

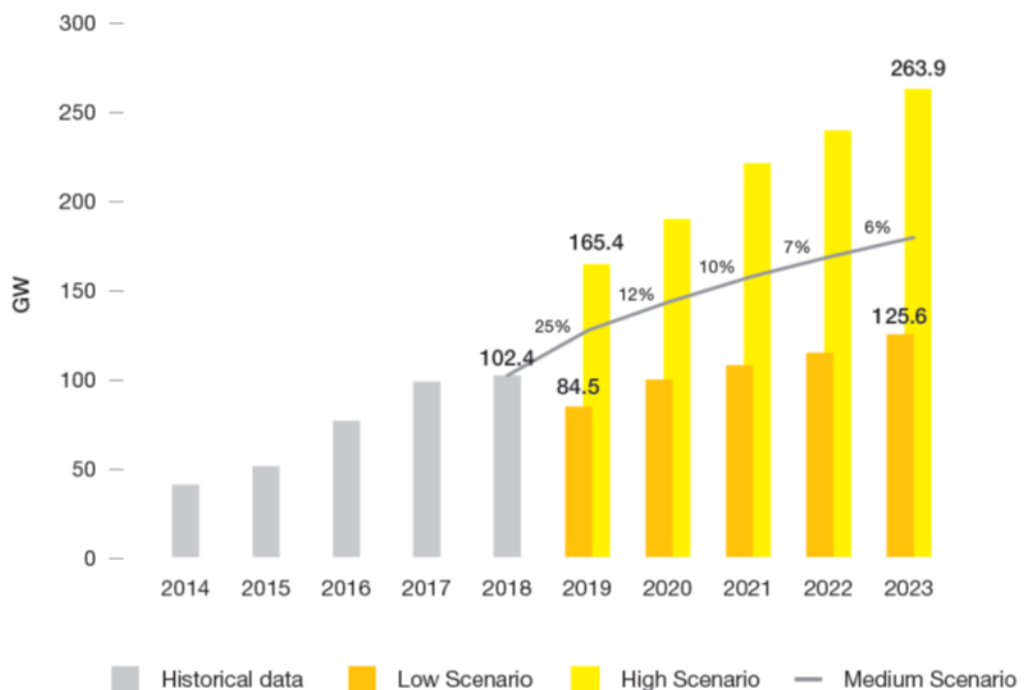
PERC與TOPCon太陽電池技術比較與成本分析

陳松裕博士 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 研究員

全球太陽能市場逐年成長，去年安裝量已超過100GW，2019年更上看120GW，其中有9成以上為矽晶太陽電池。針對矽晶電池技術市佔率，研調機構ITRPV於2019年報告中指出背面鈍化太陽電池家族(PERx)已成為高效太陽電池主流，內文中亦首度出現鈍化接觸(passivated contact)，顯示穿隧型鈍化接觸電池(TOPCon)將開始逐漸取代現有的PERC電池，加上其與現有PERC生產線整合成本相對較低，故極具競爭優勢。內文將著重介紹PERC與TOPCon的技術差異與製造成本的量化分析。

一、前言

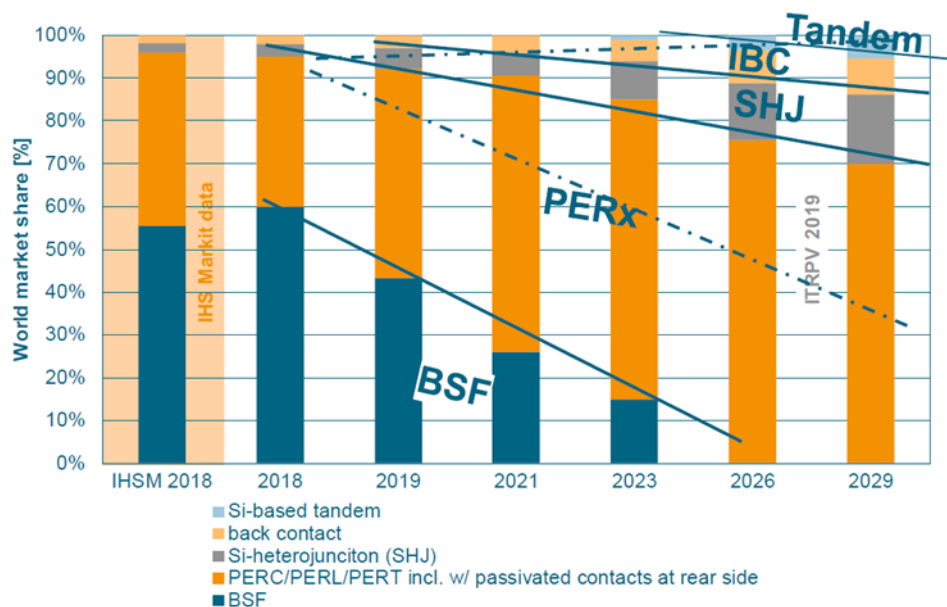
有別於傳統石化能源，太陽能是一永續、潔淨的再生能源，只是能源密度相對較低。由於石化能源的過度開發，造成了空氣汙染、溫室氣體效應、氣候變遷等議題，已衝擊到地球的生態環境，也造成人類對環保意識的覺醒，近年來的各國發起簽訂的京都議定書、巴黎協定及許多政府對太陽光電提出有效的獎勵補助政策，促成了太陽光電產業蓬勃發展。圖1為全球PV從2014~2018年的年裝設量及至2023年的預測。由圖中可看出2018年雖然受到大陸531政策的影響，造成市場的成長幅度放緩，但年裝設量仍超過102.4GW。而以長遠來看，整體需求仍維持持續成長中。



資料來源：SolarPower Europe, 2019

圖1、全球PV年裝置容量及預測

目前矽晶太陽電池的成本結構，已來到現階段技術開發所能到達的極致，在市場競爭與能源供需的雙重要求之下，亟需尋求更新的技術以突破現況；針對電池效率提升的技術而言，大多數仍止於原有技術的改良，少數則嘗試用新材料來克服傳統材料對太陽電池效能的限制，然而這些技術是否具有量產可行性、穩定性、與價格競爭力，是各種技術評價的主要指標，在提高光電轉換效率且同時有效降低成本，將是未來太陽光電發展的重點方向。根據2019年ITRPV的技術趨勢分析，從今年開始，背面鈍化太陽電池家族(PERx)市佔率接近5成，已超過AI-BSF電池，成為市場主流結構。其今年亦首度將鈍化接觸(passivated contact)包含在裡面，顯示TOPCon將開始逐漸與現有PERC結構整合，主要原因在於此技術可以現有PERC設備為基礎，降低投資成本開發出更具競爭力的產品。



資料來源：ITRPV, 2019

圖2、太陽電池技術市佔率預估

二、電池技術比較

圖3為太陽電池市場中演變的電池結構比較圖，包含過去傳統的 AI-BSF 電池、新一代標準的 PERC 電池以及未來有機會取代 PERC 的 TOPCon 電池。傳統的 AI-BSF 電池結構如圖3(a)所示，其正背面金屬皆直接與矽晶片接觸，使得接觸介面複合嚴重，正面載子飽和電流密度 J_0 約為 $800 \sim 1000 \text{ fA/cm}^2$ ，背面載子飽和電流密度 J_0 $400 \sim 800 \text{ fA/cm}^2$ ，導致開路電壓難以超過 680 mV ；PERC 電池結構如圖3(b)所示，與 AI-BSF 電池的主要差異在於矽晶背表面增加介電層($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiNx}$)進行鈍化，並將原本與矽晶接觸的

整面電極改為局部接觸電極，可將背面載子飽和電流密度 J_0 降到 200 fA/cm^2 以下，開路電壓提升至 $680 \text{ mV} \sim 690 \text{ mV}$ 。由於 PERC 電池背面電極區域的載子複合仍過高，因而德國 Fraunhofer ISE 於2013年提出將鈍化接觸應用於電池上，即為圖3(c)的 TOPCon 電池結構，其背面鈍化藉由超薄穿隧氧化層與摻雜的多晶矽層來實現，電極僅與多晶矽層接觸，載子利用穿隧效應傳導避免了金屬-半導體的嚴重複合。

TOPCon 電池可選用 p-type 或 n-type 晶片製作，然而 P-TOPCon 背面如採用 $\text{SiOx/p-poly Si/SiNx}$ ，飽和電流密度 J_0 約為 $10 \sim 30 \text{ fA/cm}^2$ ，其鈍化能力略低於 PERC 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiNx}$ ($J_0 \leq 10 \text{ fA/cm}^2$)，雖因電極區域為鈍化接觸整體效果略優於 PERC，然優勢有限；而正面如果採用 n-poly Si 作為射極，會因吸光問題導致電流過低，如電極部分採用局部 n-poly Si 鈍化則有相當高的技術門檻，再再顯示 P-TOPCon 問題頗多，這也是為何廠商幾乎都聚焦在 N-TOPCon 電池的開發。

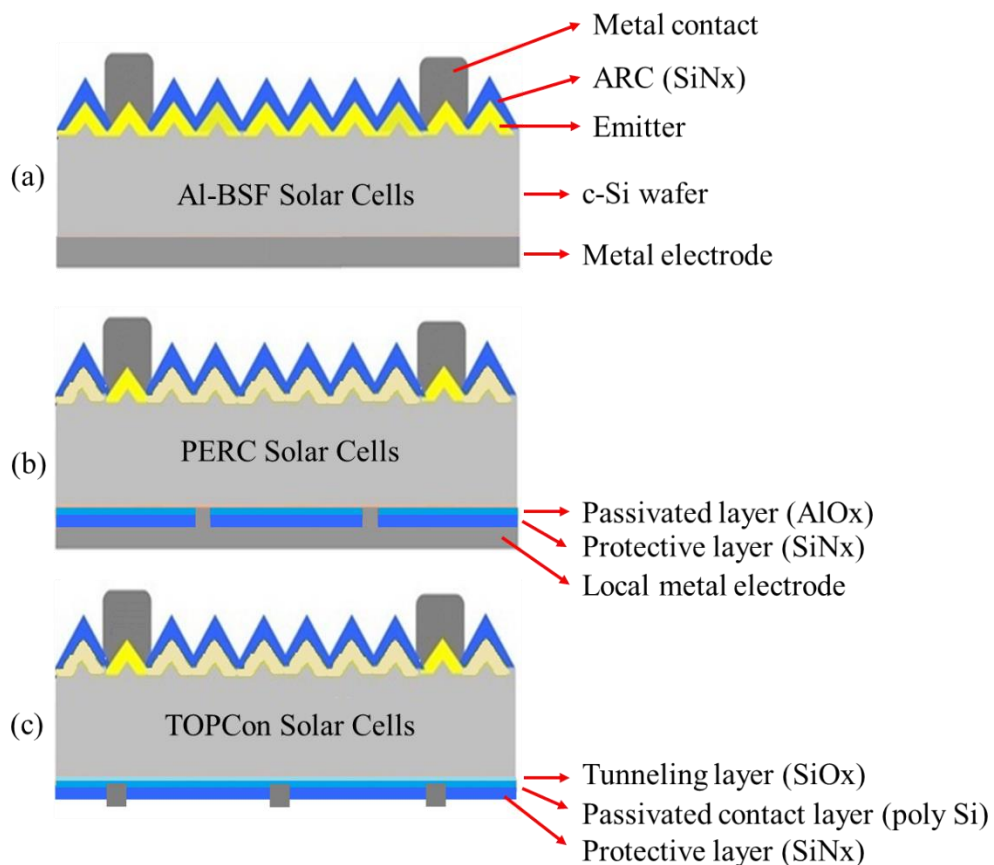


圖3、電池結構比較圖

德國研究機構 ISFH 於2019年 Silicon PV 會議上提出了矽晶表面鈍化的理論極限效率如下圖4所示。針對不同材料的接觸電阻與鈍化效果，定義了材料的電子/電洞選擇性接觸能力，左上的 PERC 電子/電洞選擇性為 P-diffused n+與 Al-p+，其理論效率可達 24.5%，如將其電洞選擇性材料改為 SiO_x/poly-Si(p+)，絕對效率僅增加了0.4%，達到 24.9%，此即為 P-TOPCon 電池；如果將 PERC 的電子選擇性材料改為 th-SiO_x/poly-Si(n+)，效率可大幅提升2.4%~2.6%，理論效率為26.9%~27.1%，此即為 N-TOPCon。特別注意到 ISFH 表示電子/電洞選擇性接觸材料分別為 SiO_x/poly-Si(n+)與 SiO_x/poly-Si(p+)時，效率極限可達到28.2%~28.7%之間，此數值遠高於 HIT 的27.5%與 PERC 的 24.5%，已非常接近矽晶太陽電池理論極限效率29.3%~29.4%，顯示鈍化接觸技術的巨大潛力。

$\eta_{\max} [\%]$ $S_{e\&h}$		Electron-selective contacts						
		P-diffused n ⁺	a-Si:H(i) /a-Si:H(n)	th-SiO _x / poly-Si(n ⁺) PECVD	th-SiO _x / poly-Si(n ⁺) LPCVD	chem-SiO _x / poly-Si(n ⁺) LPCVD	SiO _x /TiO _y	MgO _x
Hole-selective contacts	Al-p ⁺	24.5 (PERC) 11.7	26.8 12.8	26.9 12.8	27.1 12.9	27.1 13.0	26.3 12.5	24.9 11.9
	a-Si:H(i/p)	24.7 11.8	27.5 (HIT) 13.2	27.7 13.3	27.9 13.5	28.0 13.5	26.8 12.8	25.1 12.0
	SiO _x / poly-Si(p ⁺)	24.9 11.9	28.1 13.6	28.3 13.8	28.7 14.2	28.7 14.2	27.3 13.1	25.4 12.1
	SiO _x /Si:C (p ⁺)	24.9 11.9	28.0 13.5	28.2 13.7	28.5 14.0	28.6 14.1	27.2 13.0	25.3 12.1
	a-Si:H(i)/MoO _x	24.4 11.7	26.5 12.6	26.6 12.7	26.8 12.8	26.8 12.8	26.0 12.4	24.7 11.8
	MoO _x	24.1 11.6	25.9 12.3	26.0 12.4	26.1 12.4	26.1 12.4	25.5 12.2	24.4 11.7
	PEDOT:PSS	24.1 11.6	26.0 12.4	26.1 12.4	26.2 12.5	26.2 12.5	25.6 12.2	24.5 11.7

資料來源：ISFH, Silicon PV 2019

圖4、不同電子電洞選擇性接觸材料的電池理論值

三、製程成本分析

圖5為三種不同電池的製造流程比較圖，藉此可分析其競爭優劣。以 PERC 製程為參考組，先進行表面清洗與織構化後，藉由高溫磷擴散與雷射摻雜形成選擇性射極並使用蝕刻溶液移除殘留的磷玻璃與背面溢鍍的射極層以達到絕緣效果，接著在電池正

背面分別鍍上抗反射鈍化層與鈍化堆疊層。最後，使用雷射開孔技術移除背面局部鈍化堆疊層，網印正背面電極膠料進行共燒結即完成電池製程。

P-TOPCon 電池與 PERC 電池在製程上的差異主要有三點，條列如下：

- (1) 背面鈍化堆疊層需在磷擴散製程之前，因為 p-poly Si 在形成時需經過高溫退火，此高溫製程會破壞射極品質
- (2) 背面 SiOx/p-poly Si 取代 Al₂O₃鈍化層，其中 poly-Si 厚度為100 nm ~ 150 nm
- (3) 背面不需雷射開線

N-TOPCon 與 PERC 電池在製程上的差異主要有四點，條列如下：

- (1) 因為使用的晶片為 n-type，故射極需改用硼擴散製程
- (2) 正面增加了 Al₂O₃鈍化層
- (3) 背面 SiOx/n-poly Si 取代 Al₂O₃鈍化層，其中 poly-Si 厚度為100 nm ~ 150 nm
- (4) 背面不需雷射開線

藉由上述電池製程及其結構差異，即可考量使用之製程與設備成本，可做為是否具備競爭優勢的評估指標之一。

PERC	P-TOPCon	N-TOPCon
Texturization	Texturization	Texturization
Emitter (POCl ₃)	Rear Tunnel SiOx	Emitter (BBr ₃)
Selective Emitter	Rear p-poly Si	Selective Emitter
PSG Removal & Isolation	Rear SiNx	BSG Removal & Isolation
Front SiNx	Emitter (POCl ₃)	Rear Tunnel SiOx
Rear Al ₂ O ₃	Selective Emitter	Rear n-poly Si
Rear SiNx	PSG Removal & Isolation	Front Al ₂ O ₃
Rear Laser Open	Front SiNx	Front SiNx
Screen Printing	Screen Printing	Rear SiNx
Co-firing	Co-firing	Screen Printing
		Co-firing

圖5、電池製程比較圖

圖6為 PERC、P-TOPCon 與 N-TOPCon 三種電池的製造成本分析，依其製程目的區分為四部分：

- (1) 晶片種類(wafer material):PERC 與 P-TOPCon 皆使用 p-type 矽晶片，其每片成本約為11.19元；N-TOPCon 使用 n 型矽晶片，成本相對增加了0.95元，為12.14元。
- (2) 表面纖構化與射極形成(textured emitter):PERC 與 P-TOPCon 使用相同製程，每片成本約為2.40元；而 N-TOPCon 由於使用較為高溫的硼擴散製程，成本略為提高，為2.51元。
- (3) 表面鈍化(surface passivation):PERC 電池正背面分別採用 SiNx 與 Al₂O₃/SiNx，每片成本約為2.51元；P-TOPCon 電池背面改用 SiOx/p-poly Si/SiNx，成本增加到3.29元；而 N-TOPCon 差異最大，其電池正背面分別改用 Al₂O₃/SiNx 與 SiOx/n-poly Si/SiNx，成本大幅提升到4.40元
- (4) 電極金屬化(metallization):PERC 電池正背面電極材料分別為銀膠與鋁膠，其電極金屬化之每片成本約為3.77元；而 TOPCon 電池雖然背面節省了雷射開線成本，但因為改用較為昂貴的銀膠，成本反而增加為4.93元。

整合上述製程，PERC、P-TOPCon 與 N-TOPCon 電池每片成本分別為19.97元、21.81元與23.98元。參考目前市場主流規格 M2 22%效率的 PERC 電池來比較三者的競爭優勢，其電池片功率為5.375W，換算成本為3.715元/W，如 TOPCon 製造成本要低於 PERC，P-TOPCon 與 N-TOPCon 電池效率分別要大於24.0%與26.4%；另外，參考德國 Fraunhofer ISE 於2019年 PV CellTech 研討會上提出之成本降低方案，包含 n-type 晶片成本下降，穿隧鈍化堆疊層優化以及非銀電極等，則 P-TOPCon 與 N-TOPCon 電池個別效率僅需大於22.4%與24.1%即具備與 PERC 電池競爭的優勢。成本估算僅以現有製程參數考量，諸如 n-type 抗光衰優勢、模組封裝與後端系統...等等皆尚未考量在內。

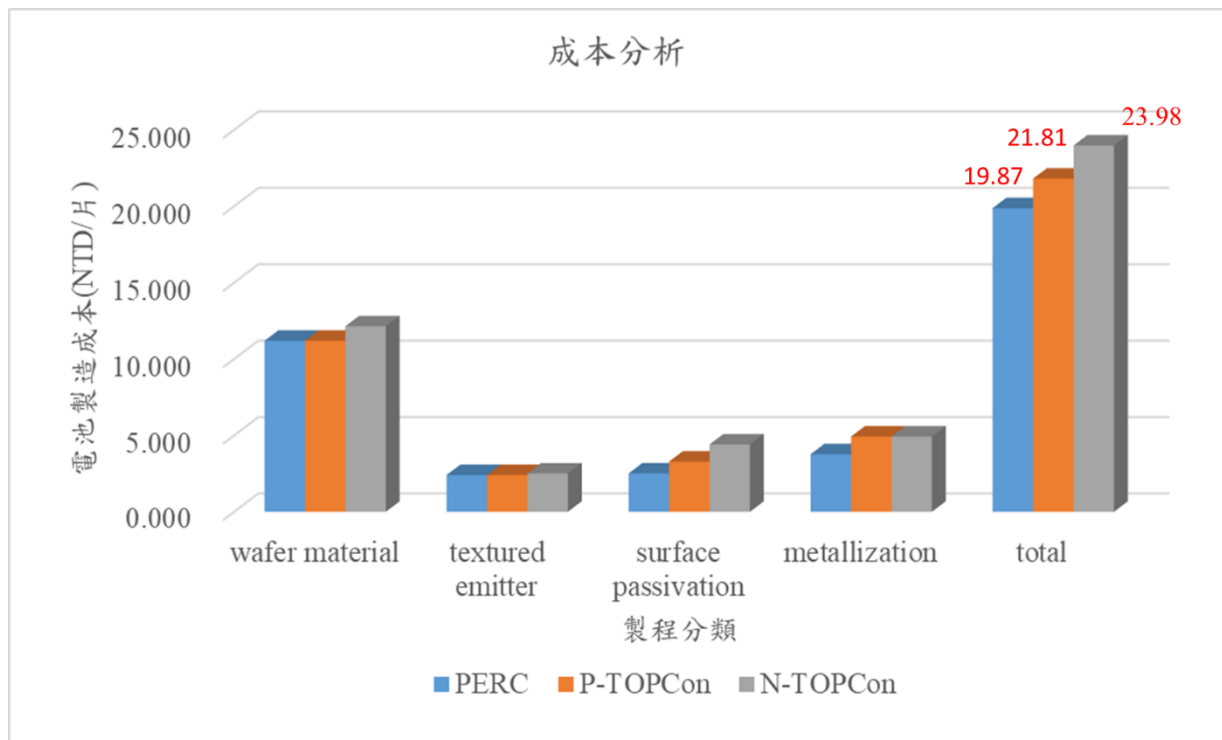


圖6、電池製造成本比較

四、結論

本篇文章我們介紹了 PERC 與 TOPCon 太陽電池技術比較與成本分析，P-TOPCon 電池由於背面多晶矽鈍化效果略低於 PERC 電池，優勢有限；而正面鈍化接觸則具備相當高的技術門檻，導致廠商幾乎都聚焦在 N-TOPCon 電池的開發。從德國 ISFH 的研究中指出正背面皆採用多晶矽鈍化接觸技術時，其效率極限可達到28.2%~28.7%，顯示鈍化接觸技術的巨大潛力。最後，從製造成本的角度來看，PERC 電池成本每片 19.87元，仍然是最具備競爭優勢的產品，後續如 n-type 晶片成本降低、多晶矽製程優化、改用非銀電極與製程整合優化等技術能持續改善，N-TOPCon 才有機會取代 PERC，成為市場主流產品。