



高效矽晶太陽電池發展近況

Status of High Efficiency c-Si Solar Cells

黃崇傑 C. J. Huang¹、葉峻銘 C. M. Yeh²

工研院綠能所(GEL/ITRI) ¹正研究員/技術總監、²資深研究員

近年來太陽光電產品的競爭和市場波動令多數產業專家感到意外，找尋新的方向避開市場競爭是一可行的方式。本文參考全球太陽光電研發的進展，介紹了幾種可能的技術發展方向，包括降低接觸電阻的新型銀膠、增加PV系統價值的新雙面太陽電池製程，以及可再降低成本、提高效率的新型鈍化接觸結構。

The strong competition and market fluctuation of PV products recently came as a surprise to most industry experts. Finding new directions to avoid market competition is a viable way. By referring to the developing progress in worldwide, several possible technologies for future PV are introduced in this report, including: new Ag paste to reduce contact resistance, new bifacial solar cell process to add PV system value, and the new passivated contact structure for low cost and high efficiency PV products.

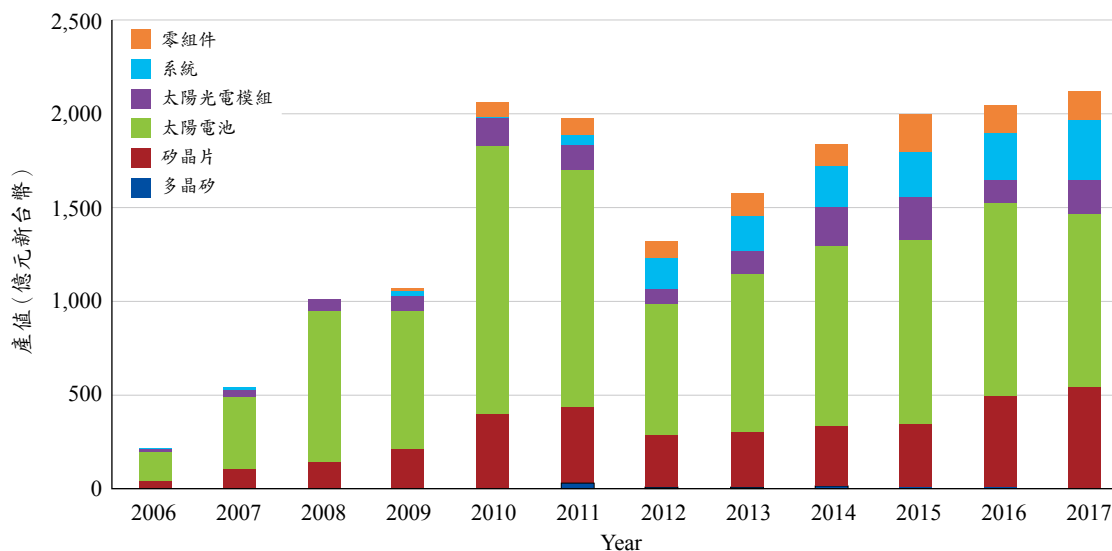
關鍵詞/Key Words

銀膠(Silver Paste; Ag Paste)、雙面太陽電池(Bifacial Solar Cell)、鈍化接觸技術(Passivated Contact Technology)

前 言

近十多年太陽光電的發展，主要先是受到2000年德國《可再生能源法》(EEG)的影響，為德國太陽光電產業奠定了法律基礎。2004年，德國再對《可再生能源法》進行首次修訂，大幅提高了太陽光電電價，並引領全球太陽光電產業的發展。2000年至2012年，以德國、義大利、西班牙三國為代表的歐洲區域，成為全球太陽光電需求的核心地區。但2011年末受歐債危機爆發的影響，以德國、義大利為代表的

歐盟各國迅速削減補貼。不過剛好的是2011年日本由於福島核災的影響，隨後推出力度空前的太陽光電發電補貼政策；中國也積極推出補貼方案及領跑者計劃，全球市場又迅速升溫。自2013年以後，中國、日本、美國三國接過了歐洲的接力棒，成為全球太陽光電的主要增長區域。2017年，全球太陽光電新增容量約98 GW，其中中國52.8 GW、美國11.8 GW、日本7 GW、歐洲8.6 GW、印度9.6 GW。歐洲等傳統市場逐步向中國、美國、印度等市場轉移，一批新興市場，如印度、南非、智利正在加速



資料來源: ITRI統計資料

▲圖一 我國太陽光電產業年產值

發展。新興市場的崛起使得光伏產業從依賴歐洲市場轉向全球化邁進。台灣在2016年太陽光電新增容量約0.52 GW，約居全球第10位，未來隨裝設目標的增加，預期名次將再往前邁進。

我國太陽光電產業產值2016年為新台幣2,049億元(圖一所示)，2017年達2,126億元，成長3.76%，其中太陽電池產值占比近五成達924億元，全球市占率約12.55%，產量約12,300 MW，全球第二。太陽電池以外銷為主，主要出口國為中國與越南，中國為全球主要模組供應國，但近年來中國與歐、美雙方等貿易問題，為規避關稅，近年出口越南、東南亞的太陽電池數量明顯增加。

雖然國內的太陽光電產業產值仍持續成長，但因中國近年來在太陽光電領域的成長更為迅速，再加上內需市場及成本優勢，使國內業者不得不避開大陸產品的直

接競爭，朝差異化、甚至新一代技術進行努力。本文將就最近矽晶太陽電池的一些技術發展，做進一步說明。

低接觸電阻的正面銀膠技術

正面銀膠是矽晶太陽電池達到高效率的關鍵材料之一，因為它是傳導光電流的重要通道。此外，由於矽的價格迅速下降，銀膠(Silver Paste; Ag Paste)已成為太陽電池生產成本中非常重要的一項。許多廠商(包括杜邦、賀利氏、碩禾、優陽)已經廣泛的研究，期望進一步改善銀膠的性能，更符合業者需求。過去大家較專注的是開發無鉛的玻璃粉材料，以穿透SiN_x；近期大家更為關注的則是如何在更高阻值的射極(Emitter)表面，得到低的Ag/Si接觸電阻。

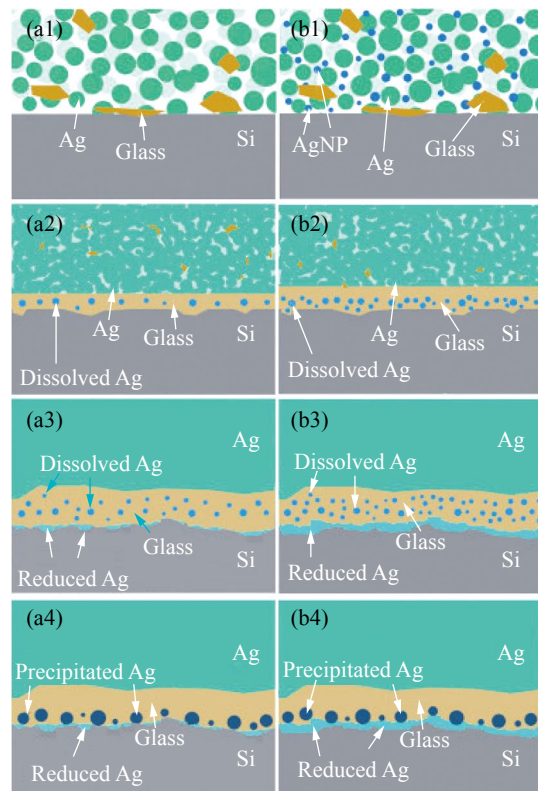
傳統用於c-Si太陽電池的正面銀膠包括Ag粉、玻璃粉、黏合劑和有機物。銀粉是膠料的主要組分，占70~90%重量，因為銀



具有優異的導電性。除Ag粉外，玻璃粉在銀膠燒製過程中也有重要作用，玻璃粉不僅使燒結(Firing)期間蝕刻穿過SiN_x層，還使Ag顆粒成核並移動到射極的表面。然而最近，由於高效率太陽電池的要求，射極的片電阻(Sheet Resistance)值越做越高，Ag/Si的接觸電阻問題也越來越被重視，因此，許多人對Ag奈米粒子(AgNPs)的研究引起了強烈興趣⁽¹⁻²⁾，也發現了明顯的改善效果。事實上因為尺寸效應，AgNPs可以在較低的燒結溫度，連接形成大的Ag顆粒，被預期可以達到降低線電阻(Line Resistance)效果。至於為甚麼會降低接觸電阻，Li等人做了以下的觀察及解釋。

Li⁽¹⁾等人分別觀察沒有和有AgNPs的銀膠燒結，得到的機制說明分別表示在圖二(a1)~(a4)和(b1)~(b4)中。圖二(a1)描繪了印刷在c-Si太陽電池上的一般商品膠的狀態。在初始燒結晶片被升溫至800°C情況下，沒有和有AgNPs的漿料的成分則分別顯示在圖二(a2)和(b2)中。可發現膠料中的有機物被分解並蒸發，玻璃粉軟化並沉降到Si射極表面，大部分銀顆粒被燒結和聚集，一些Ag原子與氧反應，產生Ag⁺離子，Ag⁺離子將溶解到液態玻璃材料中。在經過800°C高溫進入降溫過程，漿料的成分分佈則分別顯示在圖二(a3)和(b3)，圖中顯示玻璃料中Ag⁺離子溶解量將減少，減少的Ag有機會以微晶型式在液化的玻璃料下積聚。圖二(a4)和(b4)為最終燒結後漿料的成分分佈，圖二(a4)顯示沒有AgNPs的銀膠，於矽晶表面會有少量的Ag微晶離散地出現；而圖二(b4)顯示有AgNPs的銀膠會出現較連續的Ag層。就是這較連續的Ag層使得Ag/Si接觸電阻可以較低一些。

圖三為有AgNPs的銀膠與沒有AgNPs的



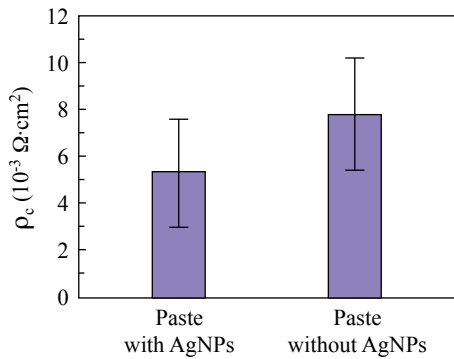
▲圖二 (a1)~(a4)沒有AgNPs的銀膠；(b1)~(b4)有AgNPs的銀膠燒結機制示意圖⁽¹⁾

銀膠之接觸電阻比較，可發現有AgNPs的銀膠約可降低30%接觸電阻值，達到 $\sim 5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

雙面PERC電池技術

隨著水上型太陽光電系統的進展，前後表面都能吸光發電的雙面電池模組也越來越受重視。目前市場已經超過GW需求，對於系統業者來說簡直是令人垂涎的前景，因為背面增加的發電量，許多使用者將其視為額外增加的收入，是可以長期持有的投資策略。

以技術的角度而言，c-Si電池有許多手法可以達到雙面性能，然而對製造商而言，



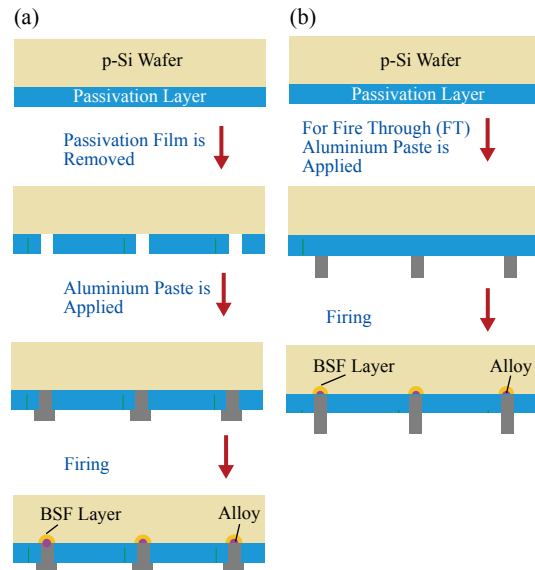
▲圖三 有AgNP的銀膠與沒有AgNP的銀膠之接觸電阻比較⁽¹⁾

因為PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 太陽電池市占率已超過30%，預期將成為市場主流，因此最簡單的思考方法是以現有PERC技術進行改善，製作雙面電池結構。

目前提出的兩種PERC雙面電池製程如圖四所示。圖四(a)的穿孔型(Perforation)製程與現今的PERC製程相同，都是利用Laser將 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 鈍化層打開，再利用對位印刷，將鋁(Al)膠填在開孔處，最後進行燒結，形成背電場(Back Surface Field; BSF)及金屬電極。圖四(b)的燒穿型(Fire Through)製程則更簡單，直接網印Al膠，燒結後Al穿過鈍化層，形成背電場及金屬電極。

這兩種製程技術最大的挑戰，就是開發合適的Al膠材料及設計合適的電極圖案，以得到高效率雙面電池。因為Al膠電阻率 $\sim 20 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 比Ag膠高6倍，因此要降低在電流傳導的損失，就必須提高Al電極寬度、高度或電極數目。但是增加電極寬度及數目，都會減少吸光面積，影響背面發電量，所以增加電極高度、減少電極寬度及數目，為最佳的方向。

圖五為ISFH (Institute for Solar Energy Research in Hamelin)與Toyo Aluminium合



資料來源：ITRI整理

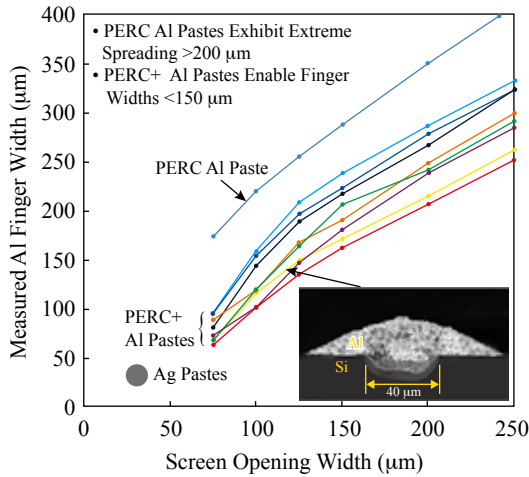
▲圖四 (a)穿孔型的雙面PERC製程；(b)燒穿型的雙面PERC製程

作發表的Al膠結果⁽³⁾。現今PERC用的Al膠大多注重的是Al/Si反應、BSF及孔洞(Void)的形成方式，細線化成效不佳，即使用到 $70 \mu\text{m}$ 的網版，印出來的線寬也只能縮到 $170 \mu\text{m}$ 左右(如圖五PERC Al Paste曲線所示)。經由他們的努力，對鋁粉及添加的材料重新選擇調整，使Al膠外擴的情況大幅改善，新的PERC+ Al Paste在燒結後，已經可以做到 $120 \mu\text{m}$ 以下的線寬，高度也可達 $20 \mu\text{m}$ 以上，目前繼續朝更細線化開發。

在電性部分，利用新的PERC+ Al膠，電池效率正面可達21.6%，背面可達16.7%；做成小面積雙面太陽能模組的結果如表一所示，正面效率達19.8%，背面達16.4%，雙面比(Bifaciality)達82%。

鈍化接觸技術

目前市售的一般矽晶太陽電池，表面



▲圖五 ISFH與Toyo Aluminium合作Al膠的網印結果⁽³⁾

都會採用柵狀(Grid)銀電極來收集電流，但是它會造成光線無法穿透的負面效應。許多研究藉模擬計算光路徑、載子產生、載子復合(Carrier Recombination)及串聯電阻等因素，得到的最佳化柵狀電極面積，還是需占電池面積3%，甚至更高。另外，在背後電極圖案部分，局部點接觸是目前最佳的選擇，接觸面積也大約占電池面積3%。事實上，目前的電極設計，無論是柵狀或是點接觸電極，金屬與下面的矽所產生的金屬/矽(Metal/Silicon; M/S)界面都具有非常高的缺陷密度(Dit)，因此對復合損失(Recombination Loss)有很大影響，必須最小化。然而，M/S減小接觸面積，可能需要用到黃光(Photolithography)技術將接觸點變小、變密，或增加串聯電阻減少M/S接觸數目，這樣的方法不是增加製程成本，就是犧牲效率，反而得不償失，因此必須尋求其他技術。

鈍化接觸(Passivated Contact)是新的發展方向，近期許多研究單位都紛紛投入鈍

▼表一 ISFH與Toyo Aluminium合作的雙面太陽能模組電性資料⁽³⁾

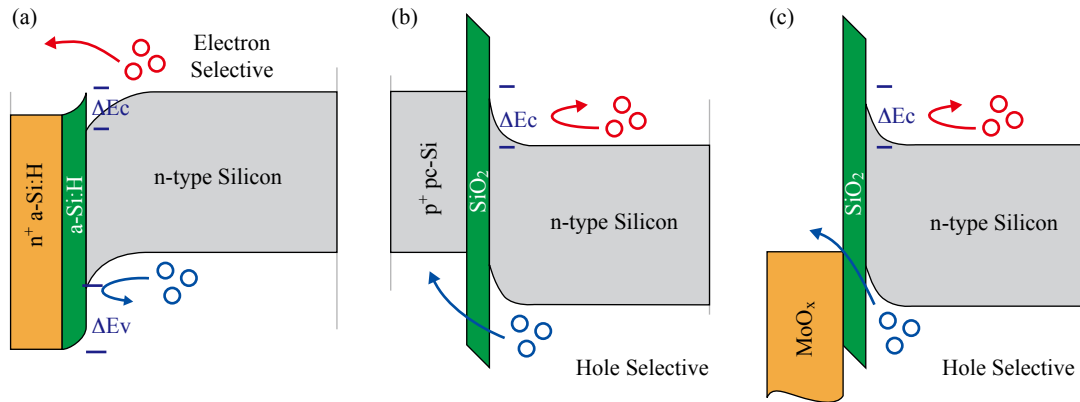
18 PERC+ Cells	V _{OC} (V)	I _{SC} (A)	FF (%)	η (%)
Module Front	11.8	4.80	78.7	19.8*
Module Back	11.8	3.94	78.8	16.4*

*Independently Confirmed by TÜVRheinland[®]

化接觸相關的結構與材料開發。這些鈍化接觸的結構通常由多層異質薄膜疊加所組成，具有下列功能：①降低缺陷密度：矽表面有薄鈍化層以降低Dit；②載子選擇性(Carrier Selectivity)：可以限制少數載子流過的量，同時可以使多數載子能夠順利通過；③載子橫向傳導性(Lateral Conductivity)佳：可以減少金屬電極的需求。

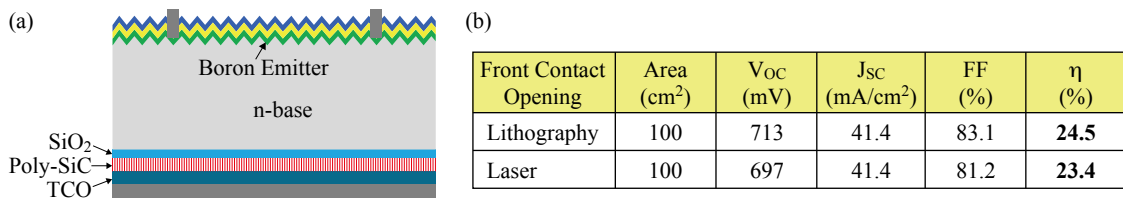
其中第②項載子選擇性功能，可以選擇適當材料，使接面的能帶有偏移(Offset)或加入其他機制(如正、負電荷)，引起的能帶彎曲(Band Bending)。目前較為成功的載子選擇材料有三種，分別是：①摻雜非晶矽；②摻雜多晶矽；③過渡金屬氧化物。每種材料所產生的界面能帶分別圖如圖六所示。

在圖六(a)摻雜非晶矽的鈍化接觸能帶情況，電洞在價電帶(Valence Band)遇到的位障(Potential Barrier) ΔE_v 很高，因此電洞不易越過此 ΔE_v 位障，相對的電子在導電帶(Conduction Band)遇到的位障 ΔE_c 很低，電子是很容易從導電帶通過，這樣的界面電子與電洞通過難易度有很大不同，就具有選擇性。Panasonics HIT⁽⁴⁾太陽電池是這種摻雜非晶矽鈍化接觸的代表性產品。相較於傳統矽晶太陽電池，HIT太陽電池在製程上具有以下優點：全程低溫製程(<200°C)、不需高溫的電極燒結過程、僅使用化學氣



資料來源：ITRI整理

▲圖六 (a)摻雜非晶矽；(b)摻雜多晶矽；和(c)過渡金屬氧化物等材料，所形成的鈍化接觸界面能帶變化及載子選擇性示意圖



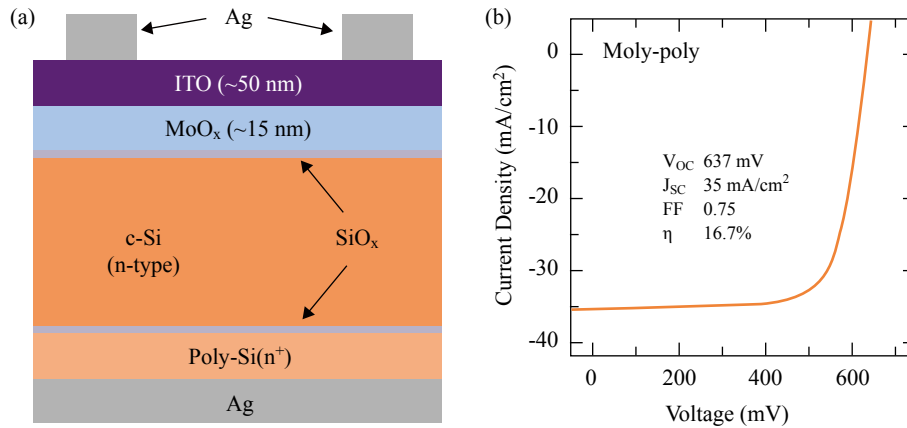
▲圖七 Fraunhofer ISE發展的TOPCon電池(a)結構圖；(b)電池特性資料⁽⁵⁾

相沉積在低溫下解離SiH₄完成異質非晶矽薄膜。此外，SiH₄所產生之H鍵結，在低溫製程可維持良好的表面鈍化效果；低溫製程之低碳排放量，能達到節省成本與環保相輔相成效果。目前已知的HIT太陽電池最高效率可達到24.7%。

圖六(b)摻雜多晶矽的鈍化接觸能帶的情況則是，超薄SiO₂薄膜可讓電洞或電子通過，但因p-type多晶矽能帶的緣故，電子會遇到能障，但電洞不會，所以造成有載子選擇性；這種能帶最具代表性的元件是TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)太陽電池。

在TOPCon太陽電池技術方面，近年來已有不少國際研究單位投入研究開發，像是

德國Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE)、荷蘭Energy Research Centre of the Netherlands (ECN)以及美國的再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory; NREL)等。Fraunhofer ISE最近發展的TOPCon電池結構如圖七(a)所示，矽基板是使用1 Ω·cm的100 mm晶片直徑和200 μm厚度的n型FZ c-Si晶片，在電池結構正面金字塔的部分是用硼擴散(Boron-diffused)的方式製作射極，其電阻值約為140 Ω/sq，之後在射極上沉積氧化鋁薄膜(Al₂O₃)作表面鈍化層，以及氮化矽作為抗反射層。然後在緩衝的HF溶液中除去氧化物，接著在硝酸(HNO₃)中或在管狀爐中(約600°C、O₂/N₂環境中成長10分鐘)生長SiO₂



▲圖八 過渡金屬氧化物鈍化接觸太陽電池(a)結構圖；(b)光電特性⁽⁷⁾

層。在SiO₂層外部則是堆疊a-SiC_x(n)層，利用管式爐PECVD中以40 kHz鍍膜得到。沉積a-SiC_x(n)後，樣品再放入管狀爐中經850°C~900°C惰性環境退火，之後，樣品再經過400°C氫氣氛處理。最後，再鍍上TCO與金屬電極，則完成TOPCon太陽電池。

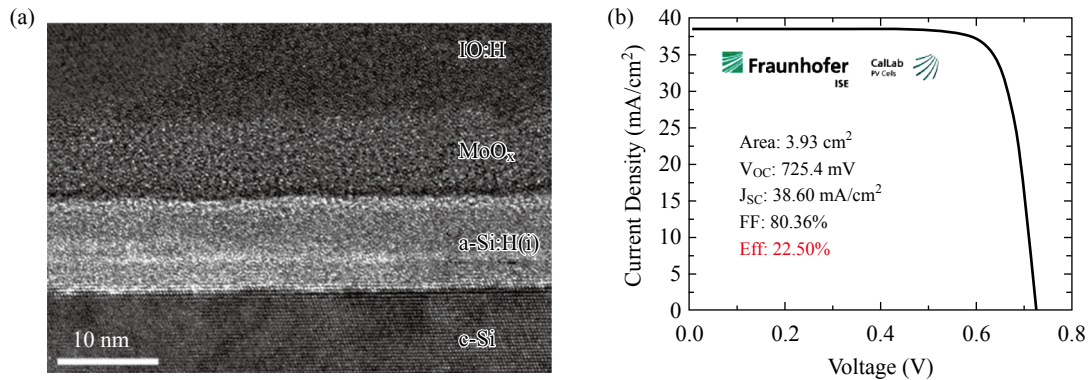
Fraunhofer ISE開發的TOPCon太陽電池轉換效率小面積可達25.1%⁽⁵⁾，大面積資料如圖七(b)所示，開路電壓為713 mV，短路電流密度41.4 mA/cm²，填充因子83.1%，效率可達24.5%。

圖六(c)為過渡金屬氧化物鈍化接觸的能帶，是選用超薄SiO₂薄膜或a-Si:H(i)可讓電洞或電子通過，但因過渡金屬氧化物的導電帶很接近矽基材(Si Substrate)中的價電帶，所以過渡金屬氧化物的導電帶電子，可以通過SiO₂薄膜或a-Si:H(i)，與矽基材中照光產生的電洞結合產生電流，至於矽基材中電子則在到達a-Si:H(i)或SiO₂前會遇到較高的能障，所以不利電子傳導。形成這種能帶較多研究的材料是MoO_x及WO_x⁽⁶⁾。

圖八(a)為Bullock等人⁽⁷⁾發表的過渡金屬氧化物鈍化接觸太陽電池結構，其製程

大致如下：①蝕刻清洗，先將晶片的損傷層去除，並進行粗糙化處理，以增加入光量；②成長超薄氧化層，將矽晶表面進行鈍化處理；③以LPCVD於背面成長n型多晶矽，形成背面電場；④以電子鎗蒸鍍(E-beam Evaporation)系統，製作MoO_x，形成過渡金屬氧化物鈍化接觸；⑤製作電極，正面鍍上ITO及Ag材料，背面鍍上Ag電極即完成，可以發現整個製程相當簡單。圖八(b)為Bullock等人得到的太陽電池I-V曲線，效率只有16.7%，分析原因是SiO₂/MoO_x的鍍化介面不夠好所導致。

Geissbühler等人⁽⁸⁾則是將Bullock所提結構中的SiO₂和Poly-Si(n⁺)分別以a-Si:H(i)及a-Si:H(n)取代，ITO則改成含氫的In₂O₃ (簡寫為IO:H)。圖九(a)為正面接結構的HR-TEM圖，可看出a-Si:H(i)和MoO_x的厚度都約為10 nm；所得到的電池I-V曲線如圖九(b)所示，可發現開路電壓為725.4 mV，短路電流密度38.6 mA/cm²，填充因子80.36%，效率可達22.5%，特性上有明顯提升，特別是開路電壓很高，若能在電極及光吸收特性上做一些改善，效率有機會可以再提升。



▲圖九 (a) a-Si:H/MoO_x組成的鈍化接觸結構TEM圖形；(b) a-Si:H/MoO_x鈍化接觸太陽電池的光電特性⁽⁸⁾

結語

矽晶太陽電池技術持續朝高效率發展，在材料、製程技術、電池結構都還有發展的空間。報告中所提及的低接觸電阻銀膠、雙面PERC電池關鍵材料及製程、鈍化接觸電池結構，都是值得關注的方向。☒

誌謝

本研究工作承蒙經濟部能源局研究計畫(Contract No: 107-D0104)及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。

參考文獻

1. W. Li, T. Wu, R. Jiao, Bo-Ping Zhang, Siyang Li, Yang Zhou and Liangliang Li, "Effects of silver nanoparticles on the firing behavior of silver paste on crystalline silicon solar cells", *Colloid. Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 466 (2015) 132.
2. Q. Che, H. YangLin Lu and Y. Wang, "Nanoparticles-aided silver front contact paste for crystalline silicon solar cells", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 24 (2013)524.
3. T. Dullweber, H. Schulte-Huxel, H. Hannebauer,

4. M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, and E. Maruyama, "24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer", *IEEE J. Photovoltaics*, 4 (2014) 96.
5. A. Moldovan, F. Feldmann, M. Zimmer, J. Rentsch, J. Benick, and M. Hermle, "Tunnel Oxide Passivated Carrier-Selective Contacts Based on Ultra-Thin SiO₂ Layers", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 142 (2015) 123.
6. L. G. Gerling, S. Mahato, A. Morales-Vilches, G. Masmitja, P. Ortega, C. Voz, R. Alcubilla, and J. Puigdollers, "Transition Metal Oxides as Hole-Selective Contacts in Silicon Heterojunctions Solar Cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 145 (2016) 109.
7. J. Bullock, D. Yan, A. Cuevas, Y. Wan, and C. Samundsett, "n- and p-type silicon Solar Cells with Molybdenum Oxide Hole Contacts", *Energy Procedia*, 77 (2015) 446.
8. J. Geissbühler et al., "22.5% Efficient Silicon Heterojunction Solar Cell with Molybdenum Oxide Hole Collector", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107 (2015) 81601.