

# 交指式背接觸太陽電池概述與展望

張瀚丞 博士/工研院 綠能所 太陽光電技術組, 研究員

自背接觸太陽電池的概念被提出以來，便由於其結構特性帶來的許多優點而成為太陽能領域的熱門研究項目。最早發展的背接觸太陽電池稱為交指式背接觸電池，係指電池正面無電極、正負兩極金屬導線呈指狀交叉排列於電池背面。IBC電池最大的特點是PN接面結和金屬接觸都處於電池的背面，正面沒有金屬電極遮蔽的影響，具有更高的短路電流，背面可容許較寬的金屬線來降低串聯電阻，從而提高填充因子。加上電池前表面電場及良好鈍化作用帶來的開路電壓增益，使得這種正面無遮擋的電池不僅轉換效率高，外型較美觀，全背電極電池模組更易於接線裝配。在本文章中，我們將介紹交指式背鈍化接觸太陽電池，一種具有鈍化接觸結構的新型背接式異質接面型太陽電池的實踐方法與其元件整合。

## 一、前言

隨著市場對太陽電池效率之要求越來越高，使得p型(p-type)矽晶太陽電池在效率瓶頸困境越發明顯，而n型(n-type)矽單晶太陽電池具有高載子壽命、無光致衰減等優點，有利於提升效率及穩定性，成為太陽光電領域的新興研發熱點。根據2021年國際太陽光電技術路線圖(International Technology Roadmap for Photovoltaic, ITRPV)的市調結果顯示(圖1)，以n型矽晶圓為基材所製作的指標性高效率電池有二：異質接面 ( Heterojunction with Intrinsic Thin layer, HIT ) 太陽電池以及背接觸太陽電池 ( Back Contacted solar cells, BCsc )，根據這兩種結構製作的n型電池均可達到23%以上的轉換效率。其中，背接觸太陽電池可與現行的網印製程兼容，相較於HIT電池具有低成本的生產潛力。

根據ITRPV的年度報導，在未來十年內，背接觸太陽電池的市佔率將逐步提升至20%-30%[1]，原因有二：一是n型晶圓的生產成本水平逐漸與p型晶圓相當；二則是n型電池的生產技術逐漸成熟所致。本文首先將回顧並背接觸矽晶太陽電池的基本操作原理與關鍵特性，後半段則著墨於工研院綠能所矽基太陽電池研究室所研發的IBPC，將現行的主流穿隧氧化鈍化接觸技術(tunnel oxide passivated contact, TOP-Con)，導入高效率低成本之IBC ( Interdigitated Back Contact ) 電池製程。

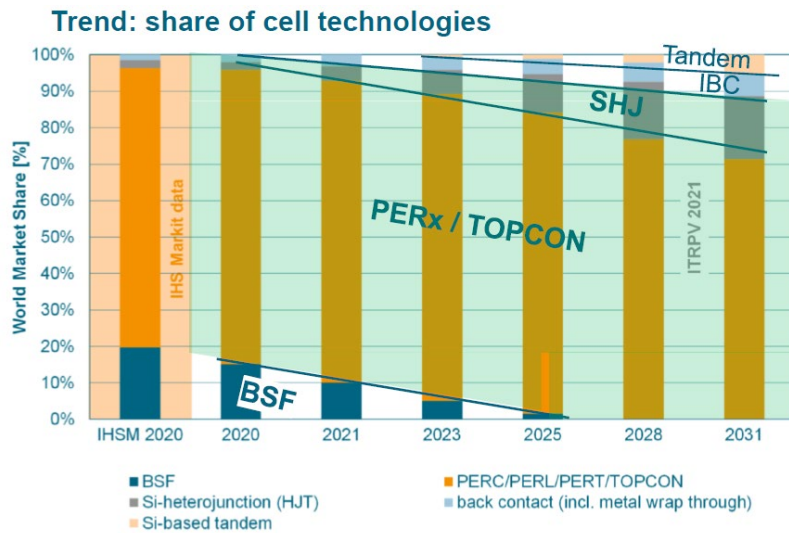


圖1、全球太陽電池技術市佔率預測[1]

## 二、背接觸太陽電池回顧

IBC 電池的結構概念最早在1977年被 Lammert 和 Schartz 提出[2]，圖2顯示 IBC 電池的截面與電極佈局示意圖。IBC 電池結構有以下幾項特點：第一為受光面電極的移除，這除了可以消彌傳統電池無可避免的遮光損失外，同時更可以透過製程的改善將受光表面的鈍化效果最佳化；第二為正、負電極的同面化(在背接觸電池結構中，正負電極均位於電池背面)，這樣的電極佈局帶來的好處有二：一是可以透過最適化的電極比例調配，在現有的材料參數下得到最佳化的電學與鈍化特性；二是在模組化階段，由於正、負電極都位於同一側，故焊接程序比起傳統電池要更為容易。1986 年 Sinton 等人在 IBC 電池中引入「點接觸」技術，透過將金屬接觸面積縮小而達到降低復合電流的效果，大幅提升了電池的開路電壓[3]。

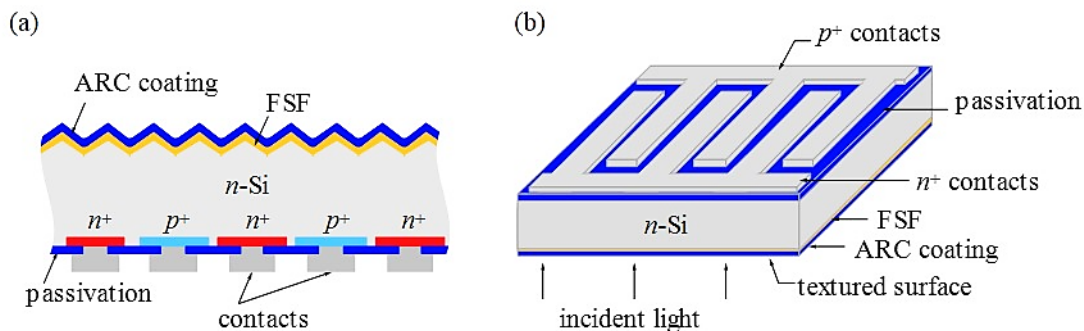


圖2、IBC 電池之(a)截面圖示與(b)電極佈局

對具有背接觸結構的太陽電池而言，光生載子必須有足夠長的擴散長度以保證可以從生成處移動至相應的電極端，由相應電極收集後透過外部電路產生光電流。擴散長度的定義為  $(D_{\tau_{\text{bulk}}})^{1/2}$ ，其中  $D$  為少數載子的擴散係數，由晶片的摻雜量決定； $\tau$

bulk 則代表晶片內部少數載子的生命週期。也就是說，為了最大化載子的收集能力，高的晶片存活期(bulk lifetime)儼然是製作背接觸電池的第一先決條件。一般來說，典型的高效率背接觸電池的製造流程大致如下描述：(1) n 型晶圓經蝕刻步驟形成具組織化的光陷阱結構以提升進光量，(2)再由蝕刻製程拋光晶圓背面，(3)分別利用高溫與低溫之  $\text{POCl}_3$  製程形成背表面電場(BSF)以及前表面電場 ( Front Surface Field, FSF )，(4)透過黃光微影與局部蝕刻步驟定義射極區域，(5)再以高溫硼擴散製程形成 p+ 射極，(6)電池正面鍍製抗反射層、背面鍍製鈍化層，(7)微影定義點接觸金屬面積，(8)最後以濺鍍或蒸鍍方式製作金屬電極。

第一個商業化的 IBC 電池由美國 SunPower 公司達成，截至目前2021已研發了六代電池，最新的 M 系列 (M-Series) 模組就是由66片新型IBC 電池 Maxeon® Gen6 組成。Maxeon® Gen6電池應用 n 型 CZ 矽晶片。模組效率經 NREL 認證可達24.1%，這是現行全球太陽光電模組的最高效率紀錄，而模組的輸出功率溫度係數低至  $-0.29\%/^{\circ}\text{C}$ ，功率大於400W。SunPower 公司的 IBC 電池的結構示意圖如圖3[4]，其製造流程大致上與上述的典型高效率背接觸電池相似，惟在背面的結構設計上有些許不同。透過預先鍍製鋁金屬於背面鈍化層上以增益電池內反射，緊接著透過電鍍製程 ( Ni/Cu ) 形成良好的歐姆接觸與降低電池串聯電阻，最後電池在退火程序形成 Ag/Cu 接觸後製作完成。

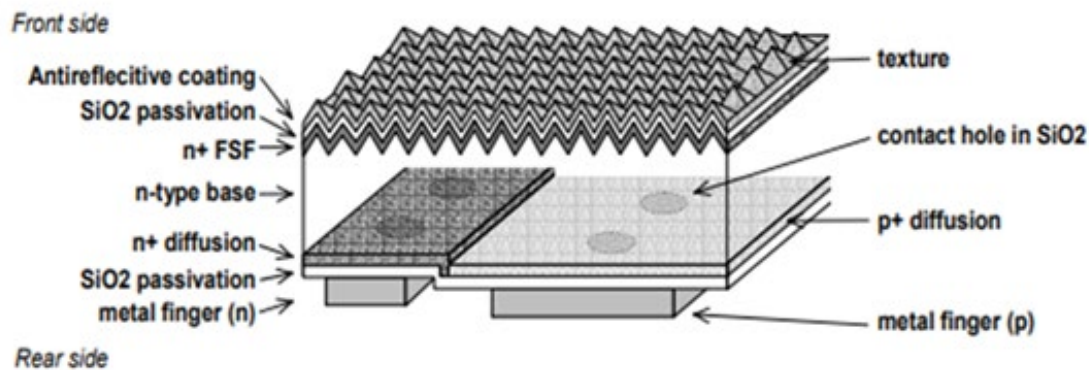


圖3、SunPower IBC 電池結構示意圖

一個好的 FSF 不僅可以增進在 UV 光照下的鈍化品質，同時在低照度情形下也可獲得線性的電流響應[5]。Gong 研究團隊曾針對 FSF 的摻雜輪廓進行過詳盡的研究，發現較淺且淡的 FSF 結構可使電池短路電流得到最大的增益[6]。對 IBC 電池而言，短路電流除了受到 FSF 的影響之外，單位電池的寬度(cell pitch size)與射極面積也是決定短路電流的關鍵參數。針對這個議題，Kluska 研究團隊就曾指出為了在 IBC 電池中達到最大化的短路電流，射極面積應介於單位電池寬度的70%-80% [7]。

對太陽光電產業來說，不管對現階段或是可預見的未來，實現低成本製作高效率的太陽電池都是不可或缺的趨勢。為了加速這個趨勢的進程，過去十年內透過現行成熟技術實現低成本電池製程都已被大量的研究，諸如常見的爐管擴散、濕式蝕刻、PECVD 氧化物/氮化物沉積、雷射熔蝕、網印製程與網印式的鋁矽合金化射極等等均在此列[6, 8-13]。這些製程改善的目的只有一個，便是透過低成本的製造技術常態性的量產轉換效率在20%之上的 IBC 電池[14]。總地來說，IBC 電池的製程門檻雖然受限於高的晶片生命週期要求，但由於晶片阻值與晶片厚度對效率的影響較小，因此平衡了晶片的固有成本[15, 16]。

### 三、交指式背鈍化接觸太陽電池製程整合

工研院綠能所矽基太陽電池研究室自2018年開始新型IBPC ( Interdigitated Back Passivated Contact ) 技術開發，以具有新型異質接面的背接式鈍化接觸太陽電池為開發重點。利用近年異質接面技術開發新主流的穿隧氧化鈍化接觸電池的製造技術，並透過新電極圖案及結構設計突破IBC在成本及尺寸瓶頸。採用傳統的爐管方式，解決設備昂貴及良率不佳的問題。在圖形化方面，建置多功能雷射開線平台與網印對位平台。在鈍化接觸技術方面，利用可批次生產的穿隧氧化層與多晶矽來達到優異的表面鈍化效果。針對新型IBPC太陽電池開發，技術重點包括：（1）背電極圖形最佳化設計：降低電極厚度，縮短製程時間，增加良率，（2）鈍化接觸技術開發：採用多晶矽鈍化技術取代擴散製程，改善均勻性並降低成本，（3）對位精準度技術開發：射極與金屬電極接觸面積增加使串聯電阻下降、填充因子上升。

我們首先找尋可以模擬交指式背接觸 ( IBC ) 和異質接面 ( HJT ) 太陽電池的軟體。在已知的異質接面太陽電池結構，由於沉積的非晶矽 ( a-Si ) 層有更好的表面鈍化，使得元件能有較高的開路電壓 (  $V_{oc}$  ) 和短路電流 (  $J_{sc}$  )，但往往導致非常低的填充因子 ( FF )，而IV曲線圖呈現“S”形。因此我們將提出新的IBPC太陽電池結構，通過二維數值模擬 ( 2D simulation ) 軟體所提供的界面缺陷 ( interface defect ) 與接面能帶 ( junction energy band ) 參數進行元件特性模擬。更針對單層及多層結構特性，確定重要參數之設定是否恰當。結合實驗結果與模擬可以解析IBPC太陽電池所需改進的相關參數，進而簡化實驗的數量與確立達到25%效率所需之各項參數，並提供實驗規劃的方向。圖4顯示多晶矽鈍化的背接式太陽電池結構，結構分為5大區塊，包含：（1）前電場鈍化區、（2）n-type多晶矽鈍化區 ( n+ poly-Si )、（3）p-type多晶矽鈍化區 ( p+ poly-Si )、（4）間隙鈍化區、（5）電極與多晶矽接觸區。針對不同的區域，需設計不同的實驗以獲得所需的參數。所需的參數包含：影響太陽電池效率的各項因子，光學與電性的影響。效率計算的公式如下所示：



$$\eta = FF \times V_{OC} \times J_{SC} / P_{IN}$$

其中  $FF$  為填充因子， $V_{OC}$  為開路電壓， $J_{SC}$  為短路電流， $P_{IN}$  為輸入功率。填充因子由串聯與並聯阻抗所影響，開路電壓則由晶片載子復合所影響，短路電流則由光學特性與載子的復合所影響。藉由輸入各區塊的參數，可分析各區塊對太陽電池效率各因子的影響。

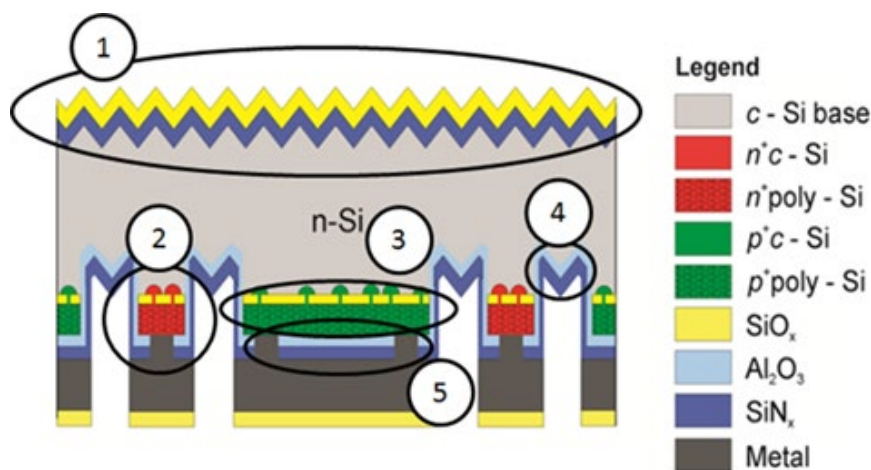


圖4、多晶矽鈍化的 IBPC 太陽電池結構最重要的5個部分

區塊①為晶片受光面的鈍化與光學抗反射的特性，採用  $\text{SiN}_x$  與  $\text{SiO}_x$  兩層結構。實驗設計上可以製作雙面具有金字塔的晶片，沉積  $\text{SiN}_x$  與  $\text{SiO}_x$ ，萃取鈍化參數逆向飽和電流 ( $J_0$ ) 與少數載子存活時間 (lifetime)。藉由光學量測可獲得折射係數與消光係數，做為光學特性模擬的參數，並針對雙層抗反射薄膜進行材料特性與厚度的最佳化。區塊②n 型多晶矽鈍化區 ( $n^+\text{poly-Si}$ ) 與區塊③p 型多晶矽鈍化區 ( $p^+\text{poly-Si}$ ) 可藉由氧化層製作，沉積 n 型或 p 型多晶矽於氧化層上，進行參數萃取。參數包含鈍化特性與薄膜片電阻 (sheet resistance) 與接觸電阻 (contact resistance)。鈍化特性包含：逆向飽和電流、與少數載子存活時間，用來決定鈍化效果，影響開路電壓。片電阻與接觸電阻則影響了填充因子，影響這兩個因子的參數包含了氧化層的厚度、摻雜層的厚度、摻雜層的濃度與電極接觸面積的大小 (區塊⑤)。除此之外， $n^+\text{poly-Si}$  與  $p^+\text{poly-Si}$  的寬度比例會影響載子收集的效果。晶片吸收太陽光後會產生電子-電洞對， $n^+\text{poly-Si}$  用以收集電子，而  $p^+\text{poly-Si}$  用以收集電洞。電子在內建電場作用下漂移(drift)移動到達電極，因此拉大  $n^+\text{poly-Si}$  的間距會造成阻值的增加，影響填充因子。相對地， $p^+\text{poly-Si}$  收集電洞，電洞為少數載子，主要以擴散

(diffusion)方式移動到達電極，故  $p^+$ poly-Si 的寬度與距離會影響載子的復合。當  $p^+$ poly-Si 區域降低或間距拉大時，會造成載子無法擴散至  $p^+$ poly-Si 區域而收集效率差，影響短路電流。因此在幾何寬度與密度的設計上，可藉由模擬來最佳化。區塊④為間隙鈍化層，間隙的鈍化效果會影響開路電壓，因此藉由此結構可以獲得鈍化相關的參數、少數載子存活時間與逆向飽和電流。從參數結構之分析結果獲得所需的參數，進行模擬分析，有助於進一步提升電池效率，了解技術需改善的方向，持續朝高效率太陽電池研發前進。

目前工研院綠能所矽基太陽電池研究室製作之 IBPC 太陽電池元件利用  $n^+$  poly Si 作為鈍化電極，可以減少 IBPC 元件吸光後的載子復合現象，因此表面鈍化將是元件製作的首要目標。在背電極的製作上，採用雷射開孔及網印金屬的技術。雷射開孔的目的是為了破壞介電層，使導電層與網印金屬能獲得良好接觸降低元件串聯電阻。由於正負電極皆位於背光面，因此如何降低雷射開孔的誤差，則能有效避免電極短路的問題。由於雷射製程是在大氣環境下進行，在熔蝕過程中矽晶片表面會與周遭氣氛中的氧氣反應進而生成矽氧化層，需透過氫氟酸 (hydrofluoric acid, HF) 將這層氧化物移除。經過製程優化後，目前 IBPC 電池元件最終效率達24.03 %。

#### 四、結論

太陽光電產業是薄利產品，因此主宰價格的矽晶電池將會是永遠無法取代的主流產品。傳統IBC太陽電池效率雖可>25%，但製程複雜，難被產業界接受，因此工研院綠能所矽基太陽電池研究室開發低成本高效率之簡易新型IBPC太陽電池，引入TOPCon技術，節省製程時間及設備投資，增進鈍化效果，達到高效率要求。並且以雷射及網印技術避開黃光微影技術，同時兼顧效率及成本考量，目前新型電極圖案化設計之IBPC電池效率達到24.03%，已具產業化潛力，這使得大面積的低成本高效率IBPC電池不再只是空談，而是具有商業化的可能性，我們認為只要能持續改進電池性能就有可能主宰太陽光電市場。

新型IBPC太陽電池開發是我們研究室擴大前期計畫TOPCon太陽電池技術成果，朝下一代有潛力的產業技術所規劃，技術較創新、困難度較高。短期佈局於掌握核心技術及關鍵設備，低成本的圖案化技術是其中重要項目，目前亦與設備業者合作開發IBPC電池所需之精密圖案化網印及低損傷雷射劃線設備，連結國產化設備開發。另外導入多種電極形成技術，延伸電池技術結構專利及設備整合，促成短時間內從TOPCon升級至IBPC電池模組商業化量產，期望能增加台灣太陽能電池業者在國際市場上的競爭力。

## 五、參考資料

- [1] International Technology Roadmap of Photovoltaic ( ITRPV ) 2021.
- [2] M.D. Lammert and R.J. Schwartz, "The interdigitated back contact solar cell: a silicon solar cell for use in concentrated sunlight," IEEE Transactions on Electron Devices 24(4), 337 (1997).
- [3] R.A. Sinton, Y. Kwark, J.Y. Gan, and R.M. Swanson, "27.5 percent silicon concentrator solar cells," IEEE Electron Device Letters EDL-7(10), 567 (1986).
- [4] W.P. Mulligan, D.H. Rose, M.J. Cudzinovic, D.M. De Ceuster, K.R. McIntosh, D.D. Smith, and R.M. Swanson, "Manufacture of solar cells with 21% efficiency," Proceeding of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 387, ( 2004 ) .
- [5] F. Granek, M. Hermle, C. Reichel, O. Schultz-Wittmann, S.W. Glunz, "High-efficiency back-contact back-junction silicon solar cell research at Fraunhofer ISE," Proceeding of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 991 (2008).
- [6] C. Gong, E. Van Kerschaver, J. Robbelein, T. Janssens, N. Posthuma, J. Poortmans, and R. Mertens, "Screen-printed aluminum-alloyed p+ emitter on high-efficiency n-type interdigitated back-contact silicon solar cells," IEEE Electron Device Letters 31(6), 576 (2010).
- [7] S. Kluska, F. Granek, M. Rüdiger, M. Hermle, S.W. Glunz , "Modeling and optimization study of industrial n-type high-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells," Solar Energy Materials and Solar Cells 94, 568 (2010).
- [8] R. Bock, S. Mau, J. Schmidt, and R. Brendel, "Back-junction back contact n-type silicon solar cells with screen-printed aluminum-alloyed emitter," Applied Physics Letters 96, 263507-1 (2010).
- [9] C. Gong, S. Singh, J. Robbelein, N. Posthuma, E.V. Kerschaver, J. Poortmans, and R. Mertens, "High efficient n-type back junction back-contact silicon solar cells with screen-printed al-alloyed emitter and effective emitter passivation study," Progress Photovoltaics 19, 781 (2010).
- [10] R. Woehl, J. Krause, F. Granek, and D. Biro, "19.7% efficient all-screen-printed back-contact back-junction silicon solar cell with aluminum-alloyed

- emitter," IEEE Electron Device Letters 32(3), 345 (2011).
- [11] R. Woehl, J. Krause, F. Granek, and D. Biro, "Highly-efficient all-screen-printed back-contact back-junction silicon solar cells with aluminum-alloyed emitter," Energy Procedia 8, 17 (2011).
- [12] R. Woehl, M. Rüdiger, and D. Biro, J. Wilde, "All-screen-printed back-contact back-junction silicon solar cells with aluminum-alloyed emitter and demonstration of interconnection of point-shaped metalized contacts," Progress Photovoltaics 23, 226 (2015).
- [13] G. Scardera, D. Inns, D. Wang, S. Dugan, J. Dee, T. Dang, K. Bendimerad, F. Lemmi, and H. Antoniadis, "All-screen-printed dopant paste interdigitated back contact solar cell," Energy Procedia 77, 271 (2015).
- [14] F.J. Cataño, D. Morecroft, M. Cascant, H. Yuste, M.W.P.E. Lamers, A.A. Mewe, I.G. Romijn, E.E. Bende, Y. Komatsu, A.W. Weeber, and I. Cesar, "Industrially feasible >19% efficiency IBC cells for pilot line processing," Proceeding of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Valencia, Spain, 1038 (2011).
- [15] F. Granek, M. Hermle, D.M. Huljić, O. Schultz-Wittmann, and S.W. Glunz, "Enhanced lateral current transport via the front n+ diffused layer of n-type high-efficiency back-junction back-contact silicon solar cells," Progress Photovoltaics 17, 47 (2009).
- [16] F. Granek, "High-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells," Ph.D. thesis (2009).