

# 低成本、高效率矽晶太陽電池電極技術發展

## Electrode Technology Development for Low Cost and High Efficiency c-Si Solar Cells

黃崇傑 C. J. Huang

工研院綠能所(GEL/ITRI) 正研究員

現今，百分之九十以上的矽晶太陽電池電極都採用網印製程，但此製程有幾項缺點：①破片率偏高，刮刀施加的壓力可能造成晶片的破損，特別是小於180  $\mu\text{m}$ 的薄晶片；②材料成本高，主要是目前正面電極都使用銀膠材料；③細線化不易，目前一些新的技術，包括電鑄網、複合網等，似乎不容易達到線寬30  $\mu\text{m}$ 以下及高寬比(Asspect Ratio) 40%以上的目標。因此，本文將對一些有潛力的細線化技術與電極材料做一介紹。

Currently, over 90% electrodes of c-Si solar cells are made by screen printing technologies. However, this technology has several disadvantages. (1) Higher breakage rate: the squeeze pressed on wafer surfaces may cause breakage issues, especially wafer thickness <180  $\mu\text{m}$ . (2) Material costs too high: mainly caused by silver materials as front electrodes. (3) Hard to make fine line electrodes: even by using some new skills, such as electroformed stencil, composite screen and so on, seem hard to achieve line width <30  $\mu\text{m}$  and aspect ratio >40%. Therefore, some potential metal materials and fine line technologies will be introduced to this report.

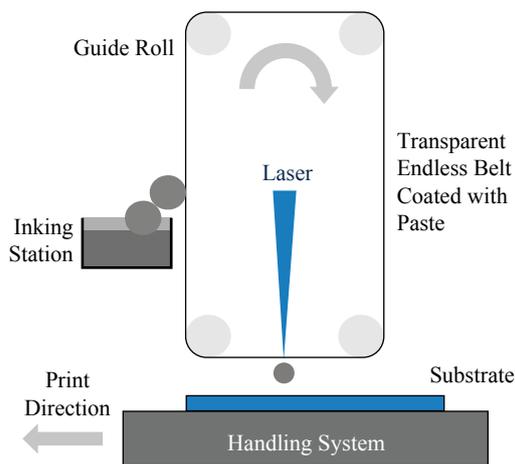
關鍵詞/Key Words

雷射轉印(Laser Transfer Printing)、點膠技術(Dispensing Technology)、銅膠(Copper Paste)、銅電鍍(Copper Plating)

### 雷射轉印技術

雷射轉印技術(Laser Transfer Printing)應用於結晶矽太陽電池，最初是由德國Schmid公司提出，目的是希望藉由非接觸式製程、易修改圖案、無網版(直接在電腦上輸入圖檔，由電腦控制掃描裝置製

作圖案，不需透過張網、曝光、顯影等網板製作過程)等優點，取代傳統網印製程，其系統設計如圖一所示，導電膠經由油墨站(Inking Station)轉印至塑膠基材，再由傳導滾輪(Guide Roll)將塑膠基材與導電膠順時針方向傳送至雷射光源下方位置，雷射照射膠料，使之因吸收高的能量產生剝離



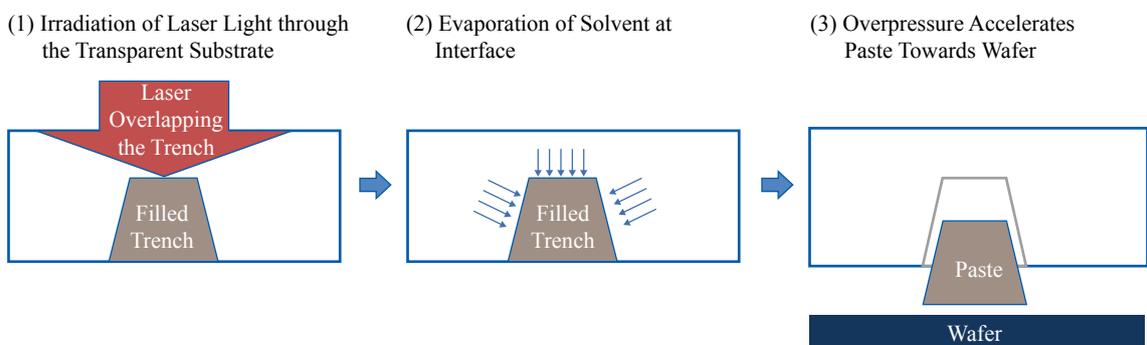
▲圖一 Schmid公司開發的雷射轉印系統架構<sup>(1)</sup>

而轉印至矽基板上，矽基板下方的承載系統(Handling System)會隨轉印所需厚度與圖案間距，移動基板位置而完成所需電極，利用這樣的系統可達到寬度~60 μm的金屬線。

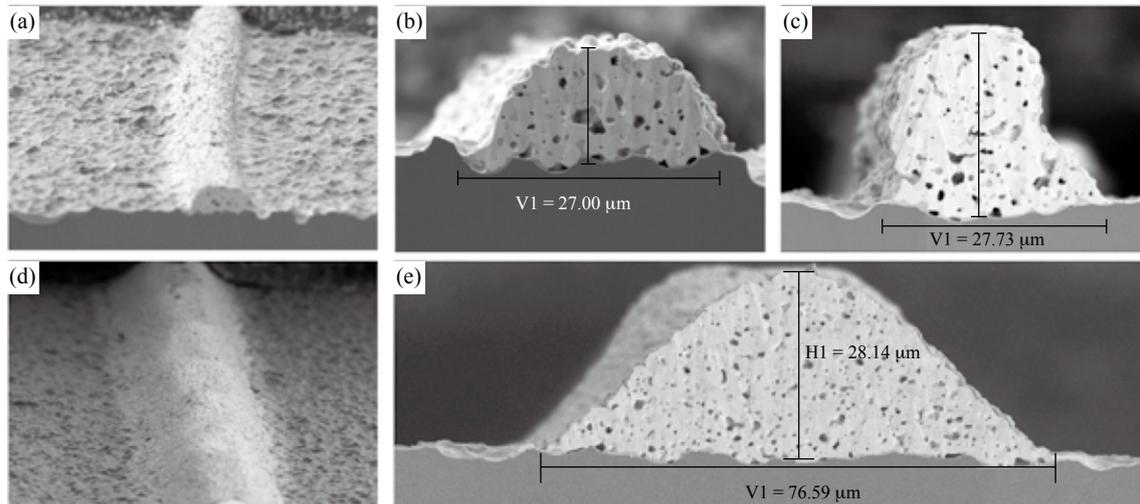
最近，以色列Utilight廠商又做了一些改善，推出新的雷射轉印系統，稱為圖案轉印(Pattern Transfer Printing; PTP)，特別強調細線寬及優越的高寬比，可達到此結果主要歸功於特殊的轉印帶設計，在轉印帶上先製作有極細的溝槽(<30 μm)，這溝槽可

以限制轉印的金屬量及圖案，此設計除了有助於細線化之外，還可以避免在雷射掃描過程，因為速度、位置、能量、焦點位置等不穩定因素造成轉印品質不佳問題。圖二為Utilight的雷射轉印製程示意圖。

Utilight也在2014年發表PTP技術應用於太陽電池的結果，圖三為其轉印與傳統網印的金屬線外觀比較，其中圖三(a)~(c)為PTP結果，所設計的轉印溝槽為28 μm，圖三(d)與圖三(e)是傳統網印結果，所用設計的網印線寬為60 μm，網印後線寬~76 μm；圖三(a)與圖三(d)的比較可看出PTP技術印出來的線也較平整，主要是傳統網印技術，印刷時膠料必須穿透網版到達基板上，但網版上的網紗會阻礙膠料的穿透，是造成高低起伏的主因，當網版開孔率越低或印刷線條越細，高低起伏的情況也越嚴重。另外，比較圖三(b)與圖三(e)圖可看出傳統印刷線條的外擴情況嚴重許多；比較線條高度傳統網印單次印刷是有較佳的結果(約28 μm)，但PTP技術也能藉由對位印刷，將線高提高到22 μm(如圖三(c)所示)，所以換算高寬比的結果，PTP技術可達73%比傳統網印技術(約36%)高出很多。



▲圖二 Utilight的雷射圖案轉印示意<sup>(2)</sup>

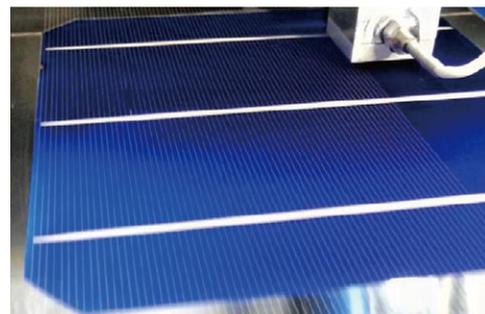


▲圖三 雷射PTP技術(a)~(c)與傳統網印(d)、(e)製作的金屬線外觀比較<sup>(2)</sup>

## 點膠技術

點膠技術(Dispensing Technology)應用已相當廣泛，舉凡於IC電路、電路板、LCD液晶、繼電器、LED燈、光學鏡頭、機械部件密封等，材料的選擇也很多樣，依不同用途的各種溶劑、黏合劑、油墨、導電膠等，有黏滯性的液狀材料(膠體)，都有可能適用。

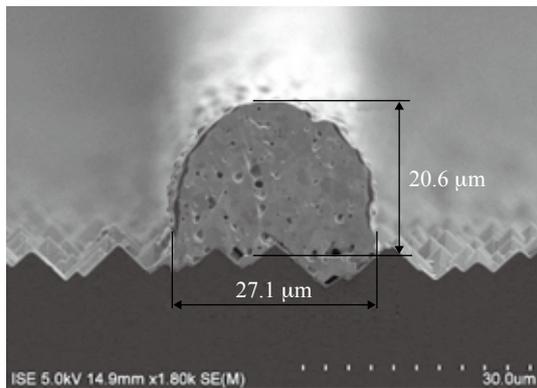
最近德國的FISE(Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems)基於細線化、製程速度及成本考量，提出新的技術構想，並與工業夥伴默克(Merck)、賀利氏(Heraeus)以及網印設備廠商ASYS合作，希望開發新的點膠設備用於太陽電池生產，線寬目標35 μm以下。FISE先利用CFD(Computational Fluid Dynamics)模型模擬分析多款點膠頭，並實際觀察膠體的流速和壓力分佈關係，進而設計出適合太陽電池應用的多噴點式點膠頭。設計時特別著眼於，在低壓力差情況，點膠頭內膠料的流動是否均勻且可



▲圖四 FISE設計開發10個噴頭點膠系統實際工作情況<sup>(3)</sup>

以被控制，因為唯有這樣每個噴點流出的膠量才可能保持穩定且均一。他們發表的第一個設計是4個噴點點膠裝置，實驗結果發現，只要控制得宜，在做指狀線條(Finger Line)印刷時並不會有斷線產生，且所得到線寬偏差可控制在3%以內。有了這些經驗FISE朝更多(10個)噴點且更密(間隔為1.5 mm)的點膠頭開發，圖四顯示此10個噴頭點膠系統實際的工作情況。

圖五為印出來的Finger線外觀，可發



▲圖五 FISE的10個噴頭點膠系統所印出來的線條結果<sup>(3)</sup>

現線條寬度可達30 μm以下(~27 μm)，線高可達20 μm，高寬比超過70%。FISE也發表了點膠與網印技術製作的太陽電池結果比較，製程中Busbar（匯流線）與Finger都是分開印刷，結果發現，點膠技術因為有細線寬優勢，所以光電流（相對值）提高~0.8%效率的結果，點膠技術可以比單次Finger網印高約0.5%，比兩次Finger堆疊印刷高約0.1%。目前，FISE正致力於點膠過程中開始和結束時線條尺寸精度控制及製程穩定性的研究，若這些問題都能克服，將為目前網印技術帶來不小衝擊。

## 銅膠材料

2014年SEMI協會統計太陽電池業界對未來三年、五年和十年量產用正面金屬電極材料的看法，所做成的調查報告發現，大家預期未來銀的使用比例將逐年下降，相對的銅比例將逐漸增長，增加的快慢主要取決於銅電極技術，還有低溫電池製程技術的進展，特別是後者，若低溫電池製程技術的進展越快（如Heterojunction Technology; HJT），預期銅電極材料市占率也會快速

增加。其他可能逐步增加用量的金屬，包括：搭配銅製程用到的鎳、錫等材料，或是透光導電薄膜所需之銦、鋅等金屬材料。

目前，許多研究單位及材料商（如日本AIST、Threebond、Hitachi Chemical及美國Dow Corning等）也看好銅膠材料的潛力而紛紛投入研發，目前以Dow Corning所揭露的資訊較多，Dow Corning的銅膠是將銅粉和焊料顆粒混合在高分子材料中，使其具有高度假塑性(Pseudo-plastic)，在停滯時具有高粘度，但在網印時應力施加情況下粘度會變低，印刷後又立即回復高粘度。由於銅在膠料中占最大比例，所以最初膠料顏色呈棕紅色；然而，在~250°C無氧氣氛處理後，會因為焊料披覆於銅顆粒表面，顏色變成灰色。

Dow Corning認為這樣的材料可以取代現今Busbar位置的銀材料，因為Busbar位置的銀主要是提供焊接功能，對導電度的要求沒那麼高，即使銅膠的電阻率(Resistivity)高出銀膠10倍(~30 μΩ-cm)，對太陽電池及模組的效率也不至於有太大影響；另外，它還有一個特點是製程溫度低，不需要玻璃粉(Glass Frit)穿透氮化矽膜，不會提高復合速率(Recombination Velocity)，電池可以得到較高的開路電壓(Open Circuit Voltage)。

為了測試銅膠的效果，Dow Corning也與Trina Solar合作進行小量驗證，所使用銅Busbar的電阻率是29 μΩ-cm，對照銀Busbar的電阻率是3.7 μΩ-cm，表一為所得到的結果，可發現使用銀Busbar的太陽電池串聯電阻(Rs)雖比較好（低約16%），但效率也只高出約0.07%(~0.017 瓦/片)，換算成售價約會有0.005美元/片的價差；但從材料成本的觀點，目前每片電池正銀的用量~0.12克/片

▼表一 銅Busbar與銀Busbar所做成的太陽電池特性比較<sup>(4)</sup>

		Isc (A)	Voc (mV)	FF (%)	Rs (mOhm)	Rsh (Ohm)	Efficiency (%)
Cu BB (297 Cells)	Ave	<b>8.89</b>	<b>640.4</b>	<b>78.9</b>	<b>3.1</b>	<b>852</b>	<b>18.80</b>
	Max	8.92	641.0	79.1	3.5	643	18.92
	Stdev	0.02	0.8	0.2	0.1	312	0.03
Ag BB (189 Cells)	Ave	8.87	640.1	79.4	2.6	834	18.87
	Max	8.87	641.0	79.6	2.9	1,007	18.95
	Stdev	0.01	0.5	0.1	0.1	296	0.02

▼表二 銅Busbar與銀Busbar所做成的太陽電池模組特性比較<sup>(4)</sup>

Busbar	Quantity	Pmax (Watts)	FF (%)	Voc (Volts)	Isc (Amps)	Rs (Ohms)
Ag	2	271.1	76.78	38.41	9.19	0.47
<b>Cu</b>	<b>2</b>	<b>270.8</b>	<b>76.4</b>	<b>38.46</b>	<b>9.22</b>	<b>0.483</b>

(銀膠售價~0.9美元/克)，若以銅Busbar取代約可省40%的銀用量來計算，則太陽電池業者有機會節省0.03美元/片以上的成本。

表二是利用這些電池封成模組(60片電池)的結果，可發現模組電阻差異變小(Rs只相差約2.8%)，這主要是模組中串接的銅箔可以分擔傳導大部分Busbar上電流所致，也使所得到的輸出功率兩組只差0.3瓦。所以銅Busbar取代銀Busbar應該是有其商機。

有關銅取代銀後太陽電池模組的可靠性(Reliability)問題，他們也依據IEC61215規範做了驗證，在熱衝擊(Damp Heat)及熱循環(Thermal Cycling)的測試中，銅Busbar模組功率衰減分別為0.5%與1.2%，均符合IEC的<5%規範。

## 銅電鍍技術

網印技術來做電極雖然製程簡單，但接觸電阻率(Specific Contact Resistance)卻是其一大弱點，無法滿足高效率太陽電池的要求，所以成本低、製程不複雜的銅電鍍技術，就成為關注的對象，目前所開發的銅

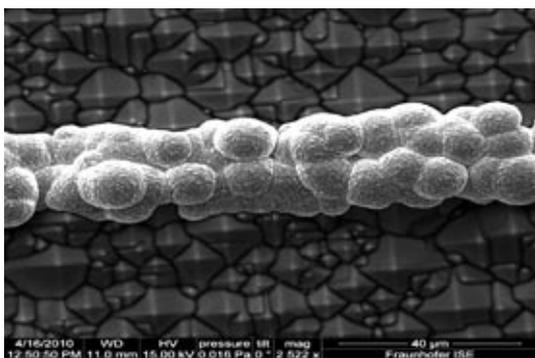
電鍍技術大都含鎳/銅/錫(或銀)三層材料，第一層鎳可使用無電鍍(Electroless Plating)或光誘發電鍍(Light Induced Plating; LIP)技術，鎳會與矽接觸，燒結(Sintering)後形成矽化鎳(Nickel Silicide)，一方面可降低接觸電阻，另一方面又可做為銅的阻擋層(Barrier Layer)；第二層鍍銅可使用電鍍或光誘發電鍍技術，銅主要是做為電流傳導用；第三層鍍錫或銀主要用電鍍技術，錫或銀可以避免銅氧化並提供良好焊接特性。

銅電鍍的機台大致可分為兩類，連續式(In-line)與批次(Batch)式，主要差異是電鍍時晶片是一片一片進入鍍槽中處理，還是一批做完再換下一批來處理；連續式的設備開發廠商有Meco、Rena等，批次式則有Pal、YAC等，連續式機台較小，設備投資較低，批次式則是電鍍層的搭配及厚度可有多種選擇，製程彈性較大。不論是連續式或批次式，目前資料顯示鍍膜品質並沒有太大差異。

目前銅電鍍的技術已經可以做到25 μm以下線寬的Finger(如圖六所示)，高度大

▼表三 銅電鍍技術應用於Heterojunction及PERC結構的電池特性<sup>(5)</sup>

R & D Centre	Type	Substrate	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
Kaneka	Heterojunction	CZ	737.0	39.97	79.77	23.50
Roth & Rau Research	Heterojunction	-	734.0	38.1	79.9	22.3
Fraunhofer ISE	PERC	FZ	679.0	38.8	81.5	21.4
Schott Solar	PERC	CZ	665.0	39.9	80.5	21.3



▲圖六 電鍍技術所得到的Finger線外觀，可看出線寬約 20 μm<sup>(5)</sup>

多在12~20 μm之間，接觸電阻率可達1~6 × 10<sup>-4</sup> Ω·cm<sup>2</sup>，大約是銀膠的十分之一；以前被詬病的拉力(Peel Strength)問題，目前也看到一些進展，最近Rena發表的銅電鍍拉力結果，平均值可以達明顯4N(牛頓)，不輸網印的結果。

為了挑戰更高效率，許多單位也將銅電鍍技術整合在新一代電池的製程中，如Heterojunction(異質界面)及PERC(Passivated Emitter and Rear Contact)結構太陽電池，表三顯示最近的一些結果，目前用銀膠製作的PERC太陽電池最高效率大約是21%，銅電鍍大約比網印製程至少高了0.3~0.4%，在Heterojunction太陽電池中Kaneka與Roth & Rau也得到類似的結果，所以從長遠來看，銅電鍍是可以期待的技术。

## 結語

近十多年來，由於各國政府、產業及環保團體的努力，使太陽電池產業蓬勃發展，目前已經達40 GW/年的市場規模，預期未來每年仍有兩位數的成長率，但競爭也會更加劇烈。工研院研究團隊從技術及成本的觀察，認為此產業仍有許多可以創造獲益的空間，譬如前面所介紹的材料與技術；所以工研院綠能所也積極從事多項有潛力技術平台的建置，例如非接觸式細線化技術、特殊金屬粉材與低溫銅電極製程都是其中的項目，希望藉由這些技術平台，能協助國內太陽光電相關業者，加速新材料與技術開發、創造差異化、提升產品競爭力並帶來更大獲益。☑

## 誌謝

本研究作者感謝能源局(經濟部)計畫支持，謹此致謝。

## 參考文獻

1. [http://www.secondmetal.eu/fileadmin/secondmetal/docs/Session4/3\\_Kleine\\_Jaeger\\_Second\\_metallization\\_20100414\\_finalv2.pdf](http://www.secondmetal.eu/fileadmin/secondmetal/docs/Session4/3_Kleine_Jaeger_Second_metallization_20100414_finalv2.pdf)
2. J. Lossen, M. Matusovsky, A. Noy, Ch. Maier, M. Bähr, Energy Procedia 67 (2015) 156-162
3. M. Pospischil, M. Klawitter, M. Kuchler, J. Specht, H. Gentischer, R. Efinger et al, Energy Procedia 43 (2013) 111-116
4. D. Wood, I. Kuzma-Filipek, R. Russell, F. Duerinckx, et al, Energy Procedia 55 (2014) 724-732
5. A. Rahman and S. Lee, Materials 7(2014) 1318-1341