



# 雙面鈍化接觸太陽電池概述與展望

An Overview and Perspectives of Bifacial Passivated Contact Solar Cells

張瀚丞 H. C. Chang<sup>1</sup>、葉峻銘 C. M. Yeh<sup>2</sup>、  
陳松裕 S. Y. Chen<sup>3</sup>、郭明村 M. T. Kuo<sup>4</sup>、  
林福銘 F. M. Lin<sup>5</sup>

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 <sup>1</sup>副經理、<sup>2</sup>資深研究員、  
<sup>3</sup>經理、<sup>4</sup>副組長、<sup>5</sup>正研究員/組長

## 摘要/Abstract

自從穿隧氧化鈍化接觸太陽電池(TOPCon)的概念被提出以來，由於其優異的表面鈍化效果及與主流產線良好的兼容性，成為太陽能領域的熱門研究項目。在本篇文章中，我們回顧典型TOPCon電池的基本原理與關鍵製程，文章的後半段則著墨於討論新一代高效率雙面鈍化接觸太陽電池(biPC)的製作方法與其未來展望。

Ever since the first publication of tunnel oxide passivated contact (TOPCon) solar cells, it has become a popular research topic due to its excellent surface passivation and good compatibility with mainstream production lines. Here, we review the basic principles and key processes of TOPCon solar cells. In the second half of this article, we discuss the methods for preparing the high-efficiency bifacial passivated contact (biPC) solar cells and their perspectives.

## 關鍵字/Keywords

穿隧氧化鈍化接觸太陽電池(Tunnel Oxide Passivated Contact Solar Cells; TOPCon)、雙面鈍化接觸太陽電池(Bifacial Passivated Contact Solar Cells; biPC)



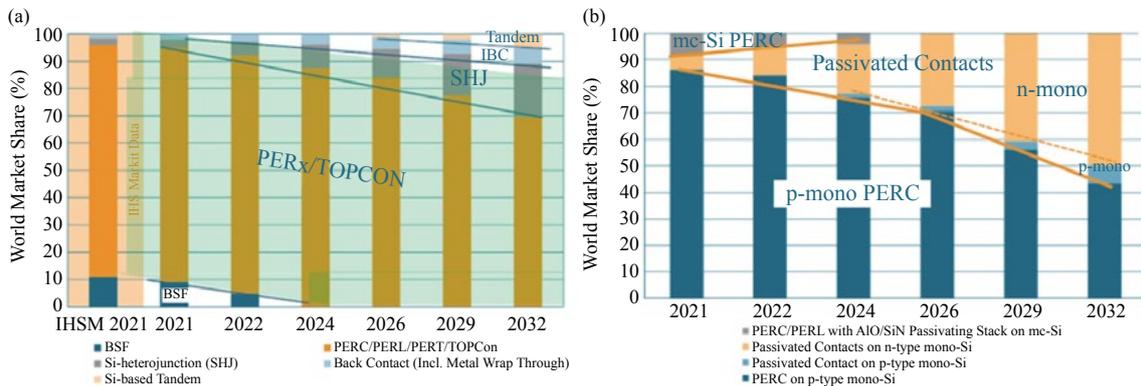
## 前言

製作太陽電池的矽晶片分為n型與p型兩種，而現行的主流太陽電池產品大多以p型電池為主。p型電池能成為矽晶電池的主要產品來自於它的幾項特點：第一是n型矽晶片因磷在矽之其中其分散性較差，易造成拉晶時磷分布不均，而p型矽晶片摻硼元素，硼與矽分散係數相當，分散均勻度容易控制，因此p型矽晶片製作較為簡單，成本較低；第二是p型電池正面使用銀膠直接熔穿抗反射層，進而與重摻雜的射極(Emitter) n<sup>+</sup>區域形成低阻抗的歐姆接觸界面，再搭配背面鋁膠與矽晶片反應，形成具有低載子復合速率的鋁背表面場(Al Back Surface Field; Al-BSF)，相較於n型電池正背面皆使用銀膠，具有更高之成本效益。由於鈍化射極與背接觸(Passivated Emitter and Rear Contact; PERC)技術的優異鈍化效果，使得p型電池的效能獲得相當大的提升，並於最近十年順利產業化而成為主流。和傳統的Al-BSF電池相比，PERC電池的改善部分主要有以下兩點：一是透過表面回蝕(Etch-back)或是低濃度POCl<sub>3</sub>擴散(Diffusion)製程來降低射極層的摻雜濃度，進而壓低該區的表面復合速率；二是透過雷射消融(Laser Ablation)或網印蝕刻(Screen Printing Etch)技術，配合對位網印來形成圖樣化電極，以降低電池背面的復合速率，從而提升電池的開路電壓。透過以上這兩種改進技術，目前不論以多晶或單晶矽晶片所製作的PERC電池都可以達到不錯的轉換效率(1-5)。然而，縱然這些技術的導入可以使得

p型電池有不錯的效能表現，但目前PERC電池效率已趨近其理論極限值24.5%，且p型矽材料內部硼氧鍵引致的光致衰減(Light Induced Degradation; LID)現象，會導致p型電池在可靠度及性能都遠不如n型電池<sup>(6)</sup>，因此產業勢必需要升級。

近年來，由於n型晶片的製造成本逐漸下降至與p型晶片相近，性價比顯著提升。許多在n型電池上的優勢也更受到關注，例如：與p型電池相比之下，n型電池少數載子壽命高、沒有硼氧鍵引致的LID問題；n型電池溫度係數較優，在高溫環境下的功率輸出衰減少於p型電池；雙面受光可發電的電池結構之雙面率(Bifacial Ratio)在n型電池也優於p型電池片。根據這些特點，其實不難想像最高效率的電池結構理應製作在n型晶片上，目前以n型晶片為基材製作的指標性高效率電池其中之一即為穿隧氧化鈍化接觸太陽電池(Tunnel Oxide Passivated Contact Solar Cells; TOPCon)，商品化具備穿隧氧化鈍化結構製作的n型電池已超過23%以上的轉換效率，且與PERC的產線相容極高。相較於早已商品化的n型太陽電池，例如：異質接面(Heterojunction with Intrinsic Thin Layer; HIT)太陽電池以及交指式背接觸太陽電池(Interdigitated Back Contacted Solar Cells; IBC)，TOPCon具有更低成本的生產競爭力，因此TOPCon電池的相關技術成了當前研究的焦點。

根據德國機械設備製造業聯合會(VDMA)發行的2022年版《國際太陽能技術藍圖》(International Technology Roadmap for Photovoltaic; ITRPV)預測，背面具鈍化

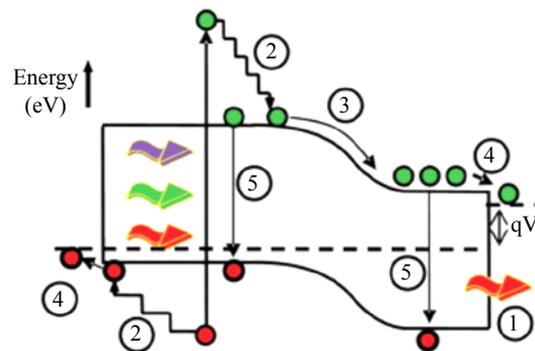


▲圖一 (a)全球太陽電池技術市占率預測；(b) PERC/TOPCon電池技術市占率預測<sup>(6)</sup>

效果之太陽電池(PERC/TOPCon)已成為矽晶太陽電池技術主流，市占率超過8成，並預期未來10年內，PERC/TOPCon將持續占據領導地位(圖一(a))。另外，在PERC/TOPCon中，鈍化接觸(Passivated Contacts)預計在2032年將占超過5成，可望取代典型PERC，如圖一(b)所示<sup>(6)</sup>。在接下來的討論中，我們首先將簡介TOPCon電池的基本結構和原理，接著討論如何於現行TOPCon製程平台上，將穿隧氧化鈍化接觸技術應用於太陽電池正面，製作高效率雙面鈍化接觸太陽電池(Bifacial Passivated Contact Solar Cells; biPC)，並在文末揭露該類電池的關鍵製程。

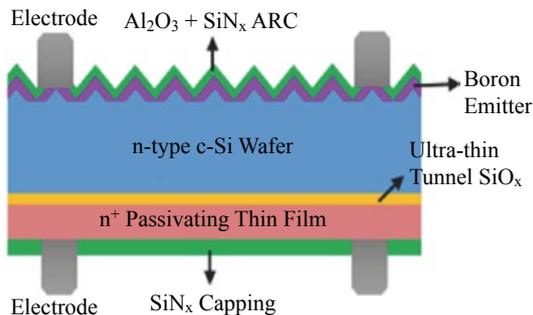
## TOPCon電池回顧

造成太陽電池對於光能轉換效率損失的原因，如圖二所示，包含的主要途徑大致上分為五個：①能量小於電池吸收層禁帶(Forbidden Band)寬度的光子不能激發產生電子-電洞對，直接穿透出去；②



▲圖二 太陽電池光電能量轉換損失途徑示意圖<sup>(7)</sup>(彩圖請見材料世界網)

能量大於電池吸收層禁帶寬度的光子被吸收，產生的電子-電洞對分別被激發到導帶(Conduction Band)和價帶(Valence Band)的高能態，多餘的能量以聲子(Phonon)形式放出，高能態的電子-電洞又回落到導帶底和價帶頂，導致能量的損失；③在PN接面光生載子的電荷分離和傳輸造成的損失；④半導體材料與金屬電極接觸處引起之損失；⑤光生載子傳送過程中由於材料缺陷



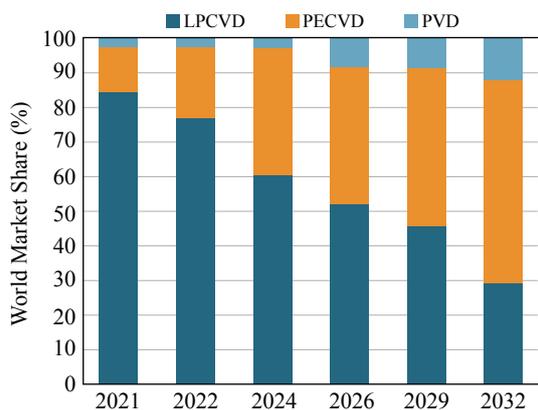
▲圖三 TOPCon電池結構示意圖(彩圖請見材料世界網)

等導致的復合損失。以上各種能量損失的途徑可概括為①、②、③之光學損失與③、④和⑤造成之電學損失<sup>(7)</sup>。為了提高太陽電池效率，需要同時降低光學損失和電學損失。降低光學損失的有效措施包括前表面低折射率的抗反射膜、前表面織化結構、背面高反射膜等結構及技術；減少電學損失則需要從提高矽晶片質量、改善PN接面形成技術、新型鈍化材料與技術、金屬接觸技術等方面入手。TOPCon電池即是針對如何使用新型鈍化材料與接觸技術，來降低電學損失。

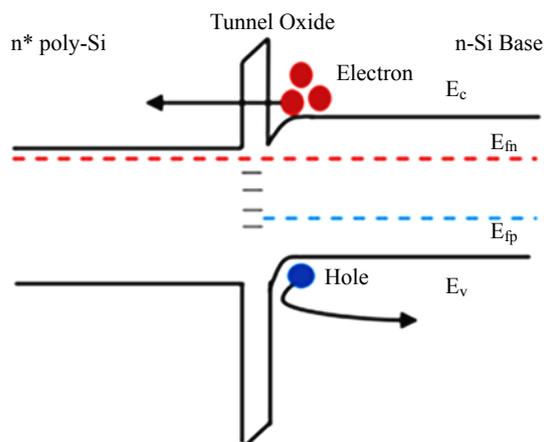
TOPCon是一種基於選擇性載子原理的技術，其電池結構主要是以n型晶片為基板的太陽電池，在電池背面製備一層超薄氧化矽，然後再沉積一層摻雜磷的多晶矽薄膜，二者共同形成了鈍化接觸結構，有效降低表面復合和金屬接觸復合。TOPCon電池的概念由德國Fraunhofer ISE於2013年提出，圖三為n型TOPCon電池的結構示意圖。TOPCon的正面結構與n-PERT太陽電池沒有太大差異，電池核心技術為背面鈍化

接觸，矽晶片背面先形成一層超薄氧化矽(1~2 nm)與一層磷摻雜的微晶及非晶混合矽薄膜。鈍化性能透過退火製程而激活，矽薄膜在該退火過程中，結晶性發生變化，由微晶及非晶混合相再結晶轉變為多晶，該結構能有效地減少因矽晶片表面缺陷造成的載流子復合。目前在適當的退火溫度下，隱含開路電壓( $iV_{oc}$ )大於740 mV，復合電流密度( $J_0$ )小於5 fA/cm<sup>2</sup>，顯示了穿隧氧化層鈍化接觸結構優異的鈍化性能。

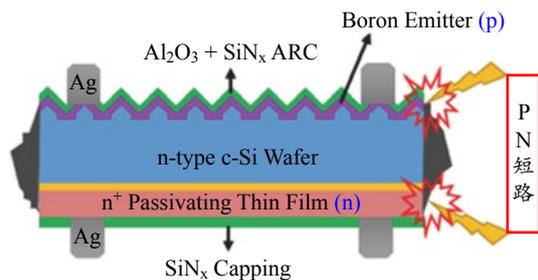
TOPCon電池最大程度保留和利用現有傳統p型PERC電池設備製程，只需增加硼擴散和氧化層及矽薄膜沉積設備，無須背面開孔和對準。其中重摻雜多晶矽層對電池的鈍化性能至關重要。首先，多晶矽層對超薄氧化層起保護作用，避免其遭到破壞；其次，對多晶矽層進行重摻雜能夠有效降低載子在電池背面的復合速率，進一步提高太陽電池轉換效率。重摻雜多晶矽製程的參數對鈍化性能十分關鍵，過高的擴散溫度或退火再結晶溫度，以及多晶矽層膜厚的降低，都會導致磷原子內擴散到晶體矽中，而使得 $iV_{oc}$ 降低。摻雜濃度對鈍化性能有較大影響，雜質濃度較低範圍內，鈍化性能會隨著摻雜濃度升高而改善，但到峰值後即開始隨著摻雜濃度升高鈍化性能急速下降。當摻雜濃度過高時，大量磷原子向晶體矽基材內擴散，擴散濃度高於固溶度則會造成死區(Dead Zone)，這說明了為何濃度高於一定值時， $iV_{oc}$ 會隨著摻雜濃度的提高而下降。2022年ITRPV對摻雜多晶矽製程方式做了技術趨勢預測，如圖四<sup>(6)</sup>。由圖中可以發現，目前主



▲圖四 多晶矽摻雜層沉積技術之趨勢預測<sup>(6)</sup>



▲圖六 穿隧氧化層能帶結構示意圖<sup>(8)</sup>



▲圖五 以LPCVD製備多晶矽繞鍍造成PN短路示意圖(彩圖請見材料世界網)

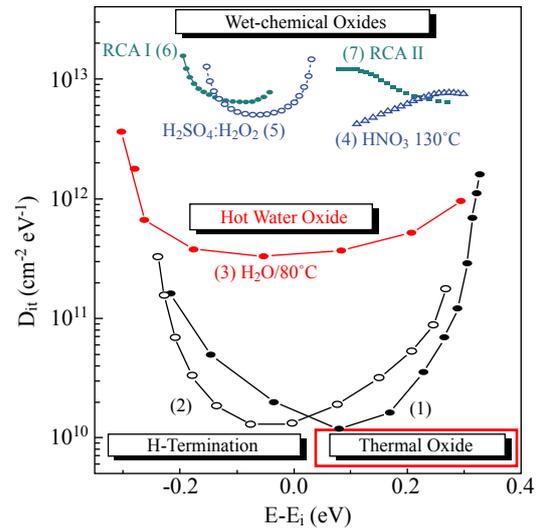
流的製程方法主要分為低壓化學氣相沉積 (Low Pressure Chemical Vapor Deposition; LPCVD) 以及電漿輔助化學氣相沉積 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition; PECVD) 兩種，占了95%以上之市占率。LPCVD由於技術較為成熟，量產性高，且設備費用相較於PECVD低廉，因此是目前的主流技術；但預估PECVD將會穩定成長，市占率在2029年後有望超越LPCVD，成為未來主流技術。市占率變化主要原因在於LPCVD沉積過程會有繞鍍問題產生，

如果繞鍍沒有去除乾淨，則會造成PN短路的問題產生，如圖五所示。因此太陽電池如使用典型管狀LPCVD沉積多晶矽，在製備過程即必須要解決繞鍍問題，額外的製程步驟不僅造成成本上升，解繞鍍的過程亦會使良率下降。反觀，PECVD幾乎沒有繞鍍問題，故預測未來無繞鍍將成為主要關鍵技術指標。最後，物理氣相沉積 (Physical Vapor Deposition; PVD) 之磁控濺鍍亦為目前熱門開發技術，該技術不僅無繞鍍問題，製程時間短具備量產能力，因此未來也將占有一席之地。

TOPCon另一關鍵的技術即是超薄穿隧氧化矽層 ( $\text{SiO}_x$ ) 的製備，穿隧氧化層厚度僅1~2 nm，通常作為絕緣層出現在半導體元件中。由於 $\text{SiO}_x$ 介電層非常薄，其與矽晶功函數的差異造成能帶彎曲，雖不會阻礙多數載子的傳輸但會阻礙少數載子達到界面，進而降低載子間的復合，如圖六<sup>(8)</sup>所示。但德國Institute for Solar Energy



Research in Hamelin (ISFH)研究單位發現<sup>(9)</sup>，因為 $\text{SiO}_x$ 非常薄，在製備過程中非常容易生成孔洞，載子通過 $\text{SiO}_x$ 傳導是量子穿隧效應，但其也可以通過孔洞直接穿過。孔洞的密度、大小、 $\text{SiO}_x$ 的厚度對最終的電池轉換效率都有直接的影響。載子通過孔洞傳導時， $R_s$ 下降、FF升高，電池轉換效率隨著孔洞密度的變化可達到一個最高值。但在高密度孔洞區域，所有的電池電性參數( $V_{oc}$ 、 $J_{sc}$ 、FF)會開始下降，導致效率降低，這是由於在純穿隧的情況下，光電特性會顯現出較高的電阻，因此會導致FF的降低。當有孔洞時，載子也可以直接穿過 $\text{SiO}_x$ ，因此 $R_s$ 會降低進而提高FF和效率。然而，孔洞密度過多也會降低鈍化性能以及提高表面復合問題，進而降低電池性能。因此， $\text{SiO}_x$ 厚度和孔洞密度之搭配是一個技術難點。鈍化接觸結構中 $\text{SiO}_x$ 為透過化學鈍化降低Si基材與多晶矽之間的界面缺陷態密度，減少界面缺陷所導致的載子復合。目前研究人員探索出一系列超薄氧化層的製備方法，現階段主要分為濕式氧化以及乾式氧化(熱氧化法)。圖七為德國Helmholtz Zentrum Berlin (HZB)探討以不同方式成長穿隧氧化層和介面缺陷態密度( $D_{it}$ )關係的實驗結果<sup>(10)</sup>，其中使用硝酸等濕式氧化法浸泡硝酸溶液來氧化矽晶片表面，相較於乾式氧化法，其速度較慢且薄膜品質較差， $D_{it}$ 值座落於 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}/\text{eV} \sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}/\text{eV}$ 間，且需要使用到大量的硝酸溶液。相反地，乾式氧化法是使用高溫氧化爐管進行熱氧化(Thermal Oxidation)的方式製作，在高溫氧化爐管中利用高純度



▲圖七 不同穿隧氧化層的形成方式之Si/SiO<sub>x</sub>介面缺陷態密度( $D_{it}$ )<sup>(10)</sup>

的氧氣，在高溫的製程環境下將矽晶片表面反應成氧化矽( $\text{SiO}_x$ )，熱氧化所成長的氧化矽層薄膜品質較佳， $D_{it}$ 值低，最佳值大約為 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}/\text{eV}$ 左右，且批次產能較高，是較有利於量產的製程方式。

為進一步提升電池效率，太陽電池技術路線從p型向n型轉變，啟動下一輪電池技術變革。TOPCon因其優異的高效率及兼容性，越來越受市場的關注，成為n型高效電池產業化的切入點。在經濟部能源局支持下，茂迪與工研院合作進行TOPCon技術開發，以不到兩年的時間將TOPCon電池與模組導入量產，於2021年正式進入市場，並於2022年擴產至200 MW。其獲得經濟部標準檢驗局國產下世代技術太陽能模組自願性產品驗證(Voluntary Product Certification; VPC)之認證首例，所製備的電池效率達23.5%，模組功率達400 W，並已

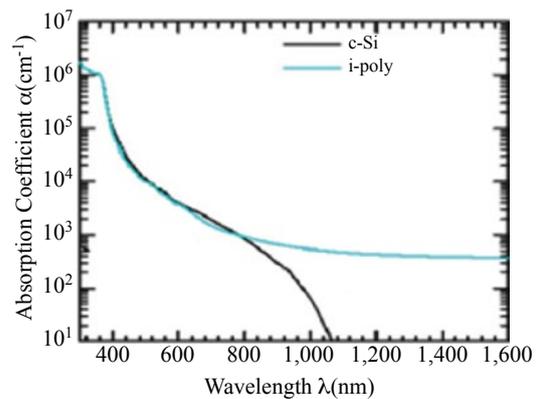
| $\eta_{max} (\%)$<br>$S_{e\&h}$ |                                    | Electron-selective Contacts |                         |                                                    |                                                    |        |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------|
|                                 |                                    | P-diffused $n^+$            | a-Si:H(i)/<br>a-Si:H(n) | th-SiO <sub>x</sub> /<br>poly-Si( $n^+$ )<br>PECVD | th-SiO <sub>x</sub> /<br>poly-Si( $n^+$ )<br>LPCVD |        |
| Hole-selective Contacts         | Al- $p^+$                          | 24.5(PERC)<br>11.7          | 26.8<br>12.8            | 26.9<br>12.8                                       | 27.1<br>12.9                                       | TOPCon |
|                                 | a-Si:H(i/p)                        | 24.7<br>11.8                | 27.5<br>13.2            | 27.7<br>13.3                                       | 27.9<br>13.5                                       | HIT    |
|                                 | SiO <sub>x</sub> /poly-Si( $p^+$ ) | 24.9<br>11.9                | 28.1<br>13.6            | 28.3<br>13.8                                       | 28.7<br>14.2                                       | biPC   |
|                                 | SiO <sub>x</sub> /Si:C ( $p^+$ )   | 24.9<br>11.9                | 28.0<br>13.5            | 28.2<br>13.7                                       | 28.5<br>14.0                                       |        |
|                                 | a-Si:H(i)/MoO <sub>x</sub>         | 24.4<br>11.7                | 26.5<br>12.6            | 26.6<br>12.7                                       | 26.8<br>12.8                                       |        |
|                                 | MoO <sub>x</sub>                   | 24.1<br>11.6                | 25.9<br>12.3            | 26.0<br>12.4                                       | 26.1<br>12.4                                       |        |

▲圖八 不同選擇性接觸太陽電池的理論效率<sup>(11)</sup>

於工研院台南六甲及新竹中興院區進行戶外驗證，粗估200 MW試量產電池及模組每年產值上看新台幣30億元，為台灣太陽能產業國際競爭力指標。

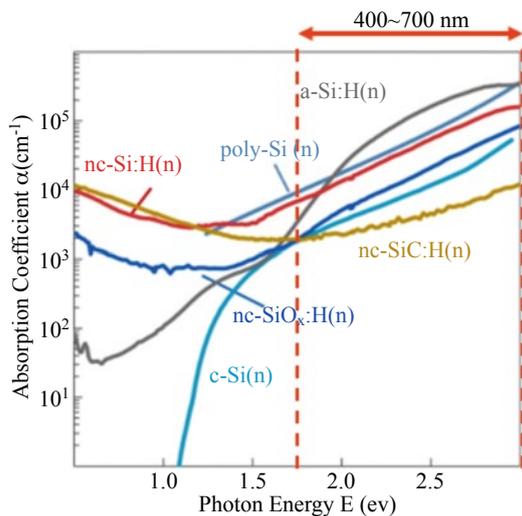
### 高效率雙面鈍化接觸太陽電池 實踐方法與其展望

鈍化接觸技術是未來太陽能產業最重要的研究標的，為了評估高效率太陽電池的效率潛能，德國知名太陽能研究機構ISFH基於載子選擇性的概念，對不同結構太陽電池的理論效率極限做了模擬計算<sup>(11)</sup>，如圖八所示，可以發現，傳統PERC電池理論效率為24.5%，而TOPCon電池理論效率可達27.1%。其中值得注意的是，雙面皆為鈍化接觸結構之太陽電池，其有更佳效率極限(28.2%~28.7%)，遠高於HIT



▲圖九 多晶矽與矽晶光學波段吸收圖

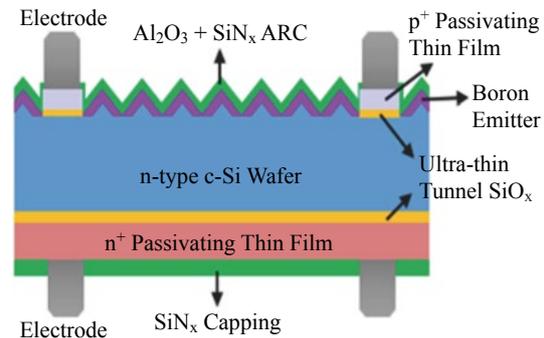
的27.5%，更接近晶體矽太陽電池理論極限效率(29.43%)<sup>(12)</sup>。然而，在太陽電池正面上使用摻雜多晶矽時，由於多晶矽與矽晶片本身的光學能隙相近，因此對於太陽光譜波段的吸收也相似(如圖九所示)，將導



▲圖十 不同材料光子能量與吸收係數關係圖<sup>(13)</sup>  
(彩圖請見材料世界網)

致相對較大的吸收損耗。基於正面吸光問題，若要實現雙面穿隧鈍化接觸(biPC)太陽電池，目前可藉由使用透光度更好的寬能隙鈍化接觸材料如碳化矽(SiC)，以降低吸收損耗，如圖十<sup>(13)</sup>所示，對於1.75 eV~3 eV之光子能量(波長400 nm~700 nm)的部分來說，碳化矽的吸收係數是最低的，也就是說相較於多晶矽、非晶矽以及氧化矽，碳化矽具有更佳的透光性。同時碳化矽又具有優異的表面鈍化特性，可大幅降低載子復合機率，因此非常適合用來取代傳統的多晶矽當作正面之鈍化接觸層，讓整體光電轉換效率更提升。

由於目前碳化矽製程成本較高，因此除了使用碳化矽等寬能隙材料形成穿隧鈍化堆疊層來取代傳統多晶矽層之外，許多研究單位將摻雜多晶矽局部使用在電極下方來提高化學鈍化與場鈍化效果，大幅降



▲圖十一 正面局部鈍化接觸太陽電池結構示意圖

低載子復合機率，使元件具備良好的光電特性，且可兼容於現行產線，此亦為另一實現雙面鈍化接觸太陽電池的方式，其結構如圖十一所示。

表一為目前國際上不同單位之雙面鈍化接觸(biPC)結構太陽電池的效率整理。biPC太陽電池目前尚在起步階段，其中以瑞士洛桑聯邦理工學院(École Polytechnique Fédérale de Lausanne; EPFL)之22.6%為目前最高(SiC)。配合政府達到2025年太陽光電設置量20 GW目標，太陽電池需具備高效率與低成本。高效率可降低系統設置的土地面積，效率每提升1%可節省4%到5%的用地，對於地狹人稠的台灣來說相當重要。國內目前尚無biPC技術，若能針對相關製程設備、元件結構、製程材料進行技術研發，利用廠商現有產線的PERC/TOPCon電池設備並結合新的雙面穿隧鈍化結構與鈍化電極之特有設計，可簡化製程與降低成本，著手布局未來3年至5年國內太陽電池市場所需之關鍵技術，創造產業競爭優勢。

▼表一 不同雙面鈍化接觸(biPC)結構之太陽電池技術Benchmark

| 單位                      | 結構                                                                              | 效率        | 鈍化層薄膜製程方式 |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| ANU                     | n <sup>+</sup> poly Si/c-Si/p <sup>+</sup> poly Si                              | η = 20.2% | PECVD     |
| TU Delft                | n <sup>+</sup> poly SiC <sub>x</sub> /c-Si/p <sup>+</sup> poly SiC <sub>x</sub> | η = 19.3% | PECVD     |
| SERIS                   | n <sup>+</sup> poly Si/c-Si/p <sup>+</sup> poly Si                              | η = 19.6% | LPCVD     |
| Tempress + YingLi Solar | p <sup>+</sup> poly/c-Si/n <sup>+</sup> poly                                    | η = 20.6% | PECVD     |
| ISFH                    | n <sup>+</sup> poly Si/c-Si/p <sup>+</sup> poly Si                              | η = 22.3% | PECVD     |
| EPFL                    | n <sup>+</sup> poly SiC <sub>x</sub> /c-Si/p <sup>+</sup> poly SiC <sub>x</sub> | η = 22.6% | PECVD     |

## 結 論

太陽光電產業已是薄利產業，主宰價格的矽晶電池是難以取代的主流產品，因此低成本意味著發電成本更具競爭力，是市場使用者評估是否採用的標準。近年來，由於n型晶片的製造成本逐漸下降至與p型晶片相近，日漸凸顯n型電池的競爭優勢。

為達到太陽電池理論和實際製程的極限，實現更高效率，單晶矽太陽電池技術的關鍵是減少電極接觸的復合損耗。因此期望能發展出能同時鈍化單晶矽表面與僅選擇性提取一種電荷載子（即電子或電洞）的接觸結構，以降低電子與電洞相遇的機率，減少載子復合的發生。這種復合損耗已是太陽電池效率發展的主要限制因素，實現優異的鈍化接觸結構已成為矽晶太陽電池重要的研究目標。目前工研院已經發展適用於鈍化接觸應用的多種材料和結構，其中成效最顯著的TOPCon電池即是基於SiO<sub>x</sub>/poly-Si兩層堆疊之結構。這種鈍化接觸結構通常先通過化學或熱氧化法生長超薄氧化物，在單晶矽/氧化物介面處提供化學鈍化，從而降低D<sub>it</sub>值，並做為從元

素由摻雜多晶矽擴散到矽晶片的障礙/保護層，但仍能使電荷從單晶矽漂移(Drift)到多晶矽，實現所需的載子的選擇性。在經濟部能源局支持下，茂迪與工研院所合作進行開發之TOPCon電池與模組皆已導入量產並積極擴產。

最後，更高效率之biPC電池可由現行的主流PERC以及TOPCon產線進行升級，且其電池的理論效率為28.7%，非常接近晶體矽太陽電池之理論極限效率29.43%，未來具有巨大潛力。若能提升此技術之穩定性與價格競爭力，提高光電轉換效率同時有效降低成本，將會使得低成本高效率太陽電池不再只是空談，而是具有商業化的可能性。再加上製造成本逐年下降的n型晶片，只要持續改進電池性能，就有可能主導太陽光電市場發展及創造產業競爭優勢。☒

## 誌 謝

本研究工作承蒙111年度經濟部能源局對「高效率、智慧型太陽光電產品開發計畫(1/3)」(契約編號：111-S0102)經費支持，特此致謝。



## 參考文獻

1. J. Schmidt, A. Merkle, R. Brendel, B. Hoex, and B. Hoex, "Surface passivation of high-efficiency silicon solar cells by atomic-layer-deposited  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ," *Progress in Photovoltaics* 16, 461 (2008).
2. T. Dullweber, S. Gatz, H. Hannebauer, T. Falcon, R. Hesse, J. Schmidt, et al., "Towards 20% efficient large-area screen-printed rear-passivated silicon solar cells," *Progress in Photovoltaics* 20, 630 (2012).
3. B. Hallam, A. Uruena, R. Russell, M. Aleman, M. Abbott, C. Dang, et al., "Efficiency enhancement of i-PERC solar cells by implementation of a laser doped selective emitter," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 134, 89 (2015).
4. A. Metz, D. Adler, S. Bagus, H. Blanke, M. Bothar, E. Brouwer, et al., "Industrial high performance crystalline silicon solar cells and modules based on rear surface passivation technology," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 120, 417 (2014).
5. W. Deng, D. Chen, Z. Xiong, P. Jacques, J. Dong, F. Ye, "20.8 percent of p-type multicrystalline PERC solar cell on 156 mm-156 mm p-type multicrystalline silicon substrate," *IEEE Journal of Photovoltaics* 6, 3 (2016).
6. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 13th edition, VDMA, 2022.
7. G. Conibeer, "Third-generation photovoltaics," *Materialstoday* 10(11), 42 (2007).
8. Y. Tao, V. Upadhyaya, K. Jones, A. Rohatgi, "Tunnel oxide passivated rear contact for large area n-type front junction silicon solar cells providing excellent carrier selectivity," *AIMS Materials Science* 3, 180 (2016).
9. F. Haase, C. Hollemann, S. Schäfer, A. Merkle, M. Rienäcker, J. Krügener, R. Brendel, R. Peibst, "Laser contact openings for local poly-Si-metal contacts enabling 26.1%-efficient POLO-IBC solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 186, 184 (2018).
10. [https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/arbeitsgebiete/heteroemittersolarzellen/oberflaechen/oberflaechen\\_en.html](https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/arbeitsgebiete/heteroemittersolarzellen/oberflaechen/oberflaechen_en.html)
11. J. Schmidt, R. Peibst, R. Brendel "Surface passivation of crystalline silicon solar cells: Past, present and future", *Silicon PV* (2019).
12. A. Richter, M. Hermle, S. W. Glunz "Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3, 1184 (2013).
13. M Köhler, M Pomaska, P Procel, R Santbergen, A Zamchiy, et al., "A silicon carbide-based highly transparent passivating contact for crystalline silicon solar cells approaching efficiencies of 24%", *Natural Energy*, 6, 529 (2021).