



矽晶太陽電池技術現況與未來展望

陳松裕博士 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 資深研究員

一、前言

2019年全球太陽能安裝量已超過110GW，今年雖因新冠肺炎(COVID-19)導致安裝量略為減少，但未來預期仍會逐年成長。太陽光電市場未來5~10年內仍將以矽晶電池技術為主，ITRPV於2020年的研調報告中指出正背面電極結構將更加明確地主導整個市場，其中PERC電池在未來3年內會完全取代傳統BSF電池，而TOPCon與HJT電池正在緩慢侵蝕PERC的市場份額，顯示此兩種技術有機會成為新一代可量產產品。內文將著重介紹PERC、TOPCon與HJT的技術現況、製程差異與成本分析。

二、敘述

近年來由於各國政府對太陽光電提出有效的補助政策以及太陽電池價格的持續下跌，促使全球太陽能裝置量快速成長，2019年全球累計安裝量已經達到600GW 以上；歐洲太陽光電產業協會(EPIA)預估今年雖因新冠肺炎(COVID-19)的影響導致安裝量小幅放緩，但未來將以每年16~20%的速度持續成長，如下圖1所示。

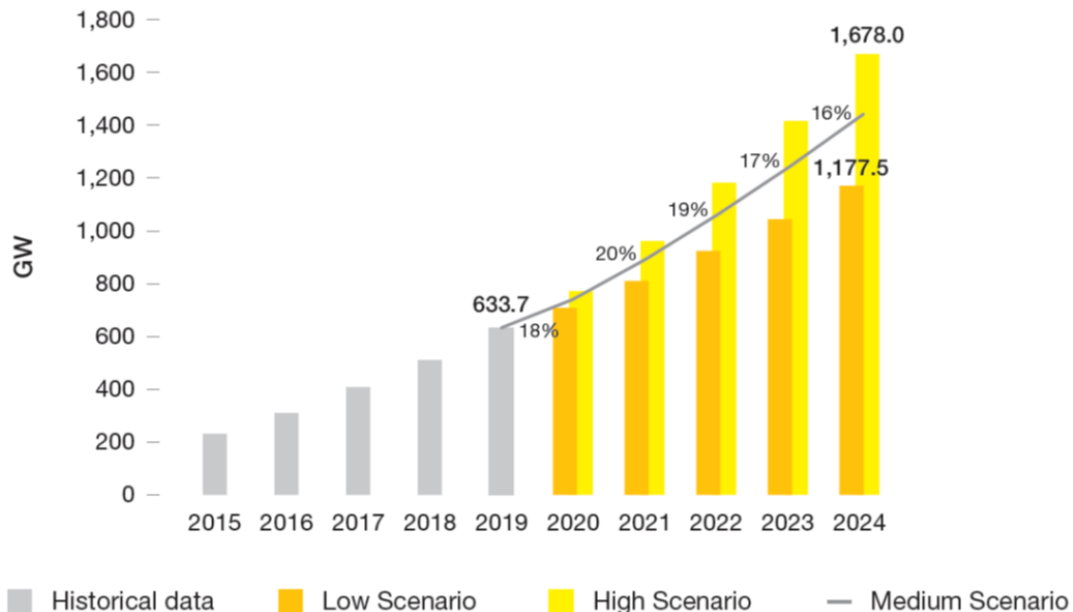


圖1、全球 PV 累積裝置容量及預測

(資料來源: SOLARPOWER EUROPE 2020)

目前全球太陽光電市場仍以矽晶太陽電池為主流，其市佔率在未來10年預估仍會維持9成左右。下圖2(a)為研調機構 ITRPV 於2020年對不同矽晶電池技術市佔率之趨勢預測，其中由電池背面接引電池元件結構如 back contact cell(IBC)緩慢成長到2030年只達5.5%，而 metal wrap through cell(MWT)到2024年預期已退出市場，正背雙面電極結構將更加明確地主導整個市場。預估 HJT 市佔率16%，PERx 系列 (PERC/PERL/PERT/TOPCon)持續成長並在未來5年達到80%高峰，2030年因堆疊型市場滲透成功而瓜分市佔，故降為73%的市場份額。

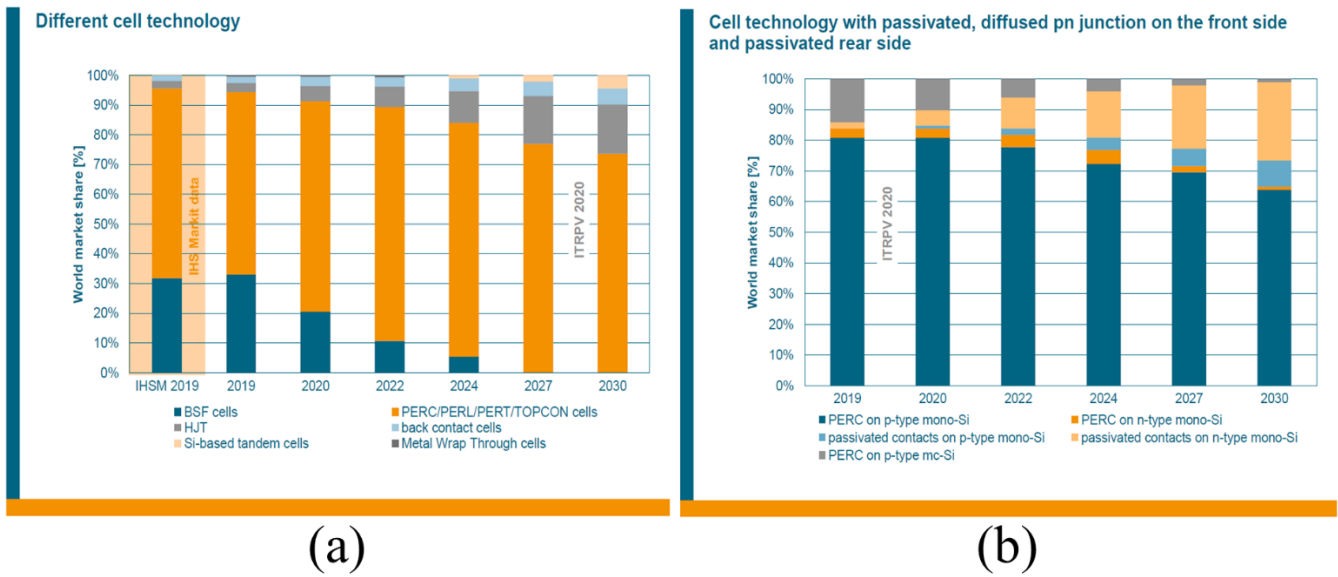


圖2、太陽電池技術市佔率預估:(a)不同電極技術、(b)不同鈍化技術

(資料來源: ITRPV 2020)

雖然 PERx 系列從現在到2030年是市場的主流技術，但結構並非一成不變，根據 ITRPV 的預測(如上圖2(b)所示)，結合鈍化接觸的 TOPCon 技術是 PERx 後續成長的動力來源。N-TOPCon 電池在今年已開始萌芽並擁有約5%的市佔率，N 型和 P 型預估到2030年將成長至35%。綜合以上所述，PERC 電池成長快速，去年產能已達130GW，今年上看180GW，未來3年內會完全吞併並取代傳統 BSF 電池，而 TOPCon 與 HJT 電池從今年開始侵蝕 PERC 的市場份額，顯示此兩種電池有機會成為下一代可量產技術，尤其是前者預期發展迅速。

三、電池技術介紹

圖3為目前量產之 PERC、TOPCon 與 HJT 電池結構示意圖，針對其主要特徵與目前效率水準分述如下：

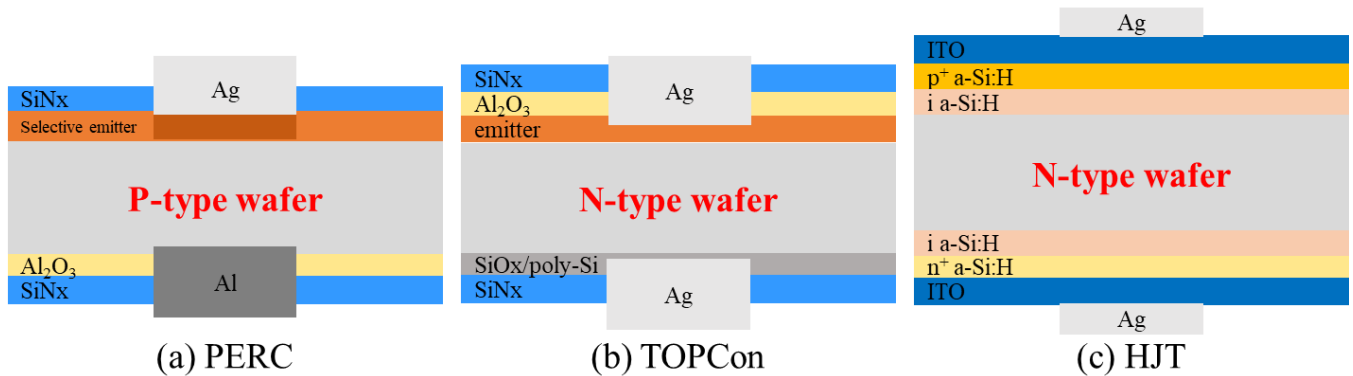


圖3、電池結構示意圖:(a)PERC、(b)TOPCon、(c)HJT

- (a) PERC：鈍化射極與背面太陽電池(Passivated Emitter and Rear Cells, PERC)的概念最早是由澳洲 UNSW 於 1989 年提出，核心概念在於針對矽晶電池的背表面進行鈍化及採用局部之金屬電極接觸，可達到降低表面載子複合速率，增加光在電池背面之反射率及紅外光之吸收的目的。PERC 電池於 2014 年成功量產，發展至今量產效率已從當時的 20%到現在的 22.5%~23%水準，目前 6 吋大面積 PERC 最高效率為中國大陸隆基於 2019 年 11 月經 ISFH 認證的 24.03%，已非常接近實際極限效率 24.5%。
- (b) TOPCon：氧化穿隧鈍化接觸太陽電池 (Tunnel Oxide and Passivated Contact, TOPCon) 的概念是由德國 Fraunhofer ISE 於 2013 年 28th EU PVSEC 研討會上所提出，藉由在電池背面沉積具備化學鈍化的可穿隧超薄氧化層和具備場鈍化的高摻雜多晶矽層實現了整面鈍化。TOPCon 電池已於今年正式邁入量產，量產效率已超過 23%，介於 23%~23.5%之間。目前大面積 TOPCon 世界紀錄是中國大陸晶科能源於 2020 年 7 月經 ISFH 認證的 24.79%，與其可達到的實際極限效率 27.5%仍有一段距離。
- (c) HJT：異質界面太陽電池(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HJT)最早是由日本 Sanyo 於 1990 年研發成功並註冊成商標 HIT®，以本徵非晶矽薄膜作為表面良好的鈍化層，再沉積非晶矽的射極層與背表面場，大幅降低了正背面的載子複合，實現了雙面整面鈍化效果，使效率提升效果更加顯著。6 吋大面積 HJT 可達到的實際極限效率為 27.5%，而目前世界紀錄為中國大陸漢能於 2019 年 11 月

宣佈的 25.11%(ISFH 認證)，至於市面上量產效率已突破 24%，平均落在 23.5%~24%。

四、 成本分析

藉由比較上述三種不同電池之量產製造流程(如下圖4所示)可以分析其競爭優劣，參考圖4(a) PERC 流程為主，TOPCon 與 HJT 差異部分以紅色作標示，明顯看出 TOPCon 與 PERC 在製程上具備較佳的相容性，更利於產線升級，而 HJT 雖然製程步驟相對簡單，但與 PERC 製程差異過大，設備與技術門檻都相對較高。

(a) PERC	(b) TOPCon	(c) HJT
Texturization	Texturization	Texturization
Emitter (Phosphorus)	Emitter (Boron)	Front i/p a-Si:H
Selective Emitter	BSG Removal & Isolation	Rear i/n a-Si:H
PSG Removal & Isolation	Rear SiOx/n-poly Si	Front TCO
Front SiNx	Rear SiNx	Rear TCO
Rear Al ₂ O ₃	Front Al ₂ O ₃	Screen Printing Ag/Ag
Rear SiNx	Front SiNx	Curing
Rear Laser Open	Screen Printing Ag/Ag	
Screen Printing Ag/Al	Co-firing	
Co-firing		

圖4、(a)PERC、(b)TOPCon、(c)HJT 電池製程圖

PERC 使用6吋 p 型矽晶片進行表面清洗與雙面織構化，藉由高溫磷擴散與雷射摻雜形成選擇性射極並移除表面殘留的磷玻璃與背面溢鍍的射極層，接著分別在電池正

面使用 PECVD 鍍上抗反射層與背面使用 ALD 鍍上鈍化層與 PECVD 保護層；最後，使用雷射移除背面局部鈍化堆疊層，網印正背面的銀膠與鋁膠電極漿料進行金屬化共燒結即完成電池製程。

圖4(b)為 n-TOPCon 電池製程，與 PERC 不同的是採用晶片類型為 n 型，故射極層改用硼擴散形成。此外，將 ALD 氧化鋁鈍化層從背面移至正面，背面採用 LPCVD 並經過高溫形成氧化矽/多晶矽穿隧鈍化堆疊層，正背面網印之電極漿料皆為銀膠故不需要雷射開線，最後進行共燒形成電池。

圖4(c)為 HJT 電池製程，雖然其步驟相對簡單，但因為各層薄膜為奈米等級且需有良好匹配佳，故技術門檻相對比較高。製程使用6吋 n 型矽晶片，表面經過清洗後在正面以 PECVD 沉積本徵非晶矽薄膜鈍化層與 p+非晶矽射極層，在背面沉積本徵非晶矽薄膜鈍化層與 n+非晶矽背表面場，接著分別在正背面以 PVD 或 RPD 鍍上透明導電層，最後網印低溫銀膠並進行固化，整體製程溫度不超過200°C。

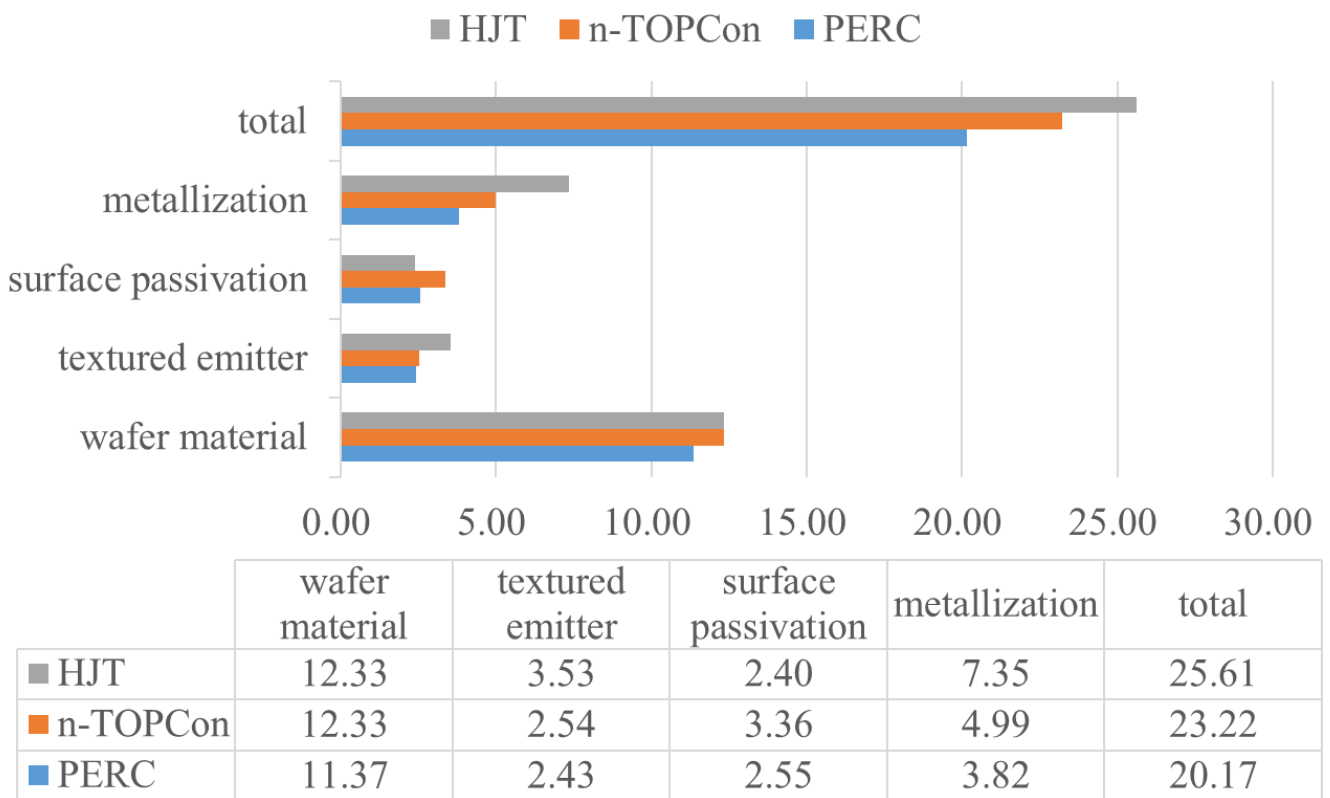


圖4、成本估算

圖4為三種電池製程成本估算結果，以 PERC 製程為主，依其製程目的依序區分為四

步驟進行成本說明如下：

- (1) 晶片類型：PERC 電池使用 p 型矽晶片，其每片成本約為11.37元；n-TOPCon 與 HJT 使用 n 型矽晶片，成本相對增加了0.96元，為12.33元。
- (2) 織構化與射極：三種電池表面織構化使用相同製程，其化學處理每片成本約1.13元，接著 PERC 射極以磷擴散進行，每片成本增加至2.43元；而 n-TOPCon 使用較為高溫的硼擴散製程，成本略為提至到2.54元；HJT 正面採用 PECVD 低溫沉積 i/p+非晶矽與 PVD TCO，成本為3.53元。
- (3) 表面鈍化：PERC 電池正背面分別為 PECVD 氮化矽與 ALD 氧化鋁/PECVD 氮化矽，加上背面雷射開線，每片成本約為2.51元；n-TOPCon 電池正面沉積 ALD 氧化鋁與 PECVD 氮化矽，背面 LPCVD SiOx/n-poly Si 與 PECVD SiNx，成本大幅增加到3.36元；HJT 背面採用 PECVD 進行 i/n+非晶矽沉積與 PVD TCO，成本較為便宜，為2.4元。
- (4) 金屬電極：PERC 電池正背面電極材料分別為銀膠與鋁膠並經過共燒結製程，其每片電池電極金屬化成本約為3.82元；而 TOPCon 電池背面因為改用較為昂貴的銀膠，成本增加到4.99元；HJT 正背面使用低溫銀膠，比起一般高溫銀膠，其銀的使用量大幅增加，成本暴漲至7.35元。

(5)

綜合所有製程步驟，PERC、n-TOPCon與HJT電池每片成本分別為20.17元、23.22元與25.61元。如晶片以目前市場主流 G1 尺寸 252cm² (158.75mm x 158.75mm)計算，22.5%效率的PERC電池功率為5.67W，換算每瓦成本為3.56元/W、23%效率的TOPCon電池功率為5.80W，每瓦成本為4.01元/W；23.5%效率的HJT電池功率為5.92W，每瓦成本為4.32元/W，顯示PERC目前仍是最具競爭優勢的產品。當然此估算僅以現有製程參數考量，諸如n型晶片潛在效率更高與抗光衰優勢、模組封裝與後端系統...等等皆尚未考量在內。

五、總結

本篇文章我們介紹了PERC、TOPCon與HJT三種太陽電池的技術現況、製程差異與成本分析。PERC電池每片成本約為20.17元，仍是最具競爭力的產品，不過TOPCon與HJT具備比PERC更高的潛在極限效率，後續如n型矽晶片成本降低、製程優化與改用非銀電極，兩者皆有機會取代PERC成為下一代可量產的主流產品，優化後之絕對效率與成本將是決定最後誰能勝出的關鍵。