



# 穿隧氧化鈍化背接觸太陽電池概述

## Introduction of Tunnel Oxide Passivated Back Contact Solar Cell

張瑞文 J. W. Chang<sup>1</sup>、黃志仁 C. J. Huang<sup>2</sup>、張瀚丞 H. C. Chang<sup>3</sup>、  
陳松裕 S. Y. Chen<sup>4</sup>、郭明村 M. T. Kuo<sup>5</sup>、鄭丞良 C. L. Cheng<sup>6</sup>  
工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 <sup>1</sup>副研究員、<sup>2</sup>資深研究員、<sup>3</sup>副經理、<sup>4</sup>經理、<sup>5</sup>副組長  
友晁能源材料股份有限公司(TERASOLAR ENERGY MATERIALS CORP.) <sup>6</sup>處長

### 摘要/Abstract

因應使用石化能源所造成的環境衝擊，各國政府積極推動再生能源永續發展，並推出相關補助政策與獎勵措施。目前，全球已有超過150個國家宣示或規劃要在2050年前達成淨零碳排目標，促使太陽光電產業迅速成長。當前市場仍由矽晶產品主導，市占率超過9成，且隨著矽晶技術持續研發，這一趨勢短期內仍難以撼動。2024年，主流矽晶電池技術已由鈍化射極與背面電池(PERC)升級至穿隧氧化鈍化接觸(TOPCon)電池。因此，本文將概述一種有望成為下一階段的主流技術—穿隧氧化鈍化背接觸(TBC)電池，此技術結合了TOPCon技術與交指式背接觸(IBC)結構，可由現有TOPCon產線升級，使效率更接近矽晶電池的理論極限，對潔淨能源發展有所助益。

In response to the environmental impact of fossil fuels, governments around the world are actively promoting renewable energy and sustainable development, and have introduced related subsidy policies and incentive measures. Currently, more than 150 countries have declared or planned to achieve net-zero carbon emissions by 2050, which has driven the rapid growth of the photovoltaic industry. At present, the market is still dominated by silicon products, with a market share of over 90%, and this trend is difficult to shake in the short term as silicon technology continues to be developed. In 2024, the mainstream silicon battery technology has been upgraded from Passivated Emitter and Rear Cells (PERC) to Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon) cells. Therefore, this article will outline a promising technology that has the potential to become the next mainstream technology - Tunnel Oxide Passivated Back Contact (TBC) cells. This technology combines TOPCon technology with an Interdigitated Back Contact (IBC) structure, which can be upgraded from existing TOPCon production lines to bring efficiency closer to the theoretical limit of silicon solar cells, and is expected to contribute to the development of clean energy.

### 關鍵字/Keywords

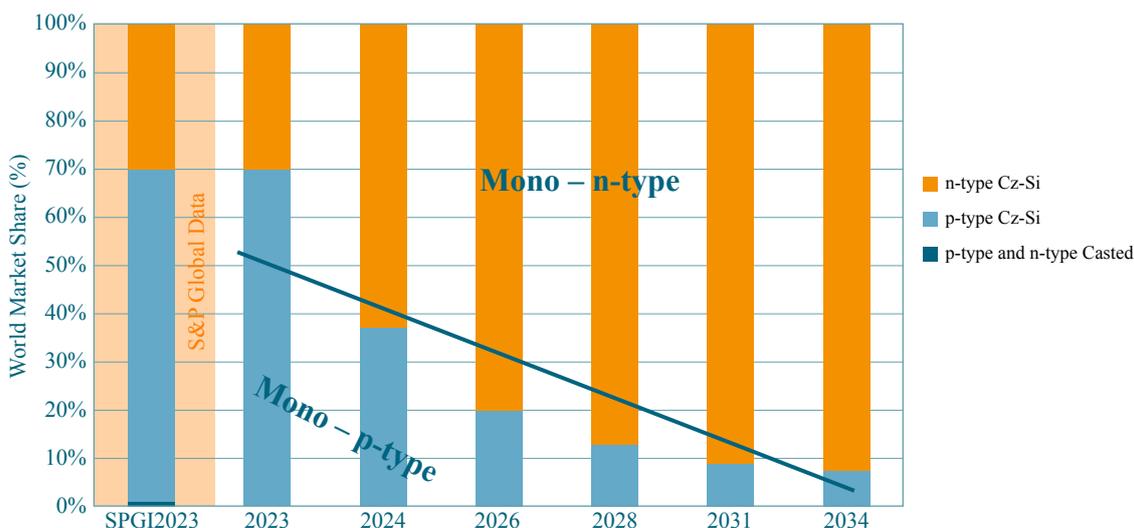
穿隧氧化鈍化接觸太陽電池(Tunnel Oxide Passivated Contact Solar Cell)、交指式背接觸太陽電池(Interdigitated Back Contact Solar Cell)、穿隧氧化鈍化背接觸太陽電池(Tunnel Oxide Passivated Back Contact Solar Cell)



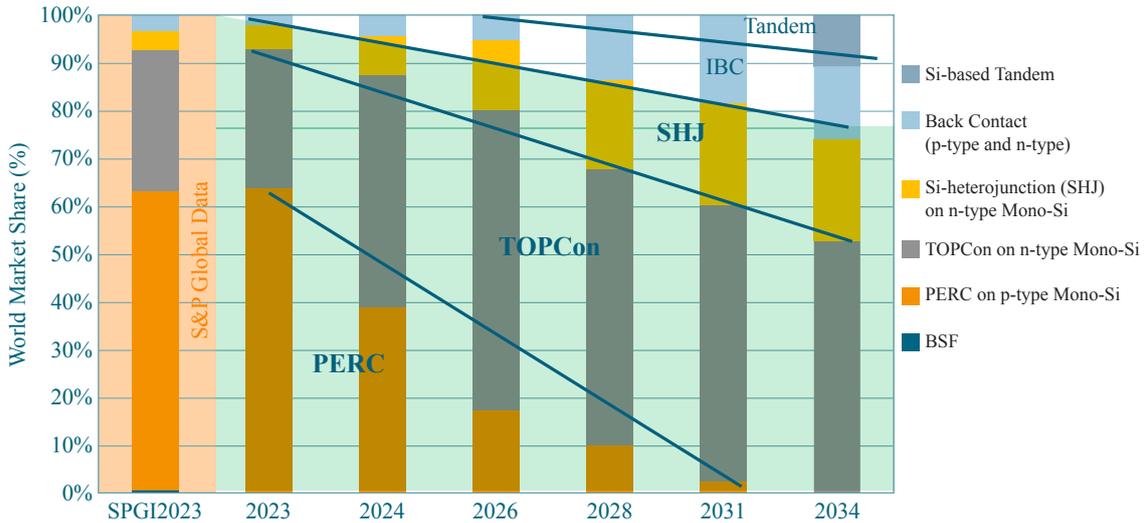
## 前言

各國政府積極推動再生能源永續發展，同時推出相關補助政策與獎勵措施，以因應石化能源所造成的環境衝擊。目前，全球已有超過150個國家宣示或規劃在2050年前達成淨零碳排目標<sup>(1)</sup>，使太陽光電產業迅速成長。當前市場仍以市占率超過9成之矽晶產品為主導，隨著矽晶技術不斷地進步，使得此趨勢在短期內難以被取代。矽晶太陽電池依晶圓種類分為n型和p型，根據德國機械設備製造業聯合會(Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau; VDMA)於2024年所發行的國際太陽能技術路線圖(International Technology Roadmap for Photovoltaic; ITRPV)資料(如圖一所示)，n型晶圓將主導整個矽晶太陽電池市場，而n型穿隧氧化鈍化接觸(Tunnel Oxide Passive Contact; TOPCon)太陽電池也

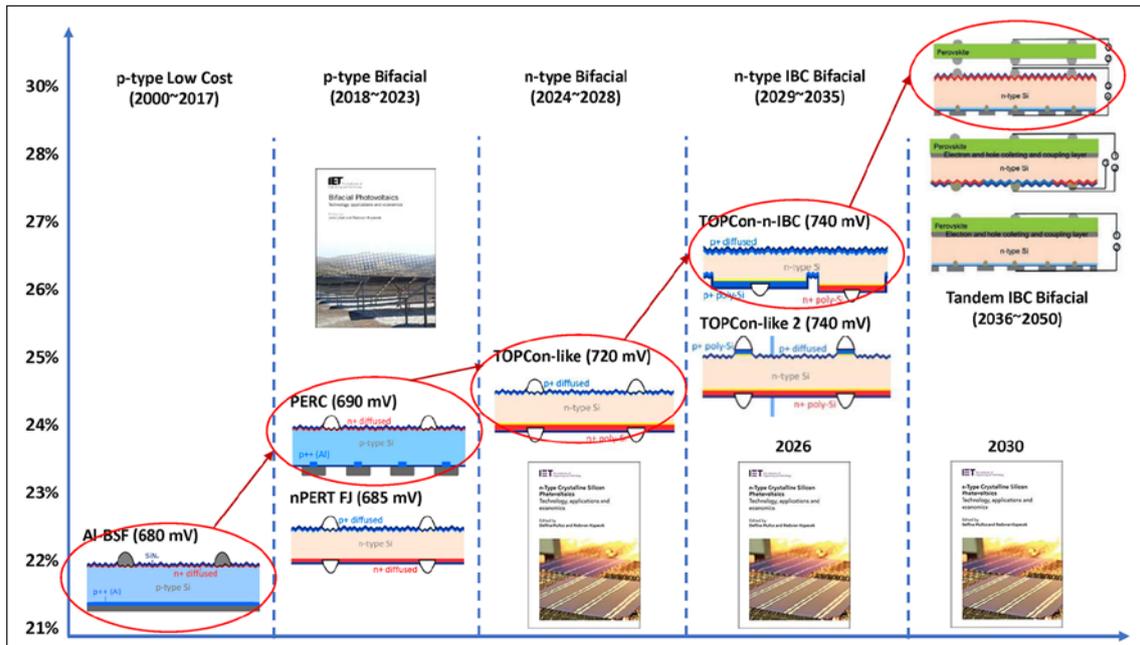
已成為市場主流(如圖二所示)。與p型電池相比，n型電池具有多項優勢：首先，n型晶圓的少數載子壽命較長，且不受光誘導衰減(Light Induced Degradation; LID)問題的影響；其次，n型電池的溫度係數較優，在高溫環境下功率輸出衰減較少；此外，n型電池具有更高的雙面率(Bifacial Ratio)，在弱光環境下的反應也較好。故此，可以預見最高效率的電池結構將會製作在n型晶圓上。圖三為德國ISC Konstanz研究機構對於太陽電池技術從2000年到2030年的回顧及預測。自2018年開始，鋁背表面場(Aluminum-Back Surface Field; Al-BSF)太陽電池技術逐漸被淘汰，主要原因是其背面鈍化能力不佳，導致效率受限。因此，下一個技術是透過介電層實現具有背面鈍化的鈍化射極與背面太陽電池(Passivated Emitter and Rear Cells; PERC)，PERC開路電壓約為690 mV，但PERC技術也因為LID



▲圖一 n型晶圓及p型晶圓市占率預測<sup>(2)</sup>



▲圖二 各種太陽電池技術市占率預測<sup>(2)</sup>



▲圖三 ISC Konstanz對未來主流技術的預測及回顧<sup>(3)</sup>

的問題無法改善，導致效率無法進一步地提升，所以能實現超過700 mV開路電壓的TOPCon電池在2024年成為市場主流技術。

目前商品化的TOPCon電池已經達到超過24%以上的轉換效率，而且和上一個世代之主流PERC電池的產線相容極高。相比於

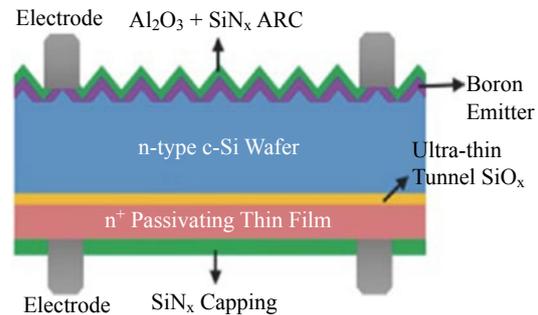


其他商品化的n型太陽電池，例如異質接面太陽電池(Silicon Heterojunction Solar Cell; SHJ)，TOPCon具有更低的生產成本，因此成為研究的熱門焦點之一。

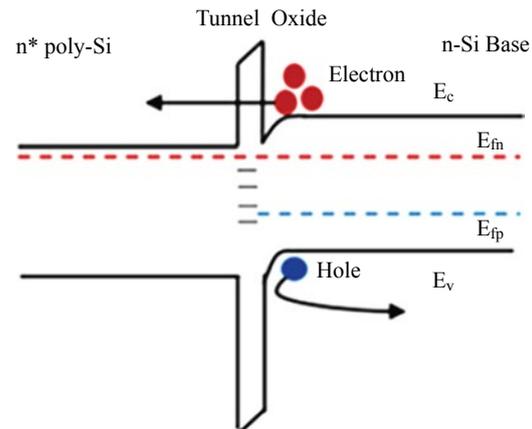
隨著TOPCon技術越來越成熟，目前各國國際大廠已紛紛開始找尋新技術來提高效率。其中能夠利用現有TOPCon技術基礎和產線設備升級的穿隧氧化鈍化背接觸(Tunnel Oxide Passivated Back Contact; TBC)太陽電池，結合了TOPCon的超薄穿隧氧化層能降低載子復合機率，以及交指式背接觸(Interdigitated Back Contact; IBC)結構中正面無電極接觸可增加光照面積之優點，使其具備更高的效率，預期將會是未來市場的主流之一，在未來甚至有機會再導入堆疊技術(Tandem)，可望會有更高的效率出現。在接下來的文章中，將先針對TOPCon與IBC做技術介紹，再概述TBC的技術發展與市場現況。

## TOPCon回顧

TOPCon技術是一種基於載子選擇性原理的技術，最早的概念由德國Fraunhofer ISE於2013年提出(如圖四所示)，其正面結構和傳統的鈍化射極與背面全擴散(Passivated Emitter and Rear Totally-diffused; PERT)太陽電池相似，但其核心技術在於背面的鈍化接觸。在TOPCon電池中，鈍化接觸結構非常關鍵，它由一層超薄的穿隧氧化層搭配一層磷摻雜的多晶矽薄膜組成，穿隧氧化層與矽晶功函數的差異會造成能帶彎曲，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

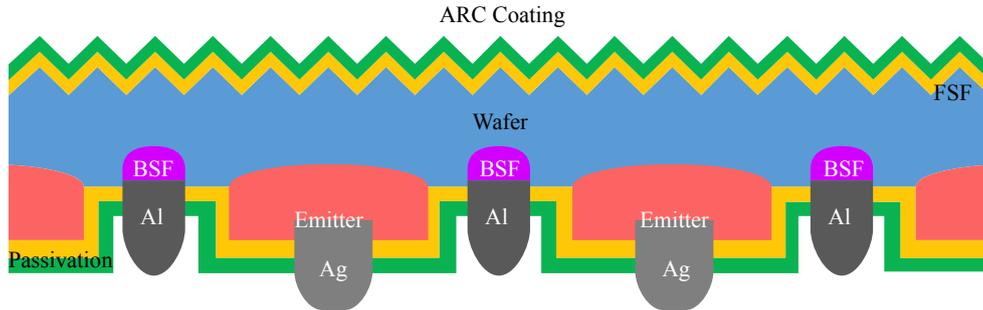


▲圖四 TOPCon電池結構示意圖<sup>(4)</sup>



▲圖五 穿隧氧化層能帶結構示意圖<sup>(5)</sup>

間的復合。摻雜多晶矽層是TOPCon技術中不可或缺的一部分，它對電池的鈍化性能極為關鍵，這一層多晶矽不僅起到保護超薄氧化層的作用，還能夠有效地降低載子的復合速率，進一步提高轉換效率。然而，摻雜多晶矽製程的各項參數對鈍化性能十分關鍵，例如擴散溫度的高低、退火再結晶溫度以及多晶矽層膜厚的控制，都會影響磷原子的擴散情況，進而影響到隱含開路電壓(Implied Open Circuit Voltage;  $iV_{OC}$ )。此外，摻雜濃度對鈍化性能也有著重要的影



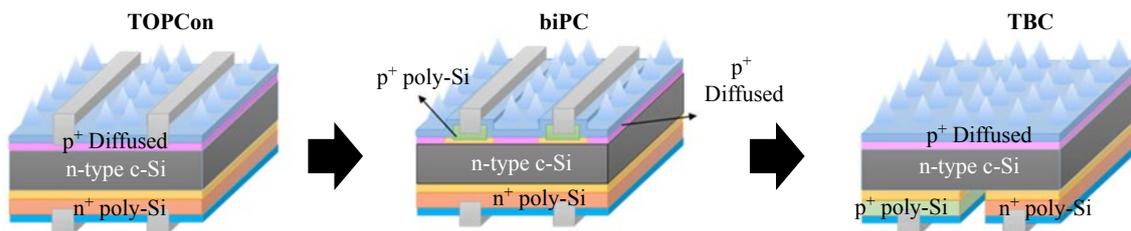
▲圖六 IBC電池結構示意圖<sup>(8)</sup>

響，適當的濃度可以提高鈍化效果，但過高的濃度則會導致鈍化效果下降。另外，TOPCon技術還需要關注超薄穿隧氧化層的製備。氧化層的厚度僅為1~2 nm，對於阻止少數載子的復合起到了關鍵作用（如圖五所示）。然而在製備過程中容易形成孔洞，會直接影響到電池的轉換效率，因此控制孔洞的密度、大小以及氧化層的厚度對電池性能至關重要。這種結構最大程度地保留和利用了PERC電池的製程設備，只需增加硼擴散、氧化層及多晶硅薄膜沉積設備，且無須進行背面雷射製程，對於廠商而言，投入之研發與設備成本相對較低。

## IBC回顧

IBC電池的概念最早在1977年由Lammert和Schartz提出<sup>(6)</sup>（如圖六所示）。IBC電池結構有以下幾項特點：首先是受光面電極的移除，除了減少遮光損失外，同時可以透過製程的改善，將受光面的鈍化效果最佳化；其次為正、負電極的同面化設計，這樣的設計不只可以透過最適化的電極比例調配，利用現有的材料得到最佳

化的電性與鈍化特性，而且在模組化時，由於正、負電極都位於同一側，還可以使焊接更為容易。在1986年，Sinton等人引入了「點接觸」技術，此為一種通過縮小金屬接觸面積來降低復合電流的方法，這一技術的應用顯著提高了電池的開路電壓，進一步提高了電池的效率和性能<sup>(7)</sup>。對於背接觸結構的IBC電池而言，載子必須有足夠長的擴散長度，以確保可以移動至相應的電極端並產生光電流。因此，具備高品質晶圓生命週期(Lifetime)是製作IBC電池的先決條件，為了因應這樣的材料需求，IBC大多使用n型晶圓。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結構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磷擴散製程形成背表面場(BSF)以及前表面場(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。



▲圖七 工研院規劃TOPCon到TBC技術藍圖

## TBC太陽電池

目前市場上的IBC電池分成三個類型：

①中國SPIC和芬蘭Valoe Cell生產的ZEBRA電池，是由ISC Konstanz開發的PERT電池的升級版。而ZEBRA技術是唯一使用磷和硼擴散製程得到磷矽玻璃(PSG)和硼矽玻璃(BSG)作為鈍化層的技術，消除了對 $\text{AlO}_x$ 鈍化的需求，此外，這是使用一般擴散（無選擇性載流子接觸）的太陽電池。②中國LONGi生產的POLO IBC，利用與PERC相同的製程設備，除了在背面具有超薄氧化層以及多晶矽層的載子選擇性接觸結構，更由於其正面僅由介電材料鈍化，沒有任何擴散在鈍化層下，因此具有高效率潛力。③結合了TOPCon技術和IBC結構的TBC太陽電池，目前該技術已被一些先進的太陽能電池製造商，如：新加坡Maxeon和中國AIKO所採用，並且正逐步推向市場，這些公司正在努力將實驗室中的高效技術轉化為具有成本效益的大規模生產技術。

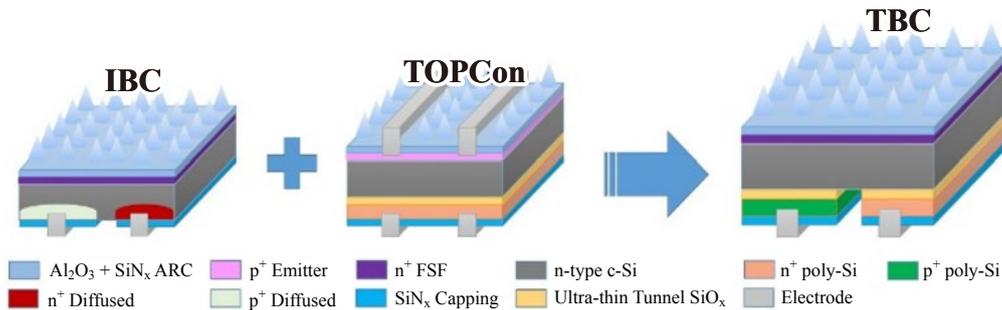
而現階段市場上也有其他技術結合IBC結構的XBC電池，例如由SHJ和IBC結構所結合的HBC電池技術，但由於其結構更加複雜，且製程也具有更高的難度，市場

接受度較低，因此在本篇文章中著重討論TBC技術發展。

圖七展示了工研院所規劃的TOPCon到TBC的技術藍圖。工研院已和茂迪公司成功開發TOPCon，並於2021年正式進入市場；之後隨即開始開發雙面鈍化接觸太陽電池(biPC)，利用局部摻雜多晶矽使用於正面電極下方來提高鈍化效果，大幅降低載子復合機率，使元件具有良好的光電特性，效率可達24.5%以上。預計在2025年開始投入TBC太陽電池的開發，結合TOPCon與IBC技術的優勢，預期效率可於2027年達26%以上（詳細結構如圖八所示）。

TBC太陽電池是一種先進的矽晶太陽電池技術，其核心在於利用穿隧氧化層和背面接觸結構來優化電池性能。這種技術是基於TOPCon技術進行改進，將電極全部移至電池背面，從而避免前表面金屬遮擋，提高了光吸收效率。除此之外，TBC技術使用摻雜多晶矽搭配穿隧氧化層來實現雙極性鈍化接觸，這種設計大幅降低了載子的復合機率，從而提升了電池的開路電壓。

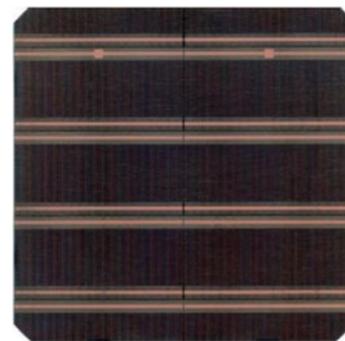
值得一提的是，TBC技術不僅在實驗室中顯示出高效率，還具備大規模生產的



▲圖八 工研院開發TBC電池結構示意圖(彩圖請見材料世界網)

潛力。其製造工藝與現有的TOPCon技術兼容，並且可以使用現有的產線設備進行生產，例如：超薄氧化層、多晶硅層的沉積，以及將雷射技術用於圖形化，金屬化過程則可使用網印技術等等。此外，電池之間的連接也非常簡單，可以使用標準的串接技術，尤其是在串接過程中使用3D連接圖案、導電膠或導電背板技術，能夠在背面金屬化方面提供極大的自由度。重要的是，其可搭配低成本的製造工藝，例如銅電極印刷技術。ISC Konstanz首先利用ZEBRA IBC電池開發銅漿的網印技術，並將在2024年轉移到TBC (poly-ZEBRA)中。由圖九可以看到利用銅漿網印後的電性結果，其所得到的數值和銀漿相近，因此以銅漿替代銀漿之可行性極高，有助於降低生產成本。這些特點使得TBC技術成為符合未來光電市場需求的選擇。

圖十為10 GW工廠不同技術的持有成本(Cost of Ownership; COO)分析，以同一國家來看，TOPCon和TBC技術的持有成本差異相近。比較兩種技術的生產成本(Production Cost)，在中國每瓦的成本差異僅為0.2美

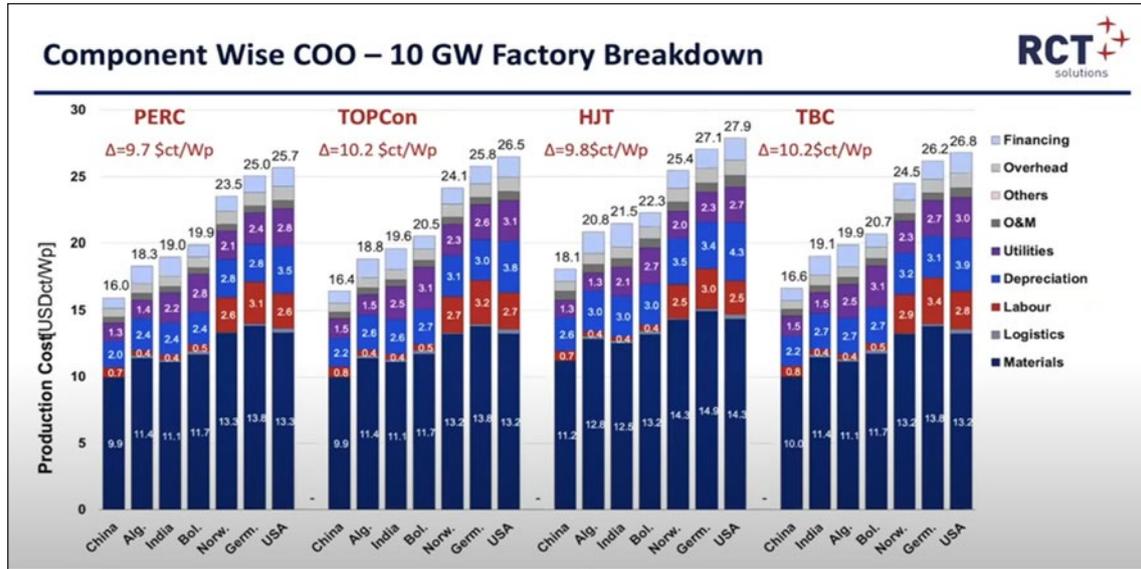


Cu-metallised M6 ZEBRA Solar Cell

		V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Eta (%)
Reference (Ag)	Best	687	41.9	80.3	23.1
	Average	689	41.9	79.5	22.9
Cu- ZEBRA	Best	690	41.8	80.56	23.2
	Average	690	47.8	79.8	23.0

▲圖九 銅漿金屬化之ZEBRA電池照片以及其電性結果<sup>(9)</sup>

分，即使在生產成本較高的美國，每瓦的成本差異也只有0.3美分。這表明儘管兩者技術有所不同，但在生產效率和成本控制方面都已達到高度優化的水準，使其在不同市場條件下均具備競爭力。未來隨著技術進一步成熟，TBC太陽電池有望在市場上占據重要地位。



▲圖十 各種技術之COO分析<sup>(10)</sup>

Most Efficient Residential Solar Panels 2024 * V4.7 July 2024									
Manufacturer	Model	Power Rating	Cell Technology	Efficiency	Manufacturer	Model	Power Rating	Cell Technology	Efficiency
SUNPOWER	Maxeon 7	445W	N-Type IBC	24.1 %	JINKO Solar	Tiger NEO N-Type	440W	N-Type TOPcon	22.5 %
AIKO	Neostar 2N	470W	N-Type ABC Back Contact	23.6 %	PHONO	Helios	440W	N-Type HJT	22.5 %
RECOM	Black Tiger Series	460W	N-Type TOPcon Back Contact	23.6 %	Q CELLS	Q.TRON M-G2+	440W	N-Type TOPcon	22.5 %
AEG	BC Premium	460W	N-Type ABC Back Contact	23.6 %	risen	n-Type Topcon	440W	N-Type TOPcon	22.5 %
LONGI Solar	Hi-MO 6 Scientist	455W	N-Type HPBC Hybrid Back Contact	23.3 %	DASOLAR	Black Series	440W	N-Type TOPcon	22.5 %
HUASUN	Himalaya G12R	450W	N-Type HJT	23.0 %	SHARP	NU-JC440	440W	N-Type TOPcon	22.5 %
CanadianSolar	TOPHiKu6	470W	N-Type TOPcon	23.0 %	AKCOME	Kookaburra Series	440W	N-Type TOPcon	22.5 %
TrinaSolar	Vertex S+	455W	N-Type TOPcon	22.8 %	HTSAE	HTS4-18X(N) Panda	440W	N-Type TOPcon	22.5 %
TW SOLAR	Repower N G12R-48	455W	N-Type TOPcon	22.8 %	WINAICO	WST-NGX	430W	N-Type TOPcon	22.3 %
JASOLAR	Deep Blue 4.0	455W	N-Type TOPcon	22.8 %	SPIC	Andromeda 2.0	440W	N-Type IBC	22.3 %
Philadelphia Solar	Nexus Series	455W	N-Type TOPcon	22.8 %	中東股份 JOLYWOOD	Niwa Light	435W	N-Type TOPcon	22.3 %
ASTRONERGY	Astro N5s	445W	N-Type TOPcon	22.8 %	Panasonic	EverVolt H	410W	N-Type HJT	22.2 %
REC Solar	Alpha Pure RX	470W	N-Type HJT	22.6 %					

\* Residential panels - 54, 60, 66 cells (108, 120, 132HC), or 96 & 104 full cell. Does not include commercial panels >2m

▲圖十一 太陽光電模組效率排行(May 2024)<sup>(3)</sup>

因TBC和TOPCon的生產成本相近，已有許多TBC模組產品在市場上發表。圖十一顯示了2024年上半年在太陽光電市場

上相應技術的模組效率，排名前四名分別是：SunPower的Maxeon 7，為24.1%；AIKO的Neostar 2N，為23.6%；RECOM



的Black Tiger Series是由AIKO代工生產，效率為23.6%；AEG的BC Premium，也為23.6%。這前四名的產品都是使用TBC技術，在實際應用中展現出色的性能。因此，我們相信在未來，前十名的技術都將會被TBC技術所取代，成為市占率最高的技術。

## 總 結

太陽光電產業已經是相對成熟的市場，隨著對高效率 and 低成本的需求不斷增長，TBC技術的發展成為必然趨勢。TBC太陽電池結合了TOPCon技術的鈍化特性和IBC技術的高受光面積，因此具有卓越的效率和成本效益。這使得它適用於各種應用場景，從住宅屋頂系統到大型太陽能發電站皆能發揮其優勢。TBC技術的前表面無金屬遮擋設計特別適合製造高效的太陽光電模組，能有效地利用太陽能。故此，TBC技術預期將在未來的光電市場中占據主導地位，未來發展潛力不容忽視。

## 誌 謝

本研究工作承蒙113年度經濟部能源署「高效率、智慧型太陽光電產品開發計畫(3/3)」(契約編號：113-S0102)經費支持，特此致謝。

## 參考文獻

1. 產業節能減碳資訊網，經濟部產發署。(https://ghg.tgpf.org.tw/ZeroFaq/ZeroFaqs\_more?id=8f59cd0fae3741f98291724b47aa8d96)
2. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 15th edition, VDMA (2024).
3. https://www.pv-tech.org/why-tbc-will-follow-shortly-after-topcon/
4. 張瀚丞、龔柏誠、陳松裕，TOPCon太陽電池鈍化技術簡介，經濟部能源署能源知識庫，2022。
5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. 彭胤璋、張瀚丞，背接觸矽晶太陽能電池之概述與展望，工業材料雜誌393期，第129-137頁，2019。
9. Kopecek, R.; Buchholz, F.; Mihailetchi, V.D.; Libal, J.; Lossen, J.; Chen, N.; Chu, H.; Peter, C.; Timofte, T.; Halm, A.; et al. "IBC Technology as Final Evolution for Industrial Crystalline Single-Junction Silicon Solar Cell". Solar, 3(1), 1-14. (2023).
10. Video Recordings: TaiyangNews Cell & Module Production Equipment & Processing Materials Virtual Conference on May 7-8, 2024. (https://taiyangnews.info/may-7-8-2024-cell-production-equipment-module-production-equipment-processing-materials/)