

# N型高效太陽電池技術發展現況

工研院 綠能所 / 葉峻銘博士

隨著全球市場對太陽電池效率的要求越來越高，使得P型太陽電池的效率瓶頸已越發明顯。N型矽晶太陽電池由於其高載子壽命和無光致衰減等天然優勢，具有更大的效率提升空間和穩定性，成為產業關注和研究的重點。根據ITRPV 2016預測國際太陽光電技術路線發展，如：圖1、圖2所示，隨著背接觸(IBC)、異質接面(HIT)等電池新結構，離子佈值等新技術的引入，N型單晶電池的效率優勢會越來越明顯，且單晶矽在今後幾年的市場佔有率將逐步增加，預估到2026年時將超過多晶矽，成為太陽光電市場基材首位，其中約60%以上為N型單晶。表1列舉日本Panasonic、美國SunPower、日本Sharp的不同電池結構實驗室的電池轉換效率記錄，其中背接式異質接面(HBC)電池最高效率可達到25.6%，展現了強大的發展潛力。

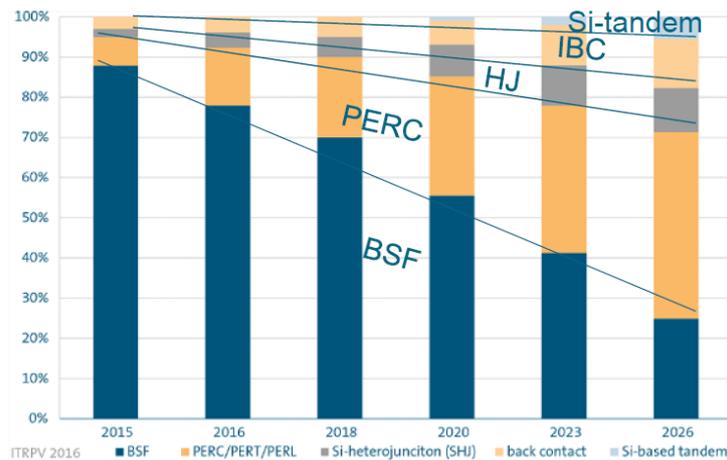


圖1、全球各種電池技術的佔比 (資料來源：ITRPV 2016)

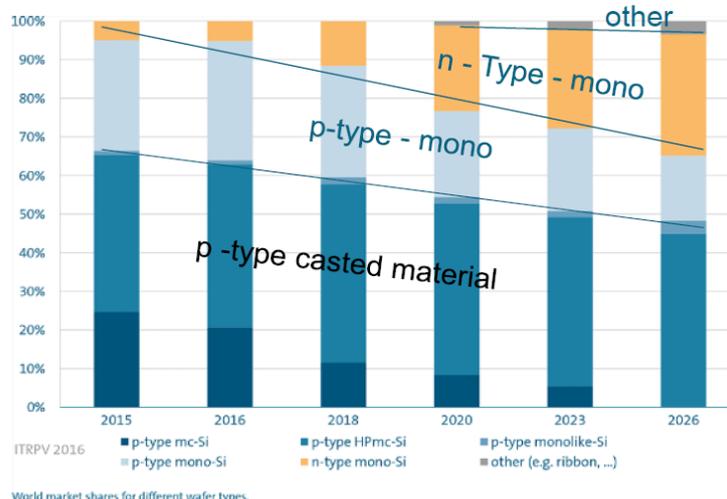


圖2、全球各種基材的佔比 (資料來源：ITRPV 2016)

表1、部分機構N型單晶太陽電池的最高轉換效率

公司機構	電池結構	面積cm <sup>2</sup>	轉換效率%
Panasonic	HIT	101.8	24.7
Sunpower	IBC	121	25.0
Sharp	HBC	3.72	25.1
Panasonic	HBC	143.7	25.6

與P型單晶矽相比，N型單晶矽的生產製備沒有本質的區別，隨著N型單晶矽生產規模的擴大和技術的進步，兩者之間的生產成本將會越來越接近。磷摻雜的N型單晶矽電池較硼摻雜的P型單晶矽電池有許多明顯的優勢。首先，N型材料中的雜質對載子電洞的捕獲能力低於P型材料中的雜質對載子電子的捕獲能力，相同電阻率的N型矽晶片的少數載子壽命比P型矽晶片的高出1~2個數量級。因此，N型矽晶材料的少數載子複合將遠低於P型的少數載子的複合。依據1973年H.Fischer等人研究發現P型晶矽電池在光照下會發生明顯的電性能衰減。後來證實電池出現光致衰減，是由於光照或電流注入導致矽片中的硼和氧形成硼氧複合中心，從而使少數載子壽命降低，引起電池轉換效率下降。而摻磷的N型晶體矽中硼含量極低，本質上消除了硼氧對的影響，所以幾乎沒有光致衰減效應的存在。

目前研究的N型單晶高效電池主要包括有：PERT電池、PERL電池、TopCon電池、HIT電池、IBC電池、HBC電池等。以下分別針對其太陽電池結構和製作特點進行重點介紹。

### 一、鈍化射極背面局部擴散電池 ( Passivated Emitter Rear Locally-diffused, PERL電池 )

PERL電池的結構特點是背面局部接觸處以重摻雜，可降低電池背面局部接觸區域的接觸電阻和復合速率。背面局部重摻可以通過不同的製作方式實現，比較常用的是雷射摻雜和離子注入。德國Fraunhofer實驗室製備的n-PERL小面積電池 ( 4cm<sup>2</sup> )，其轉化效率達23.2%，電池結構如圖3所示。基料為N型CZ單晶矽，正面通過離子注入形成硼摻雜p+射極，正面採用ALD製程沉積Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>鈍化層鈍化射極，降低表面複合速率，再用電漿輔助化學氣相沉積(PECVD)設備沉積SiNx，形成抗反射膜。正面黃光微影技術開口後，用蒸鍍方法形成Ti/Pb/Ag金屬電極，背面利用雷射摻雜技術，形成局部背場。其特點是先在其背面PECVD法生長一層磷摻雜的a-SiCx鈍化層，再利用雷射在熔融鈍化層的同時將其中的磷元素摻雜進晶體矽，形成局部重摻，最後通過物理氣相沉積(PVD)設備方法，形成Al背面電極。背面磷摻雜的a-SiCx鈍化層具有很好的鈍化效果，金屬接觸區域n++局部重摻在降低接觸電阻的同時，減少了金屬接觸區域的複合，提升了電池的開路電壓和填充因子。電池Voc達699mV，FF達80.5%，顯示了良好的表面

鈍化效果和接觸特性。在形成背面局部接觸窗口的同時形成局部重摻，在不額外增加製程步驟的情況下實現了PERL電池結構。

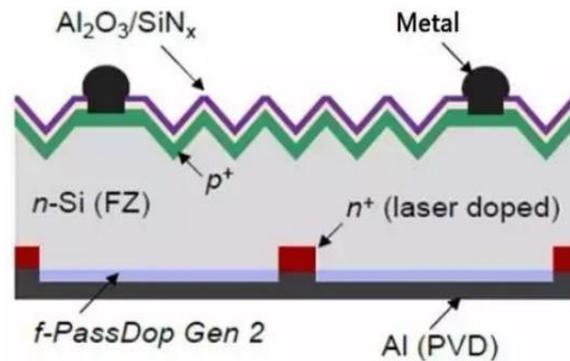


圖3、德國Fraunhofer技術PERL電池結構示意圖  
(資料來源:40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference)

## 二、鈍化射極背面全擴散電池 ( Passivated Emitter Rear Totally-diffused, PERT電池 )

PERT電池結構特點是背表面擴散全覆蓋以降低電池的背面接觸電阻和復合速率。背面全背場擴散可以通過不同的製程方式實現，主要包括：爐管式擴散、磊晶法、離子注入法等。中國英利公司的PANDA電池，是採用雙面受光型PERT結構的大面積電池（ $239\text{cm}^2$ ），並且已實現量產，最高轉化效率為20.76%，電池結構如圖4所示。其在具有金字塔結構的N型晶片上，通過硼磷爐管式共擴散製備正面P型射極和N型背面電場，然後通過PECVD技術在前後表面製備鈍化層和抗反射膜，正反面電極使用常規網印來完成。PANDA電池雙面發電的設計，能夠同時接受從正面和背面進入電池的光線從而實現雙面發電的功能；正面採用細密柵線的設計，減少了遮光面積，提高了電池的短路電流。與規模化生產的IBC、HIT等N型電池相比，其結構簡單、製備成本低、製造流程短，與現有的P型生產線相兼容，容易實現大規模量產。

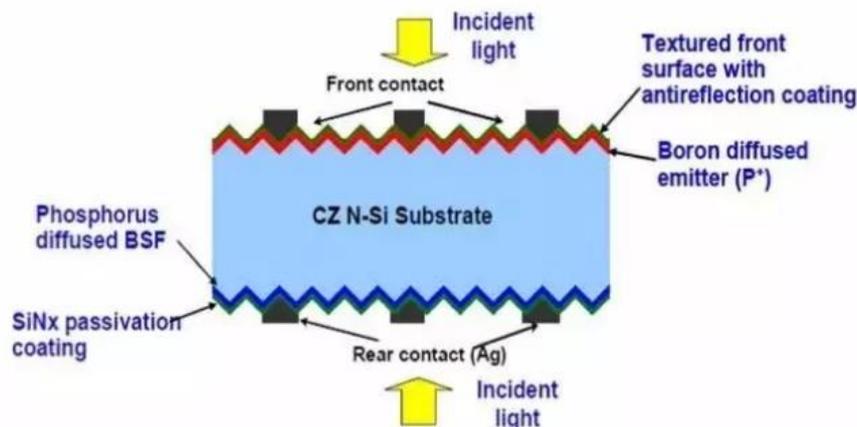


圖4、英利公司PANDA電池結構示意圖  
(資料來源: 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference)

### 三、穿隧氧化層鈍化接觸電池 ( Tunnel Oxide Passivated Contact, TopCon電池 )

為了進一步降低背面複合速率實現背面整體鈍化，並去除背面開口製程，近年來引起了對鈍化接觸技術太陽電池熱門研究。德國Fraunhofer開發的TopCon ( Tunnel Oxide Passivated Contact ) 技術在小面積電池上實現25.1%的轉化效率，電池結構如圖5所示。正面採用選擇性射極結構，片電阻達150ohm/sq，並採用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 進行表面鈍化和減反射以降低表面複合速率和反射率。背面首先在電池背面採用濕化學方法製備一層超薄 $\text{SiO}_2$ ，厚度約1~2nm，然後再沉積一層20nm厚的磷摻雜非晶矽層，經過高溫退火後形成摻雜多晶矽，二者共同形成鈍化接觸結構，最後通過PVD的方法形成全背面金屬接觸。背面TopCon結構的隧穿效應示意圖如圖6所示，1~2nm厚的化學 $\text{SiO}_2$ 隧穿氧化層具有很好的選擇性，允許電子穿越同時阻擋電洞的複合，由於採用高溫多晶化處理，此鈍化結構具有很好的熱穩定性。TopCon全接觸鈍化結合全金屬電極的創新結構，克服了PERL電池結構由於局部開孔對載子傳輸路徑的限制，實現了最短的電流傳輸路徑，將傳輸電阻損失降低近似為零，根本上消除了電流橫向傳輸引起的損失。相比較於PERL電池結構，TopCon結構無須背面開孔和對準，也無須額外增加局部摻雜製程，簡化了電池生產流程，同時摻雜多晶矽層良好的鈍化特性以及背面金屬全接觸結構具有進一步提升轉換效率的空間，有機會成為下一代產業化N型高效電池的切入點。

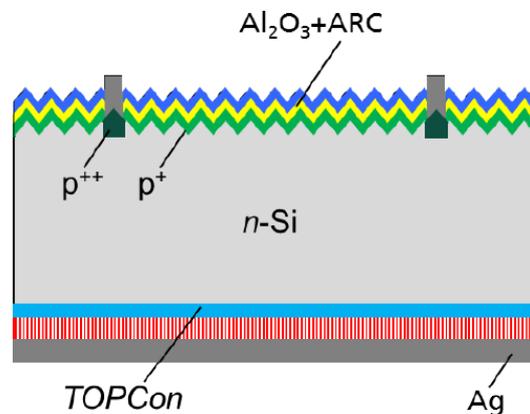


圖5、德國Fraunhofer TopCon技術電池結構示意圖  
(資料來源: Solar Energy Material and Solar Cells 120(2014))

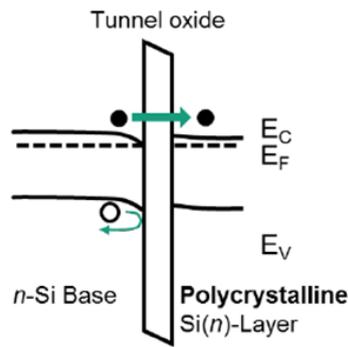


圖6、TopCon結構的隧穿效應示意圖

(資料來源: 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition)

#### 四、叉指狀背接觸電池 ( Interdigitated Back Contact , IBC電池 )

IBC電池將pn junction與矽基底的接觸電極，以指叉形狀全部做在電池背面，完全消除了前表面電極的遮光，同時無須考慮前表面減反射結構對電極接觸的影響，為前表面結構實現更低反射率提供了更大的優化空間。全背面電極由於不用考慮對電池光學方面的影響，設計時可以更加專注於電池電性能的提高。IBC電池的核心問題是如何在電池背面製備出良好的指叉狀間隔排列p區和n區。傳統的技術路線是液態硼擴散和黃光微影技術，但需要高溫製程，且均勻性較差；為避免多步黃光微影及擴散所帶來的複雜操作，可在電池背面印刷一層含硼的指叉狀擴散膜層，膜層上的硼經擴散後進入N型晶片形成p+區，而未印刷膜層的區域，經磷擴散後形成n+區。另外，使用離子注入技術可獲得均勻性好、深淺精確可控的p區和n區，具有很好的發展前景，但成本較高，尚未產業化。美國SunPower公司的IBC電池已實現量產，電池結構如圖7所示，實驗室最高轉換效率達25%。其電池前表面通過金字塔結構及抗反射膜，提高電池的入光量。電池的背表面由硼擴散p+區域和磷擴散n+區域呈指狀交叉分佈，正反表面均覆蓋SiO<sub>2</sub>鈍化膜，降低了表面複合並增加了長波響應，也提高了開路電壓。在前表面的鈍化層下進行淺磷擴散以形成n+前表面場，提高短波響應。P型和N型金屬電極利用網印的方式實現，透過在SiO<sub>2</sub>膜上開洞與Si基板接觸，減少了金屬電極與Si基板的接觸面積，進一步降低了電極表面的複合，提高了開路電壓。但是，IBC電池製程複雜，成本幾乎為常規電池的兩倍，因此如何簡化製程，開發低成本的IBC技術並推向產業化應用是業界關注的重點和難點。

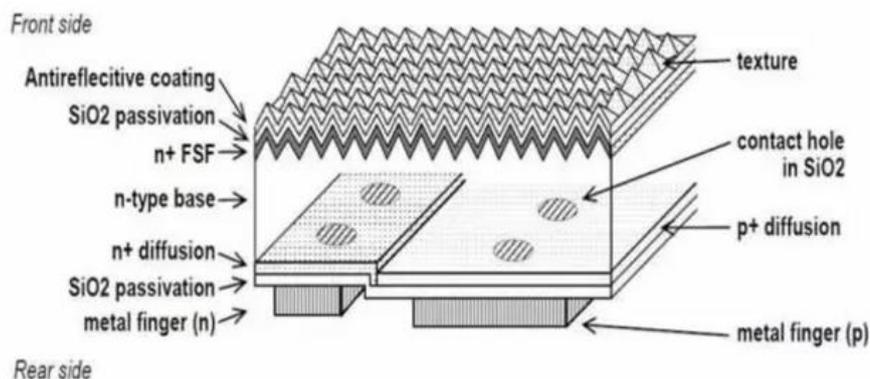


圖7、美國SunPower公司IBC電池結構示意圖

(資料來源: 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference)

### 五、異質界面電池 ( Heterojunction with Intrinsic Thin Layer , HIT電池 )

HIT電池正面首先沉積很薄的本質非晶矽層(a-Si:H)作為表面鈍化層，然後沉積硼摻雜的p+型非晶矽層，兩者共同構成正面電洞傳輸層。在背面同樣沉積本質非晶矽薄膜和摻磷的n+非晶矽層，兩者共同構成了電子傳輸層。由於本質非晶矽層具有很好的鈍化矽晶表面缺陷的作用，極大地降低了矽晶的表面複合，確保了電池很高的開路電壓。由於非晶矽的導電性較差，因此在電池兩側利用磁控濺鍍技術濺鍍TCO膜進行橫向導電，最後採用網印技術形成雙面電極，使得HIT電池有著對稱雙面電池結構，一定程度上減少了電池的機械應力，並允許薄矽晶片的使用。整個製備過程都是在低於200°C下進行的，可避免高溫對矽晶片的損傷。其電池結構如圖8所示，實驗室最高轉換效率達24.7%。HIT電池雖然發展迅速，但是仍然存在許多問題，一定程度上限制了其大規模量產。首先，其生產過程中的每一步製程要求都非常嚴格，比如：非晶矽薄膜生長品質要求很高，所以對前道矽晶的表面清潔淨化技術要求非常高。其次，非晶矽薄膜無法承受較高溫度的後續製程，後道製程必須使用高成本的低溫材料。另外，TCO薄膜成本較高，且產量有限。所以在保證高效的情況下，大規模的量產還需要進一步的研究。

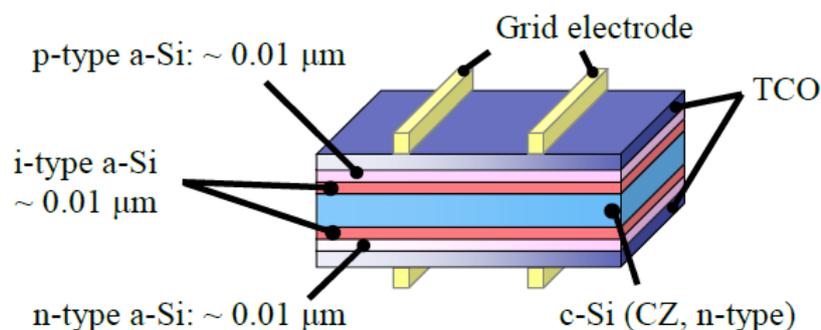


圖8、日本Panasonic公司的HIT電池結構示意圖

(資料來源:26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition)

## 六、異質界面背接觸電池 ( Hetero-junction Back Contact , HBC電池 )

HBC電池是將HIT技術運用於IBC結構的電池。其電池結構如圖9所示，創造了實驗室最高轉換效率25.6%的世界紀錄。HBC電池與HIT電池相比最大的特點是前表面沒有電極結構，極大降低了電極對太陽光的遮擋損失,確保了電池高的 $I_{sc}$ 。其正面先成長一個鈍化效果非常好的鈍化層，再沉積 $SiN_x$ 減反膜降低反射率。背面先沉積一層本質非晶矽層，再沉積指叉狀分佈的N型非晶矽層層和P型非晶矽層層，非晶矽薄膜良好的鈍化效果確保了電池的高開路電壓，最後用電鍍製備背面的正負電極，由於不用考慮對電池光學方面的影響，電極設計時可以更加專注於電池電性能的提高，確保了電池高的填充因子。

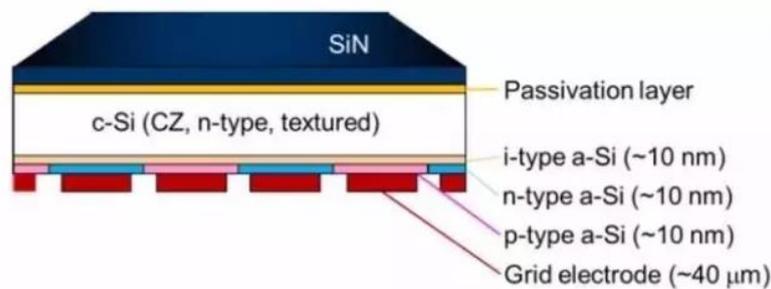


圖9、日本Panasonic公司的HBC電池結構示意圖

(資料來源: IEEE Journal of Photovoltaics 2014)

我們重點介紹了上述幾種 N 型高效單晶電池的結構特點和研發現況。與傳統的 P 型晶矽電池相比，N 型晶矽電池由於其高少子壽命和無光致衰減等天然優勢，具有更大的效率提升空間和潛力，是高效電池技術路線的必然選擇，而且隨著電池新技術的引入，N 型晶矽電池的效率優勢會越來越明顯。不斷追求效率提升和成本降低，是太陽光電產業永恆的主題。隨著市場對效率和品質的要求越來越高，單晶 N 型電池由於自身的天然優勢，必然會成為市場的追逐的方向，N 型單晶電池將成為未來幾年高效電池產業化的關鍵技術。