosolar、IBM 等則是採用油墨塗佈的方式，但卻未有大的進展。Solyndra 於 2009 年有的 110 MW 產能，卻因成本過高關掉一些產線。

整體來說，世界上有超過二十家的公司正在量產，大面積的模組效率最高可達 15.7%，不僅需要繼續將效率提高，也要能夠降低成本，CIGS 期許在 2013 年能夠降至每瓦 1.14 美元。但這個目標其實還離矽晶很遠，因為今年大陸的常州天合已經接近 \$1/Wp 的目標。再者，如果 CIGS 未能達 14% 的矽晶模組效率的門檻，要攻佔屋頂市場並不容易，重量比較重，效率比較低，BOS 與安裝成本都來得高，沒有遠低於 \$1/Wp 的成本，要與矽晶競爭並不容易。而效率未能超越 CdTe 的 11%，則成本得低於 \$0.7/Wp (現在 First Solar 的成本值)，

	PV Next (0.103bn NT)	Sunshine PV (1bn NT)	AxunTek Solar (0.625 bn NT)	Jenn Feng (0.55 bn NT)
Technology	Co-evaporation	Sputtering	Sputtering	Nano-particle Printing
Size	60 cm × 120 cm	110 cm × 140 cm	63 cm × 124.5 cm	110 cm × 140 cm
Capacity	> 25 MW	30MW	30 MW	30MW
IP	None	None	None	None
Equipments	Self assembly	Centrotherm turnkey	Self assembly	Self assembly
Features	Based on OLED experience for evaporation line source	The first 5.5G turnkey line in the world	Integration of sputtering and co-evaporation	RTP/H <sub>2</sub> Se selenization
Schedule	2009 Q4	2009 Q3 started, Q4 target 8%	2009 Q4	2009 Q4
Efficiency	10% (30 cm × 30 cm)	> 10% (110 cm × 140 cm)	> 10% (60 cm × 120 cm)	NA

圖 11. 台灣主要 CIGS 公司技術表。

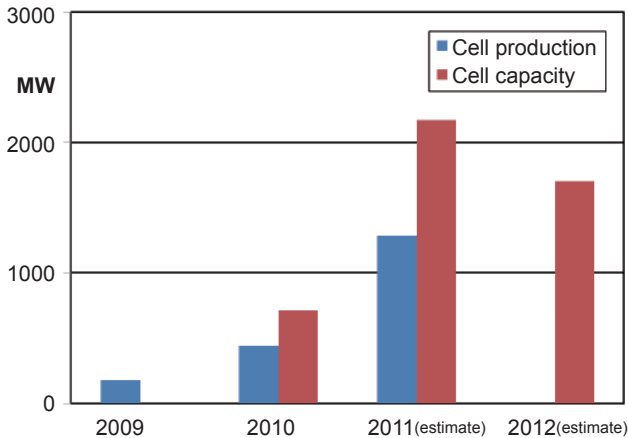


圖 12. 由 Photon 和 Greentech 統計之 2009–2011 年 CIGS 產能圖<sup>(24)</sup>。

否則也難攻佔現在 CdTe 在電廠的市場。因此，現在 11% 的 CIGS 處在一個很尷尬的時期，如果沒有供不應求的市場，產能無法增加，成本無法下降，那的確存在技術發展的危機。況且，CIGS 尚未有統一製程、不同的吸收層製程技術、不同的緩衝層材料等，且尚未有成熟的設備與材料提供，所以要降低成本仍需要漫長的路。Solar Frontier 今年要建置 1 GWp 的量產線，其成功與否，將會是 CIGS 發展成敗的一個重要指標。不過，Solar Frontier 計畫到 2014 年才達到 14% 的目標，的確也是很大的隱憂。Photon 最新的統計如圖 12 所示<sup>(24)</sup>，亦可看出 2010 年 CIGS 產能已有 144% 的年成長率，預估 2011 年更會有 193% 的年成長率。

#### 四、台灣的競爭力

綜觀世界各國對於太陽能的投入，台灣方面也必須有所行動。有鑒於 2010 年台灣雖然在結晶矽太陽能電池的產值約兩千億台幣，占全世界的第 2 位，但是因為國內的大廠對於太陽能材料以及製程的掌握力不足，光是矽晶的取得就必須仰賴進口，成本波動大，加上下游電池廠對於價格的壓縮，導致其發展規模受到了限制，材料和設備的產值不到 10%，儘管毛利多但仍低於大陸的垂直整合廠，未來要在矽晶與大陸競爭，的確不是很容易。因此，積極的發展下一代薄膜的 CIGS 薄膜電池，或許更

有勝出的機會。

我們在 2010 年 4 月所成立的台灣 CIGS 產業聯盟，期待能結合產官學各個研發資源，運用政府的補助工具，達成各階段的任務，期待 2012 年能夠推出轉換效率達 12% 的整線技術 (turn-key)。目前的成員包括了台積電、友達、旺能、新能、均豪、志聖、光洋材料等數家上中下游公司，希望對材料、製程及系統都能有效的整合。最近，綠陽光電已可量產的 CIGS 太陽能模組，效率達 10% 以上，新能光電的  $1.1 \times 1.4 \text{ m}^2$  的大面積模組轉換效率亦可超過 10%，但設備國產化仍是一大努力的重點。總之，技術競爭本來就是成本下降的必經過程。CIGS 發展超過二十年，是否有機會可以開花結果，特別是在台灣，的確是大家很期待的事。

#### 參考文獻

1. EPIA, *Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2014* (2011).
2. ITRI/IEK, Photon International (2009).
3. D. Manz, PV Taiwan (2010).
4. S. Wagner, J. L. Shay, P. Migliora, and H. M. Kasper, *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 434 (1974).
5. R. J. Matson, O. Jamjoum, A. D. Buonaquisti, P. E. Russell, L. L. Kazmerski, P. Sheldon, and R. K. Ahrenkiel, *Solar Cells*, **11**, 301 (1984).
6. H. Neumann and R. D. Tomlinson, *Solar Cells*, **28**, 301 (1990).
7. S. Jost, F. Hergert, R. Hock, J. Schulze, A. Kirbs, T. Voss, and M. Purwins, *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, **91**, 1669 (2007).
8. B. Pamplin and R. S. Feigelson, *Thin Solid Films*, **60**, 141 (1979).
9. H. Matsumoto, K. Kuribayashi, H. Uda, Y. Komatsu, A. Nakano, and S. Ikegami, *Solar Cells*, **11**, 367 (1984).
10. C. Eberspacher, C. Fredric, K. Pauls, and J. Serra, *Thin Solid Films*, **387**, 18 (2001).
11. A. Gupta, S. Shirakata, and S. Isomura, *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, **32**, 137 (1994).
12. V. K. Kapur, A. Bansal, P. Le, and O. I. Asensio, *Thin Solid Films*, **431**, 53 (2003).
13. C. Eberspacher, K. Pauls, and J. Serra, "Non-vacuum processing of CIGS solar cells", *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002*, 684-687 (2002).
14. M. Kaelin, D. Rudmann, and A. N. Tiwari, *Solar Energy*, **77**, 749 (2004).
15. D. Abou-Ras, R. Caballero, C. A. Kaufmann, M. Nichterwitz, K. Sakurai, S. Schorr, T. Unold, and H. W. Schock, *Phys. Status Solid-R*, **2**, 135 (2008).

16. D. Braunger, D. Hariskos, G. Bilger, U. Rau, and H. W. Schock, *Thin Solid Films*, **361**, 161 (2000).
17. R. Ortigaborges and D. Lincot, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 3464 (1993).
18. M. Rusu, T. Glatzel, A. Neisser, C. A. Kaufmann, S. Sadewasser, and M. C. Lux-Steiner, *Appl. Phys. Lett.*, 88 (2006).
19. T. Nakada and M. Mizutani, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 - Lett.*, **41**, L165 (2002).
20. U. Rau and M. Schmidt, *Thin Solid Films*, **387**, 141 (2001).
21. <http://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=8063>, (2009).
22. B.D.s. presentation, PV Taiwan, (2009).
23. CIGS Thin Film Solar Cell Technology Trend and Market Forecast (2006–2013), Displaybank Co., (2009).
24. Photon, (April 2011).



林華愷先生現為國立台灣大學化學工程研究所博士班學生。

Hua-Kai Lin is currently a Ph.D. student at Department of Chemical Engineering in National Taiwan University



藍崇文先生為美國威斯康辛大學麥迪遜分校材料科學研究所博士，現任國立台灣大學化學工程學系教授。

Chung-Wen Lan received his Ph.D. in materials science from the University of Wisconsin-Madison, USA. He is currently a professor at the Department of Chemical Engineering in National Taiwan University.