

軟性CIGS太陽電池近況與展望

Progress and Prospect of Flexible CIGS Solar Cells

江建志 C. C. Chiang¹、張家銘 C. M. Chang²
工研院綠能所(GEL/ITRI) ¹專案經理、²研究員

軟性CIGS太陽電池具有輕量化、多樣性應用等優點。可依實際應用情境需求做適度撓曲，衍生產品整合性佳。若可結合大面積、低成本的捲對捲製程技術並搭配軟性封裝材，應用在各種獨立式或分散式發電場合，如屋頂型、BIPV及中小型消費性電子產品等，與目標物相結合較無形狀限制，具有相當大的發展潛力。本文將介紹目前國內外廠商或機構在可撓式CIGS薄膜太陽電池製程的最新技術發展。

To meet all applications, CIGS solar cells fabricated with flexible substrate have more advantages than any other type solar cells. It can easily combine rooftop, BIPV and others consumer electronic products. Flexible substrate and encapsulation materials combine with Roll to Roll manufacturing processes can be easily to achieve large area, low cost CIGS solar cell production. This paper introduces the recent researches and companies of CIGS solar cell with flexible substrate in the world.

關鍵詞/Key Words

銅銦鎵硒(Cu(In, Ga)Se₂; CIGS)、軟性太陽電池(Flexible Solar Cells)、輕量化(Light Weight)

引 言

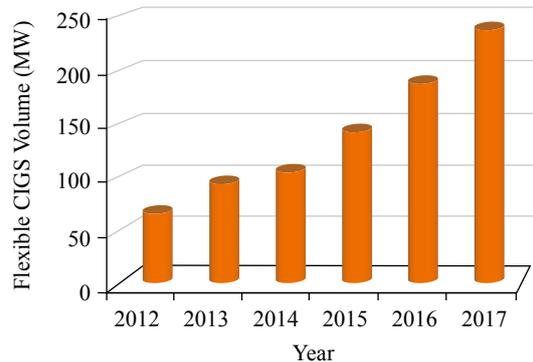
太陽電池產業過去幾年呈現供需失衡現象，導致製造端形成一片紅海市場，世界各國無不找尋能領先其他競爭者的關鍵技術，在這些技術中，除了高效率的前瞻技術外，低成本的製作技術亦是各廠商努力突破的技術重點。然而當終端應用市場成長受限或趨緩時，往往造成各廠商產品無法有效被市場消化，進而產生削價競爭的現象，如2010~2011年即因此造成多國內外太陽能業者申請破產保護或整併易

主。經過各國政府控制及市場機制淘汰體質不佳之廠商及產品後，這兩年來呈現較穩定的市場狀態⁽¹⁾。

近年來，許多下世代的太陽能材料受到國內外研究機構關注，特別是可製作成可撓式的太陽電池相關薄膜材料，如有機太陽電池(OPV)、銅銦鎵硒(CIGS)太陽電池、染料敏化電池(DSC)以及這兩年相當熱門的鈣鈦礦(Perovskite)太陽電池⁽²⁾等。由於可撓式太陽電池市場產品出海口可望有別於矽晶太陽電池之主流市場，對於利基型太陽電池市場，如消費性電子產品之

電源、攜帶式或是穿戴裝置用電源供應、戶外遮陽產品如遮陽棚、陽傘、停車場棚架、車用、屋瓦型太陽電池與BIPV等應用均有相當大的市場潛力，產品應用市場相當廣。

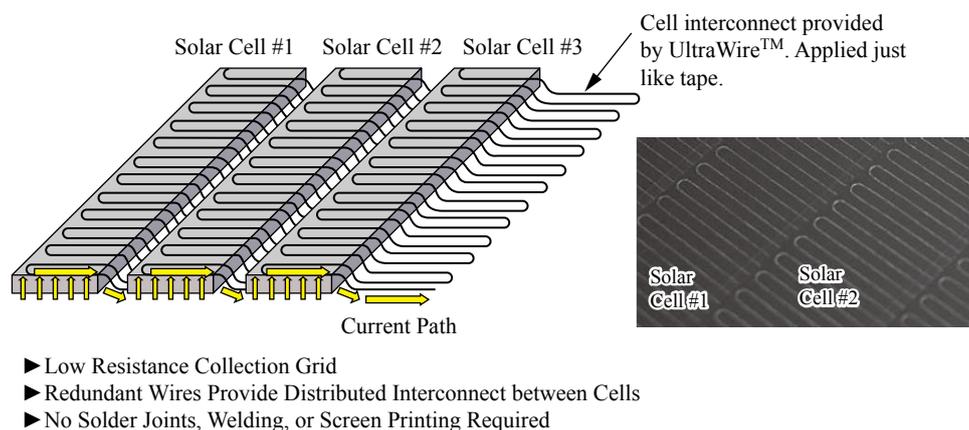
CIGS太陽電池被視為上述各種下世代薄膜太陽電池材料選項中，最具製造成本優勢之太陽電池之一。近十年來，美、德、日等眾多廠商皆曾積極擴大投資在CIGS薄膜太陽電池之技術發展。希望以高材料使用率、低製程設備成本及高效率為技術目標，以取代高耗能與高材料成本之矽基太陽電池。由於CIGS具有高光吸收率優勢，使CIGS吸收層的厚度在2 μm 左右即可吸收近99%以上的可見光波段，在量產製造時，材料成本相較於傳統矽晶類或是其他薄膜電池有相當的優勢，若能以軟性基板進行生產，除可降低太陽電池之重量及封裝材料之成本，另外可增加應用領域，包含Solar Farm、Roof-top、BIPV及消費性電子產品，應用面會比在玻璃基板上製作的產品彈性更大。因為其具有重量輕、體積薄、安裝及運輸容易、產品可撓曲、不易碎裂等應用優勢，可謂為多元化應用的能源產品。進一步結合捲對捲(Roll-to-Roll)製程，將可利用連續製作的優勢，使成本大幅下降。所以，近年來國際間眾多廠商積極投入可撓式基板上製備CIGS太陽電池的開發。在軟性基板上以真空共蒸鍍製程製備CIGS的廠商，如Global Solar、Solarian、Ascent Solar、Flisom等，以真空濺鍍製程製備CIGS的廠商，如MiaSolé、Midsummer等。非真空部分Printing製程僅有Nanosolar一間廠商。顯示出非真空製程搭配可撓式基板有其成本優勢，



▲圖一 全球軟性薄膜太陽電池產量趨勢⁽³⁾

但也具有相當的難度。圖一為IDTechEx預測全球軟性可撓式薄膜太陽電池產量趨勢圖，逐年增加的產能顯示此技術有機會持續發展成普及化民生用太陽電池模組。

可撓式CIGS太陽電池中除吸收層外，最重要的是基板能否與製程相互匹配，在CIGS太陽電池的製作中，目前在軟性基板上主要有幾種選擇：金屬箔或塑膠基板。由於基板進入後段製程必須經過高溫、耐硒化腐蝕等製程條件，所以選擇性並不多。國際主要研究團隊所選用的CIGS基板材料多為金屬箔或是耐高溫之Hybrid PI塑膠。PI塑膠基材在可撓性、厚度、耐衝擊性與成本上有其優勢，但在熱膨脹係數、製程溫度、阻氧與阻水等要求上則是以金屬基板較佳，適合成長CuInSe₂薄膜的金屬基板方面有鋁箔、鈦箔、鉬箔、不銹鋼箔或是一些合金薄板等。但是低價且適合做可撓式電池基板的金屬箔在捲式製程中容易由於元件製作前或製作後的表面不平整，使電池的效率下降。此外，使用金屬基板需要額外的阻障層或絕緣層，以及防止雜質在高溫成長的環境下擴散到吸收層中。過去國內適合做為CIGS基板之超薄型不銹



▲圖二 MiaSolé特殊的模組串並聯機制⁽⁶⁾

鋼箔均仰賴國外進口，目前國內已有廠商利用電解拋光方式進行表面處理，已可獲得超薄且高平坦性之CIGS太陽電池用基板。另外在PI塑膠基板部分，國外如杜邦、宇部等廠商，國內如達邁均有開發適合高溫製程之PI基板⁽⁴⁾。

接下來介紹國際間目前已經投入可撓式CIGS太陽電池的廠商或機構的現況以及最新發展。

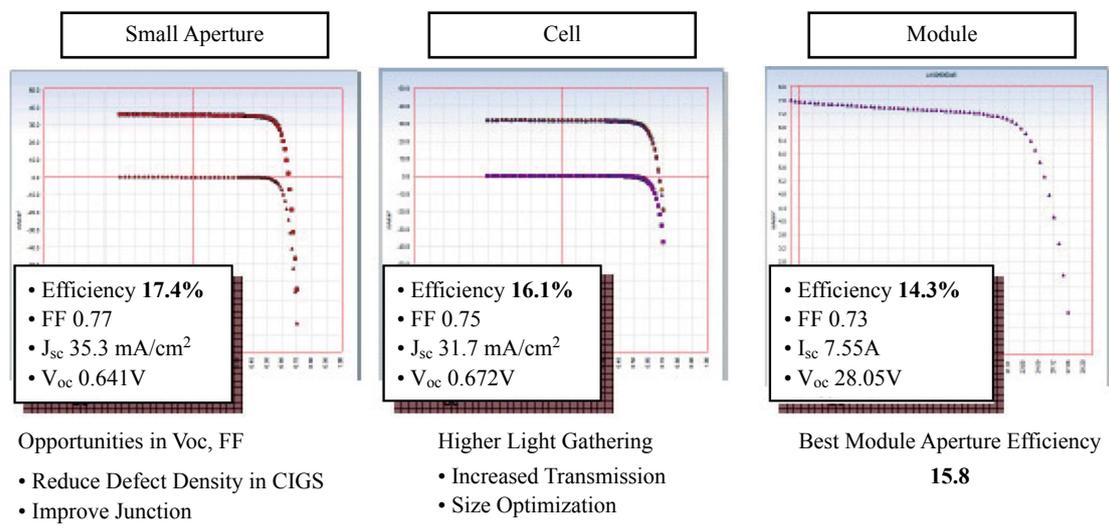
MiaSolé

MiaSolé總部位於美國矽谷，是這幾年崛起的較年輕的CIGS公司，該公司具有與傳統製程有別之創新技術，使用Hybrid的金屬濺鍍硒化製程，簡單來說就是一邊濺鍍一邊硒化的製程，此製程之優點為不需使用硒化氫或硫化氫等有毒氣體，缺點則是在設備的維護會較為繁複。目前該公司的產能已由5 KW成長至11 MW，特別的是該公司使用不銹鋼基板，效率卻可以作到相當高。除了低成本金屬基板選擇外，該公司也使用旋轉靶來提高靶材使用率。在電池串並聯部份，該公司使用特殊的電

極圖案設計專利，有助於收集電池表面的電流，如圖二所示，該公司的小電池最高可以作到17%以上，次模組則是16.1%，在量產模組效率部分，該公司最高已經可以超過14%⁽⁵⁾，如圖三所示，大面積的模組也獲得認證，是目前大面積可撓式CIGS太陽電池世界最高轉換效率的技術。該公司認為高效率的關鍵主要在於減少CIGS中的缺陷，在PN界面的最佳化，並增加次模組TCO的穿透度，經由這些調整，使效率能往上提升，未來該公司期望能將模組效率再提升至15%。該公司宣稱其產品具有高轉換效率，模組重量僅為3.5 kg/m²，比標準多晶矽模組的20 kg/m²輕許多，可鋪設於屋頂而不需要額外結構支撐。具厚度超薄、可撓曲、可直接與目標物貼合且安裝成本低等特性。MiaSolé於2012年被中國漢能集團所收購，成為該集團切入可撓式太陽電池開發的重要里程碑。

Global Solar Energy

Global Solar Energy的製程是利用共蒸鍍結合捲對捲製程的方式，在金屬軟性



▲圖三 MiaSolé在小電池與大面積模組之電性表現⁽⁶⁾



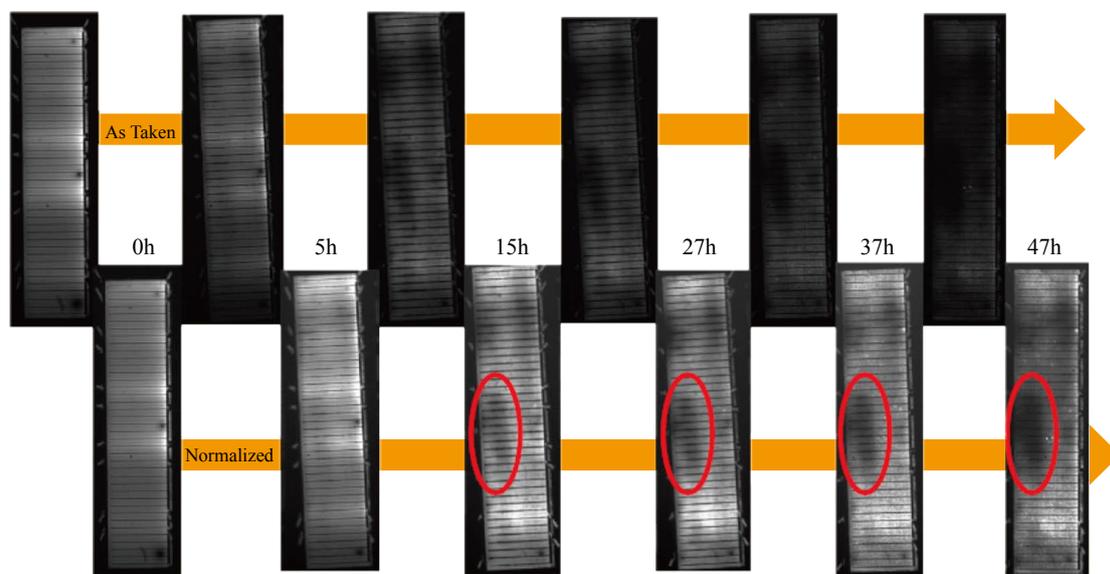
▲圖四 Global Solar Energy展示的可撓式大面積模組

不銹鋼基板(Stainless Steel)上，製作CIGS模組。Global Solar Energy發展特點在於使用輕巧的軟性基板，也是第一家軟性CIGS電池製造商，而其CIGS製造方式採用高效率的蒸鍍製程與Roll-to-Roll製程，可見有許多大廠仍然看好共蒸鍍技術的前景，對於輕巧、可攜式、可撓曲等特殊應用也有廣大市場。Global Solar Energy展示之大面積Flexible CIGS Module如圖四所示，採

用不銹鋼為基材，後續濺鍍Mo、以共蒸鍍製備CIGS吸收層、CBD Buffer Layer並濺鍍透明導電層ZnO/AZO，然後網印金屬Grid，電池最後是以金屬導線串接起來。Global Solar Energy目前在大面積模組上（長1.8M、寬0.2M）的不銹鋼箔，面積約0.38 m²，其效率約可達11%⁽⁷⁾，過去該公司亦曾經NREL證實小電池在0.41 cm²效率達到15.45%，最佳模組效率（約3882.9 cm²）可達13.2%。Global Solar Energy於軟性CIGS模組製作上擁有許多技術及專利。該公司於2013年亦被中國漢能集團購併。

Solarion

Solarion採用可撓式PI為基板，結合低溫共蒸鍍製程製備CIGS太陽電池。主要的原因是因為以PI為基板不會像不銹鋼基板中有雜質擴散的問題，所以不需要額外再增加擴散阻障層，此外由於不銹鋼箔作為CIGS太陽能基板需要相當好的平坦度，一般不銹鋼基板需要特殊的拋光處理，難度



▲圖五 Solarion在添加鈉離子經過Damp Heat之後的EL影像⁽⁸⁾

相當高，而使用高平坦度的塑膠基板則可避免上述問題，而且又有較不銹鋼基板輕量的優點，因基板本身絕緣，可利用電極切割技術切割P1、P2、P3進行電池串聯，也不像不銹鋼基板需要絕緣層避免漏電，但是高效率的CIGS太陽電池需要加熱至500°C以上，PI塑膠基板則難以耐超過450°C的高溫，為了克服CIGS須在高溫成長的問題，Solarion在吸收層製備時引入了離子束輔助沉積技術，此步驟可以幫助硒離子在硒化時的解離率，使得CIGS太陽電池可以在較低的溫度製備就可以得到較高的效率，有高材料使用率、低能量消耗，可有效於低溫幫助晶體成長、可適用PI塑膠基板等優點。Solarion發現小能量的離子束輔助可有效提高量子效率及幫助長晶，但是隨著離子束能量增加反而會導致缺陷的形成。Solarion提到鈉離子添加對於CIGS的好處，如提高Voc、FF、增加長晶與(112)晶面優選方向等。但在鈉添加後的可靠度測試

會造成一些影響，如填充因子隨Damp Heat的時間拉長會較Dry Heat下降許多，此現象又明顯發生於鈉含量較高的實驗上。從EL分析可以看出來鈉對於長效測試容易產生黑色的缺陷，如圖五所示，可能是鈉氧化物的產生，由此結果說明鈉的添加量在CIGS中必須適量，以免在電池壽命上產生致命影響。

Nanosolar

Nanosolar致力於以奈米漿料塗佈於鋁箔基板的方式製作CIGS太陽電池吸收層，搭配快速硒化的熱處理製程，該公司選擇在可撓式鋁箔基板上製作產品，具有重量輕、體積薄、安裝及運輸容易等特性，此外，在生產上由於是捲對捲搭配塗佈式製程，適合大規模量產。目前Nanosolar小電池最高效率已經突破17%來到17.1%⁽⁹⁾，另外其次模組(216 cm²)最高可達13.9%，該公司在透明窗表層用於收集電流的金屬電極



▲圖六 Nanosolar的模組產品在電廠的實際安裝情形

設計選用類似矽晶太陽電池之MWT(Metal Wrap-through)的方式進行電流收集。此方式可降低電極遮蔽面積，以提高電池的有效面積。目前該公司2公尺×1公尺的大面積模組，如圖六所示，輸出功率可達200~240W，效率宣稱可達11.6%，在2013年底Nanosolar宣稱與瑞士的投資者達成收購協議，未來營運方向仍需持續觀察。

EMPA

EMPA(Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology)一直以來即致力於軟性CIGS太陽電池的開發，其技術團隊曾分別在1999與2011年將可撓式CIGS效率做到12.8%與18.7%的世界紀錄。而在2013年初，由A. N. Tiwari博士所率領之EMPA團隊更進一步將元件的效率推升至20.4%⁽¹⁰⁾，此轉換效率已相當於多晶矽太陽電池模組的規格，並超越德國ZSW於2010年在玻璃基板上所發佈的效率紀錄20.3%，這亦是PI基板上CIGS元件效率突破20%的

里程碑。該團隊的技術主要係基於美國再生能源實驗室(NREL)的三階段共蒸鍍製程進行改良，搭配PI基板採用了相對低溫(<500°C)的製程，並藉由調整鍍的蒸鍍方式控制能隙斜度，從而獲得V Shaped的雙梯度分布，因此取得高效率的關鍵。由於可撓式基板具有質輕、不易破損、運送安裝簡便，甚至可應用於可攜式電子產品或特殊建物需求等優點，再加上可採用捲對捲進行製造亦有助於大量化連續生產，此相對於多晶矽電池片之成本優勢致使長期與該團隊有合作關係的Flisom，隨之宣布投資建造一15 MW的軟性太陽電池片製造廠，並與EMPA簽訂協議，以持續提供該團隊發展高效率可撓式電池片技術的資金來源。此量產線於2015年六月正式落成，Flisom的共同創立者兼主席A. N. Tiwari表示，由於整合了EMPA團隊於薄膜太陽光電上的研發能量與Flisom本身在雷射圖案化的設備與技術，才能使得實驗室規模的製程成功地轉移至工業化量產上，因此該產線具備足夠的技術能量提供高效率與低安裝成本的軟性CIGS電池片，目前小模組(5 cm²)具有16.9%的光電轉換效率，以此技術將可在大面積的可撓式模組上產出效率超過17%的電池，而在成本方面，該公司目標係電池模組與系統安裝成本在0.35/Wp與0.6/Wp歐元以下，而鎖定的市場與應用包括太陽能農場(Solar Farms)、建築整合與建材一體型太陽能(BIPV、BAPV)與可攜/穿戴式能源裝置等，產值粗估上看數十億歐元。

另一方面，於EMPA的研發團隊亦積極開發近全濕式製備CIGS太陽電池的製程，並於2015年發表了效率13.8%的CIGSeS太陽電池元件，其中的關鍵技術主要包括了電

鍍大面積Cu-In-Ga金屬薄膜、快速熱退火硒硫化以及化學浴成長TCO薄膜⁽¹¹⁾。雖目前仍係以玻璃基板為載具，但EMPA認為軟性基材的替換在濕式製程中應不是大問題，值得注意的是經由該團隊的努力，預期未來將有機會看到材料利用率更高、生產成本更低、更具競爭力生產大面積軟性CIGS太陽電池的量產線問世。

Midsummer

Midsummer位於瑞典，成立於2004年，由一群具有光碟產業以及顯示器產業背景的團隊所組成，主要以不銹鋼箔或鋁薄板製作小尺寸的可撓式CIGS次模組，尺寸為156 mm × 156 mm，與矽晶相當，所以模組製作方式也與矽晶相同，為許多次模組組合起來之太陽能板。該公司選擇以濺鍍方式利用該公司特有的“Duo” Sputtering Tool，如圖七所示，完成CIGS所有吸收層製程，包含上下電極以及緩衝層製程，此濺鍍設備非常節省佔地面積，另外所有電池製造過程全部都在真空設備中完成，不須無塵室作為生產環境，對於廠房投資成本有一定優勢。該公司也宣稱其產品使用的是無鎘緩衝層，生產過程可免去人員接觸

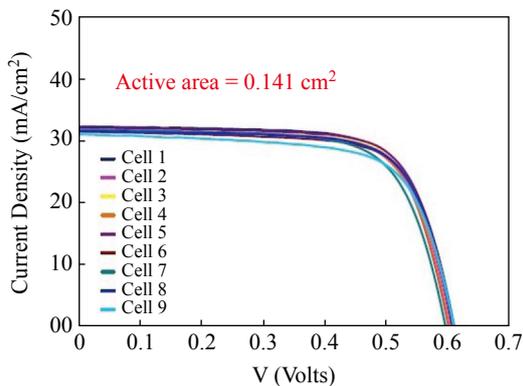


▲圖七 Midsummer展示5 MW整線製程之濺鍍設備⁽¹³⁾

毒化物汙染疑慮。加上後段的串焊以及量測、分選的自動化可減少人工製作造成良率的不穩定性，最後進行模組封裝。2014年該公司宣稱其CIGS電池效率在156 mm × 156 mm下已可達16.2%⁽¹²⁾，在其特有的全濺鍍製程下，每片電池之產出速度約在10~20分鐘之內，靶材使用率可大於60%，未來目標擬提高至70%，以降低CIGS真空濺鍍製程中最令人詬病的材料成本。目前單一“Duo”系統可以滿足5 MW產能，未來該公司亦以整線輸出之模式進行技術移轉。

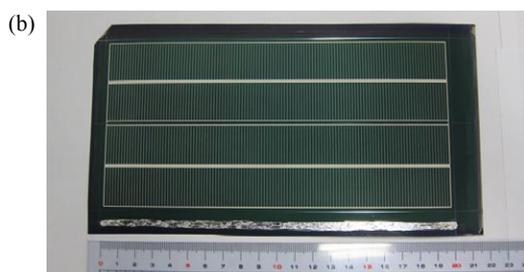
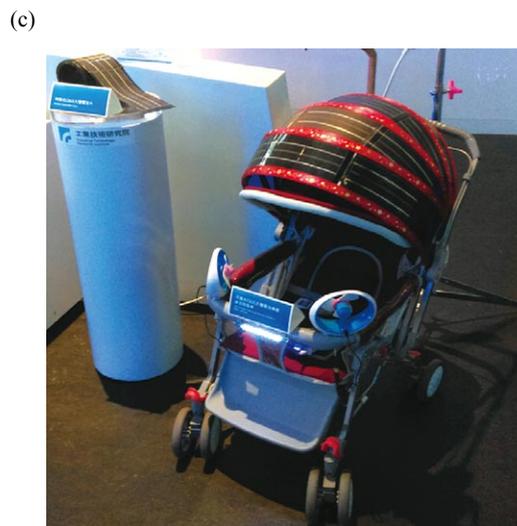
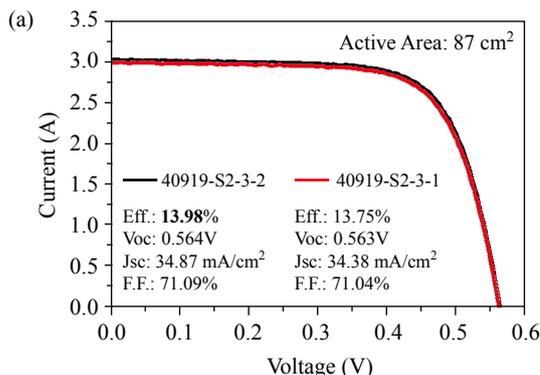
工研院現況

工研院綠能所科專團隊於2010年起導入可撓式CIGS太陽電池開發，搭配無鎘緩衝層，無鎘硒化製程小電池效率最高可達13% (Active Area)。然而，以純硒化製程製作之吸收層元件電性中可發現，電流密度(Jsc)已相當接近於理論值，於是為了進一步推升效率，本團隊亦於2011年時開始進行後硫化(Post-sulfurization)製程的開發。期望藉由硫部分取代硒的方式以提高吸收層表面的能隙，進而提升元件開路電壓與光電轉換效率，隨後順利地於2012年開發出非真空塗佈製程與其相對應之硒化後硫化(Sulfurization after Selenization)參數，與有別於其他非真空製程之高開路電壓 (Voc約610 mV) 之CIGSeS太陽電池，元件效率亦提升至14.2%，如圖八所示。此技術欲實際應用於工業化生產最主要的瓶頸為大面積模組化與良率的維持，主要的影響因素包括漿料組成穩定性、塗佈均勻性、前驅物薄膜厚度與組成均一性以及後續和硒硫化氣氛反應的完成度等。本團隊藉由漿料合成端所累積對於穩定元素組成與漿料均



Cell	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	F.F. (%)	Efficiency (%)
Cell 1	0.60	32.3	72	14.0
Cell 2	0.61	31.7	73	14.0
Cell 3	0.61	31.7	73	14.1
Cell 4	0.60	31.7	72	13.8
Cell 5	0.61	32.2	72	14.2
Cell 6	0.61	31.6	71	13.8
Cell 7	0.60	31.8	70	13.3
Cell 8	0.61	31.6	72	13.9
Cell 9	0.61	31.1	69	13.1

▲圖八 高效率CIGSeS電池J-V曲線與元件電特性⁽¹⁴⁾



▲圖九 (a)高效率CIGSeS電池I-V曲線與次模組元件電特性；(b)可撓式次模組電池片外觀⁽¹⁵⁾；(c)工研院軟性CIGS太陽電池模組應用概念

勻性的經驗，進一步將不同批次塗佈的前驅物薄膜厚度與組成均勻性做更精準的控制，有效地提高非真空製作CIGS太陽電池片的良率。此外，透過硒化後硫化的製程溫度調整與氣氛供給劑量的最適化搭配，可將Mini-module (10 × 20 cm²)的電池效率提

高至13.98%，如圖九所示，目前工研院綠能所已掌握製備可商業化生產高效率CIGS電池片的關鍵技術。以低成本、非真空、可撓式太陽電池為主要標的，因為一旦能夠以最低經費建置整線製程，有效降低整廠輸出的成本，必定能夠成功的將非真空

薄膜CIGS太陽電池推向產業化。

目前工研院綠能所開發之非真空CIGS次模組效率已可達14%。矽晶太陽電池雖然效率略高，但其不可撓曲、易碎等缺點限制了其可攜式之應用。與真空方式製作之CIGS太陽電池相比，工研院綠能所在材料與設備之成本有將近50%之差異優勢，且封裝後輕量化之模組，在民生用的利基市場、屋頂型太陽電池及BIPV市場之應用均更具系統成本之優勢。

結 論

太陽光取之不盡，用之不竭，使用太陽光來發電使得太陽電池成為最佳的再生能源，軟性CIGS太陽電池可先瞄準利基型太陽電池市場，如消費性電子產品之充電電源、攜帶式或是穿戴裝置用電源供應，由於特殊應用以輕薄短小為主要訴求，客製化的軟性模組更能符合這類型特殊應用。戶外遮陽產品如遮陽棚、陽傘、停車場棚架上之應用為主，結合國內不同領域廠商，擴展產品應用市場，如發展高效能小型太陽充電系統可與3C消費性電子產品結合，結合3C隨身電源或低用電量的照明裝置，如LED等，可於夜間使用白天儲存下來的電力，提高商品附加價值，開創新商機與擴大市場規模，軟性CIGS太陽電池假以時日將有機會讓隨處可見的太陽光，變成隨手可得的潔淨能源。

誌 謝

感謝經濟部技術處對本科技專案計畫：可攜式CIGS太陽電池非真空試量產線開發計畫，編號104-EC-17-A-23-0756於經費上的支持。

參考文獻

1. Frankel D, Ostrowski K, Pinner D. The disruptive potential of solar power. McKinsey Quarterly, April 2014
2. Noh JH, Im SH, Heo JH, Mandal TH, Seok SI. Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic-organic hybrid nanostructured solar cells. Nano Letters 2013; 13: 1764-1769
3. <http://www.printedelectronicworld.com/articles/4981/flexible-pv-growing-more-than-three-fold-in-the-next-5-years>
4. 林志成、呂奇明、邱秋燕“CIGS用軟性塑膠基板材料技術”工業材料雜誌295期，CIGS太陽電池技術專題p68~76，2011
5. <http://www.miasole.com> (accessed 22 May, 2015).
6. Atiye Bayman, CIGS Efficiency Increase in Production, 3rd CIGS workshop presentation
7. Wiedeman, S., Beck, M.E., Butcher, R., Repins, I., Gomez, N., Joshi, B., Wendt, R.G., Britt, J.S., 2002. CIGS module development on flexible substrates. In: Proceedings of 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 575-578
8. Felix Daume, Sodium in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells: beneficial influences & damp heat stability, 3rd CIGS workshop presentation.
9. Brown, G., Stone, P., Woodruff, J., Cardozo, B. and Jackrel, D., “Device characteristics of a 17.1% efficient solar cell deposited by a non-vacuum printing method on flexible foil,” 38th PVSC, 003230-003233 (2012)Ta6906.
10. Reinhard, P.; Chirila, A.; Bloesch, P.; Pianezzi, F.; Nishiwaki, S.; Buechelers, S.; Tiwari, A.N., Review of Progress Toward 20% Efficiency Flexible CIGS Solar Cells and Manufacturing Issues of Solar Modules, Photovoltaics, IEEE Journal of., issue 1, volume 3.
11. Y. E. Romanyuk, H. Hagendorfer, P. Stücheli, P. Fuchs, A.I. R. Uhl, C. M. Sutter-Fella, M. Werner, S. Haass, J. Stückelberger, C. Broussillou, P. P. Grand, V. Bermudez, and A. N. Tiwari, “All Solution-Processed Chalcogenide Solar Cells – from Single Functional Layers Towards a 13.8% Efficient CIGS Device”, Adv. Funct. Mater. 25, (2015) 12-27.
12. www.midsummer.se, press release, Accessed: 13 May 2014
13. Sven Lindström, “An all-sputtering process and equipment for CIGS solar cells”, Vakuum in Forschung und Praxis, Volume 25, Issue 5, pages 43-45, Oktober/November 2013
14. Chien-Chih Chiang, Tsung-Yeh Chuang, Wei-Tse Hsu, Yu-Yun Wang, Ke-Yu Lai, Lung-Teng Cheng, Hsien-Te Cheng, Jen-Chuan Chang, Li-Ping Wang, Song-Yeu Tsai, “The Preparation of CIGS by Solution based Processes with different Cd-free Buffer Layers on Flexible Substrate” 27th EUPVSEC, 3CV1.19
15. Chia-Ming Chang, Chien-Chih Chiang, Yun-Feng Chen, Sheng-Wen Chan, Chou-Cheng Li, Wei-Sheng Lin, Li-Ping Wang and Song-Yeu Tsai, “Flexible Cu(In,Ga)(Se,S)₂ Mini-modules with High-Efficiency by Printing Process”, 3^{0th} EUPVSEC submitted.