

背接觸太陽電池簡介

張瀚丞 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組，資深研究員

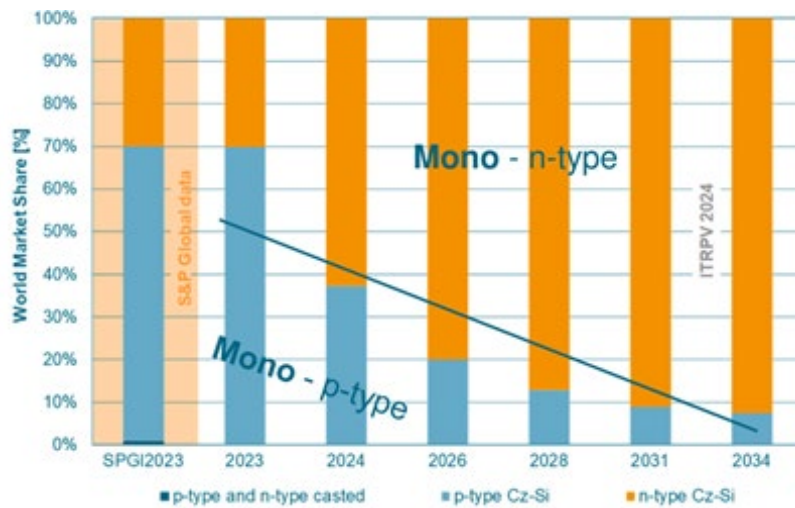
張瑞文 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組，副研究員

陳松裕 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組，資深研究員

背接觸太陽電池是一種創新型的太陽電池結構，旨在提高太陽電池的效率和美觀性。與傳統的太陽電池不同，背接觸太陽電池將所有電極放置在電池的背面，從而最大限度地增加了電池表面的光吸收面積，減少了光電轉換過程中的損耗。這種設計不僅提高了電池的效率，還改善了其外觀，使其更適合應用於建築整合一體化光電（Building Integrated Photovoltaics, BIPV）和其他需要高美觀性的應用場景。

一、前言

隨著全球市場對太陽電池效率的愈發重視，目前海內外企業多數已針對新型技術投入研發生產，具備高轉換率和低能源損耗優勢的 N 型電池無疑成為太陽能電池新一代主流產品。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^[1]（如圖一所示），N 型晶圓已主導整個矽晶太陽電池市場。



圖一、N 型晶圓及 P 型晶圓市占率預測^[1]

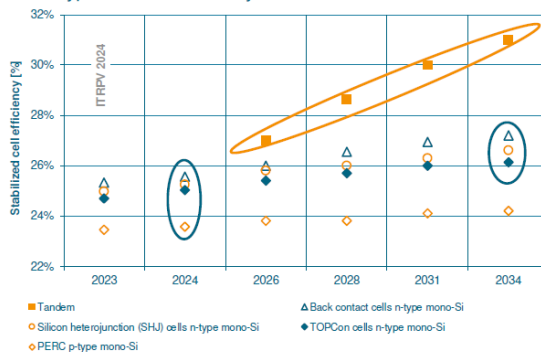
以 N 型晶圓為平台製作的指標性高效率電池即為背接觸太陽電池，根據 ITRPV 的資料，這種結構製作的 N 型電池在 2024 年可達到 25.6% 的轉換效率，並預期在 2034 年達 27.2%^[1]，已十分接近矽晶太陽電池的理論效率，如圖二。雖然背接觸太陽電池的市占率在 2024 年僅 4%，但隨著太陽電池技術的逐年進步，在未來十年內，背接觸太陽電池的市佔率將逐步提升至 15% 左右^[1]，如圖三所示。

Cell: Product – cell efficiencies in mass production



Trend: leading cell efficiencies in production

→ n-type leads in efficiency with SHJ and IBC

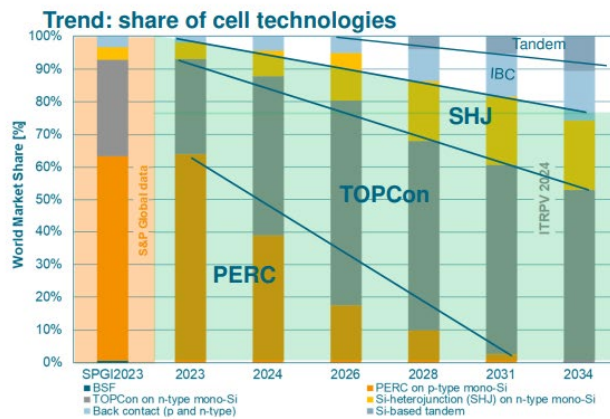


	2024	2026	2034
p-mono PERC:	23.6%	23.8%	24.2%
n-mono TOPCon:	25.0%	25.4%	26.1%
SHJ:	24.7%	25.4%	26.6%
IBC:	25.6%	25.8%	27.2%
Tandem:	-	27.0%	31.0%

→ still expected in mass production after 2025

→ Single junction cell efficiencies in production are approaching the practical limit

圖二、量產電池技術效率預測^[1]



- **PERC on p-type**
→ 40% in 2024
→ will loose dominance
- **TOPCON on n-type**
→ 49% share in 2024
→ ≈50 % in 2034
- **Si- heterojunction (SHJ)**
→ ≈8% in 2024 → ≈20% in 2034
- **Back contact concepts**
→ ≈4 % in 2024 → ≈15% in 2034
- **Si-Tandem** expected in 2026
→ 0.1% in 2026 → 10% in 2034
- **BSF** was phased out in 2023

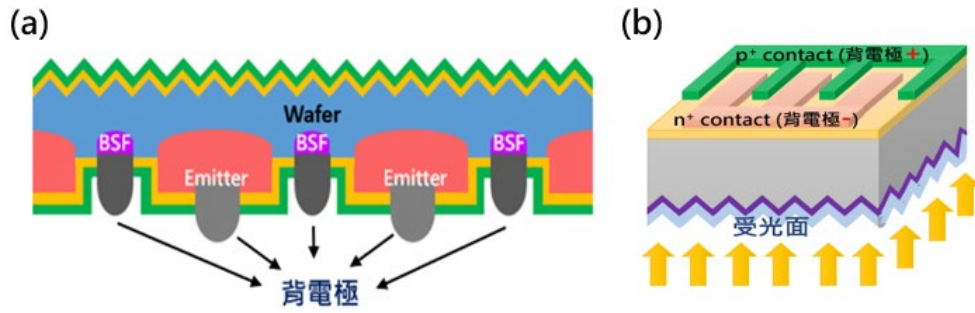


圖三、太陽電池技術市占率預測^[1]

在本文中，將首先介紹背接觸太陽電池的基本概念，接著分享目前國內外的發展狀況，最後探討背接觸電池技術的未來發展與評估。

二、 背接觸太陽電池介紹

背接觸太陽電池的概念最早在 1977 年由 Lammert 和 Schartz 首次提出^[2]。圖四為背接觸太陽電池的截面和電極佈局示意圖。背接觸太陽電池具有幾個特點，首先，它採用了無正面電極的設計，這不僅能消除傳統太陽電池不可避免的電極遮光造成的光學損失，還能通過製程改進來優化受光面的鈍化效果；其次，正負電極皆位於電池背面，這種電極佈局帶來三個優勢：(1) 可通過優化電極比例來獲得最佳的電學特性和鈍化效果；(2) 在模組封裝階段，由於正負電極位於同一側，焊接程序相較於傳統電池更容易，並可拉近電池片間距而提升模組效率；(3) 電池的正面顏色為單一均勻顏色，對於應用在 BIPV 上的美觀問題得以克服。



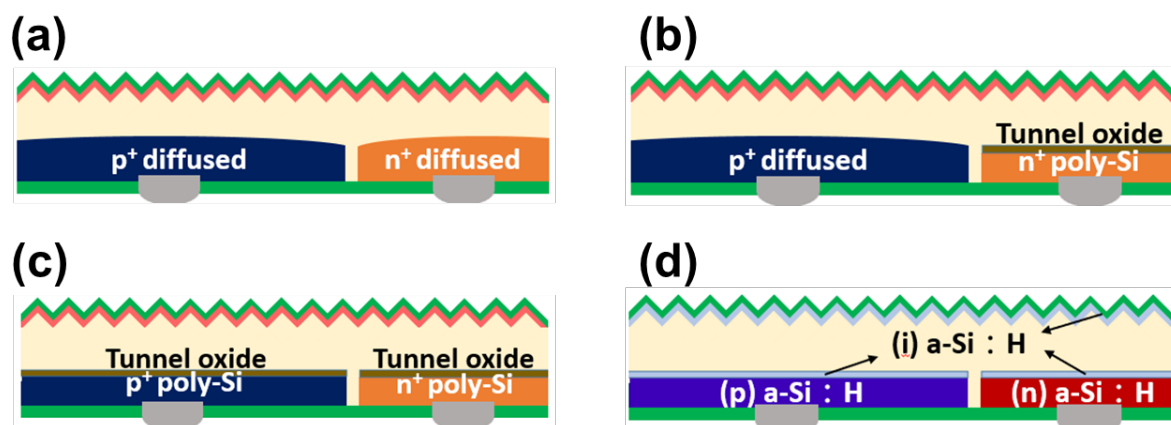
圖四、背接觸太陽電池之(a)橫截面圖示與(b)電極布局

對於背接觸太陽電池而言，使光生載子具有足夠的擴散長度是至關重要的，以確保它們能夠從生成位置移動到相應的電極端，產生光電流。擴散長度可以通過 $(D\tau_{\text{bulk}})/2$ 的方式來定義，其中 D 代表少數載子的擴散係數，取決於晶片的摻雜水準； τ_{bulk} 則表示晶片內部少數載子的壽命。換句話說，為最大程度地提高載子的收集效率，具有高的晶片壽命 (bulk lifetime) 是製作背接觸太陽電池的首要條件，因此具有較高 bulk lifetime 和高溫製程耐受度的 N 型晶片成為最適合的電池材料^[3, 4]。一般而言，高效率背接觸太陽電池的製造流程如下所述：(1) 通過蝕刻步驟在 N 型晶片上形成織化結構，減少反射增加光吸收。(2) 使用蝕刻製程對晶片背面進行拋光。(3) 形成背表面場 (Back Surface Field, BSF) 和前表面場 (Front Surface Field, FSF) 或前浮動射極 (Front Floating Emitter, FFE)。(4) 使用遮罩或雷射進行局部蝕刻定義射極區域。(5) 形成射極。(6) 在太陽電池正面沉積抗反射層，並在背面沉積鈍化層。(7) 使用遮罩或雷射定義點接觸金屬面積。(8) 製作金屬電極。以上為目前一個典型高效率背接觸太陽電池的製造流程概述，這些步驟確保電池的結構和材料特性，從而提高其光電轉換效率。

三、 背接觸太陽電池國內外的發展現況

目前市場上的背接觸電池主要分為四種類型：①中國 SPIC 和芬蘭 Valoe Cell 生產的 ZEBRA 電池，如圖五(a)。ZEBRA 電池是由 ISC Konstanz 開發的鈍化射極背面全擴散 (Passivated Emitter Rear Totally-diffused, PERT) 電池的升級版。而 ZEBRA 技術是唯一使用磷和硼擴散製程後得到磷矽玻璃 (Phosphosilicate Glass, PSG) 和硼矽玻璃 (Borosilicate Glass, BSG) 作為鈍化層的技術，消除對氧化鋁鈍化的需求。此外，這是使用一般擴散 (無載子選擇性接觸) 的太陽電池，量產的最高效率達到 24.6%，是無載子選擇性接觸的最高效背接觸太陽電池。然而，由於無載子選擇性接觸電池效率不高，開路電壓較低，因此將載子選擇性接觸技術導入背接觸太陽電池變得越來越重要，可突破現有的效率限制，進一步提升電池性能。②中國 LONGi 生產的背接觸電池，利用鈍化射極與背面太陽電池 (Passivated Emitter and Rear Cells, 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，更由於正面僅由介電材料鈍化，沒有任何擴散在鈍化層下，因此鈍化效果較佳，電池效率約在 24-25%之間，如圖五(b)。③將穿隧氧化鈍化接觸(Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon) 技術和背接觸結構結合的背接式穿隧氧化鈍化接觸 (TOPCon Back Contact, TBC) 太陽電池，如圖五(c)，該技術在接近 740mV 的開路電壓下，效率超過 25%，目前已被一些先進的太陽能電池製造商如新加坡 Maxis 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。④由 SHJ 和背接觸結構所結合的 HBC 電池技術，如圖五(d)，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。



圖五、目前市場上主要的四種背接觸太陽電池類型

表一中列出了截至今年七月為止太陽光電市場上相應技術的模組效率前十名：

SunPower 的 Maxeon 7 為 24.1%，AIKO 的 Neostar 2N 為 23.6%，Recom 的 Black Tiger Series 是由 Aiko 代工生產的，效率為 23.6%。AEG 的 BC premiumu 也為 23.6%。LONGi 的 Hi-MO 6 Scientist 效率為 23.3%。效率排名前五的技術都是背接觸電池技術，這些技術在實際應用中展現出色的性能，因此相信在未來，前 10 名的技術都將會被背接觸技術所取代，成為市佔率最高的技術。

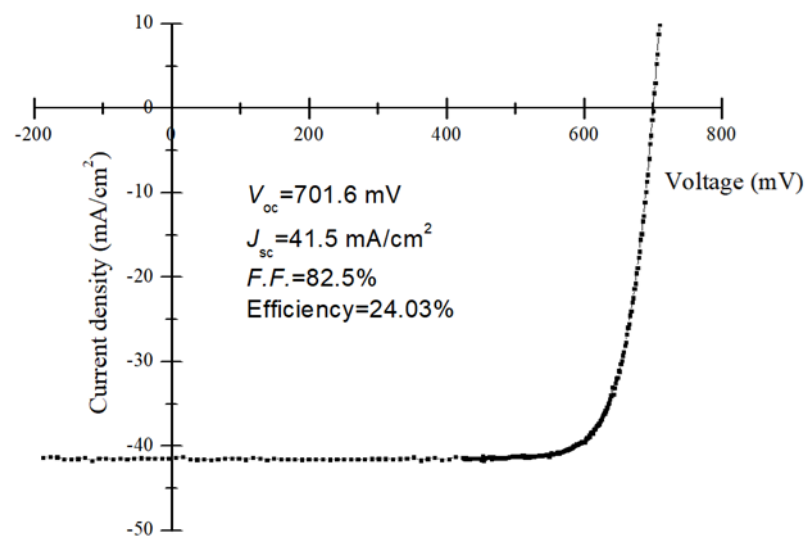
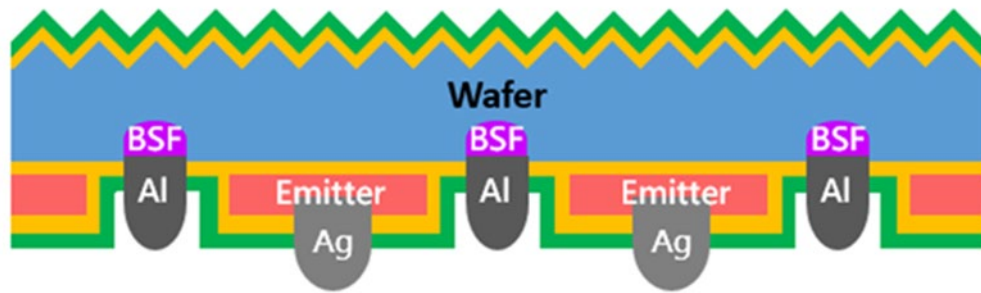
背接觸電池的製程目前還是繁雜且成本高，難被國內業界所接受，因此國內尚無此量產技術，但由於可提升電池效率到 25% 以上，仍舊吸引很多研究單位與電池生產廠商投入開發。自 2015 年開始，工研院綠能所和清華大學共同合作，研究團隊利用主流 PERC 電池製造技術，在傳統背接觸電極佈局與相近的電池規格下，分別製作了 P 型與 N 型兩種網印型交趾式背接觸 (Screen-Printed Interdigitated Back Contact, SP-IBC) 太陽電池，並進行詳盡的探究，效率可達到 21.16%^[6, 7]。自 2018 年開始，在經

濟部能源署支持下，工研院綠能所開始以新型背接式鈍化接觸太陽電池（Interdigitated Back Passivated Contact, IBPC）為開發重點，其結構和中國 LONGi 的背接觸電池類似，利用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，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，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。下圖六為 IBPC 結構示意圖，元件效率可達 24.03%，如圖七所示。

表一、太陽光電模組效率排行前十名(July 2024)^[5]

 Most Efficient Residential Solar Panels 2024 * V4.7 July 2024				
Manufacturer	Model	Power Rating	Cell Technology	Efficiency
SUNPOWER	Maxeon 7	445W	N-Type IBC	24.1 %
AIKO	Neostar 2N	470W	N-Type ABC Back Contact	23.6 %
RECOM	Black Tiger Series	460W	N-Type TOPcon Back Contact	23.6 %
AEG	BC Premium	460W	N-Type ABC Back Contact	23.6 %
LONGi Solar	Hi-MO 6 Scientist	455W	N-Type HPBC Hybrid Back Contact	23.3 %
HUASUN	Himalaya G12R	450W	N-Type HJT	23.0 %
CanadianSolar	TOPHiKu6	470W	N-Type TOPcon	23.0 %
Trinasolar	Vertex S+	455W	N-Type TOPCon	22.8 %
TW SOLAR	Repower N G12R-48	455W	N-Type TOPcon	22.8 %
JA SOLAR	Deep Blue 4.0	455W	N-Type TOPcon	22.8 %



四、背接觸太陽電池未來展望

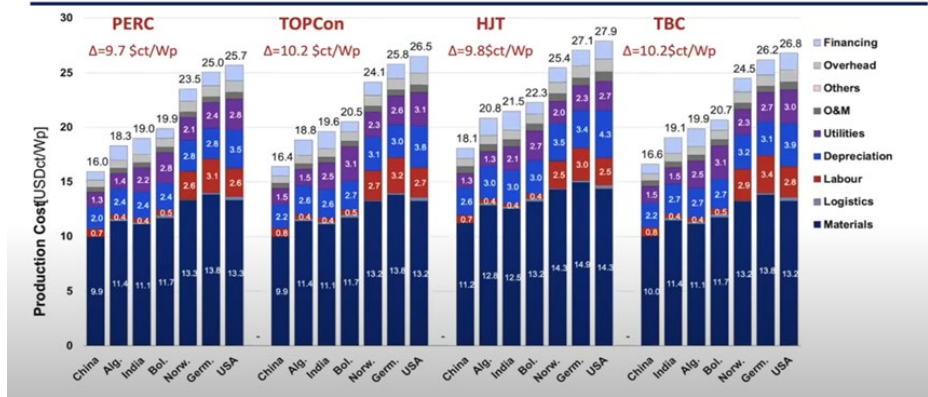
背接觸太陽電池是一種先進的矽晶太陽電池技術，其核心在於將電極全部移至電池背面，從而避免前表面金屬遮擋，提高光吸收效率。但背接觸太陽電池技術難度高、設備投資成本高，故國內尚未實現規模量產。

目前背接觸太陽電池技術發展面臨的問題包括：(1) 對基體材料要求較高，因為背接觸太陽電池結構，為使載子在到達背面 PN 接面前盡可能不被復合掉，需要較高的

載子擴散長度，亦即需要品質較高的晶片，(2) 製造過程複雜。背面指交叉狀的 P 區和 N 區在製作過程中，需多次鍍膜覆蓋和微影製程，為防止漏電，P 區和 N 區之間的隔離區也需非常精準，這無疑都增加製造的難度。

因此，隨著近年來晶片品質的提昇以及技術的進步，背接觸太陽電池中 TBC 技術開始迅速發展，其使用摻雜多晶矽搭配穿隧氧化層來實現雙極性鈍化接觸，這種設計大幅降低載子的復合機率，從而提升了電池的開路電壓，不僅在實驗室中顯示出高效率，更由於其製造工藝與現有的 TOPCon 技術兼容，可使用現有的產線設備進行生產。例如：超薄氧化層、多晶矽層的沉積，雷射技術用於圖形化，金屬化過程則可使用網印技術等等，具備大規模生產的潛力。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，在背面金屬化方面提供極大的自由度，這些特點使得 TBC 技術成為最符合未來光電市場需求的選擇。

圖八為 10GW 工廠不同技術的生產成本分析，以同一國家來看，TOPCon 和 TBC 技術的持有成本 (Cost of Ownership, COO) 差異非常小。折算成生產成本，在中國，每瓦的成本差異僅為 0.2 美分，即使在生產成本較高的美國，每瓦的成本差異也只有 0.1 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。因此未來隨著技術的進一步成熟，TBC 太陽電池有望在市場上佔據重要地位。

圖八、各種技術之 COO 分析^[8]

四、參考資料

1. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 15th edition, VDMA (2024).
2. M. Lammert and R. Schwartz, "The interdigitated back contact solar cell: a silicon solar cell for use in concentrated sunlight," IEEE Transactions on Electron Devices, 24, 337 (1977).
3. B. Aïssa, M. Kicambe, M. Hossain, O. Daif, A. Abdallah, F. Ali, and N. Tabet, "Emerging frontiers of n-type silicon material for photovoltaic applications: the impurity-defect interactions," Frontiers in Nanoscience and Nanotechnology, 1, 2 (2015).
4. D. Macdonald and L. Geerligs, "Recombination activity of interstitial iron and other transition metal point defects in p- and n-type crystalline silicon," Applied Physics Letters, 85, 4061 (2004).
5. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>.
6. P.Y. Hsin, Y.W. Peng, and J.Y. Gan, "High efficiency screen-printed p-Si interdigitated back contact cells: fabrication and analytical characterization", IEEE Journal of Photovoltaics, 7 (5), 1284 (2017).
7. Y.W. Peng, C.H. Chen, L.Y. Li, P.Y. Hsin, P. Yu, C.J. Huang, and J.Y. Gan, "Design, fabrication and characterization of n-Si IBC solar cells using PERC technology," IEEE Journal of Photovoltaics, 10 (2), 383 (2019).
8. Video Recordings: TaiyangNews Cell & Module Production Equipment & Processing Materials Virtual Conference on May 7 - 8, (2024).