



你不可不知的太陽光電

張瀚丞 / 黃志仁 / 林峻平 / 陳松裕 / 龔柏誠

工業技術研究院綠能所

太陽光電技術組

隨著全球氣候變遷的威脅日益增加，各國紛紛提出「2050淨零排放」的目標，太陽光電在減少溫室氣體排放方面扮演著重要的角色。太陽光電產業鏈包括上游的原材料生產、中游的太陽電池與模組封裝以及下游的零組件與系統工程。本文針對太陽光電是什麼、歷史演進、背後的基本原理以及運作方式等做整理及介紹。

一、什麼是太陽光電？

「光電」這個詞源於希臘詞「phos」，意為「光」，以及「volt」，即電位差或電動勢的單位「伏特」。而「voltaic」則是一個與電池中的化學反應所產生電流相關的詞彙。因此，光電效應指的是將光能直接轉化為電能的過程，當光照射到材料表面時，會引起該材料產生電子的物理效應，這些被激發的電子也被稱為「光電子」。1904年，阿爾伯特·愛因斯坦（Albert Einstein）發表了一篇論文，提出光量子假說，用以解釋光電效應。該假說指出光是由能量量子化的粒子組成的，這些粒子即光子。光子的能量 E 與其頻率成正比，即 $E = hf$ ，其中 h 代表普朗克常數， f 代表光的頻率。這一理論解釋了光是如何被轉換為電能，並為太陽光電的發展奠定了基礎。

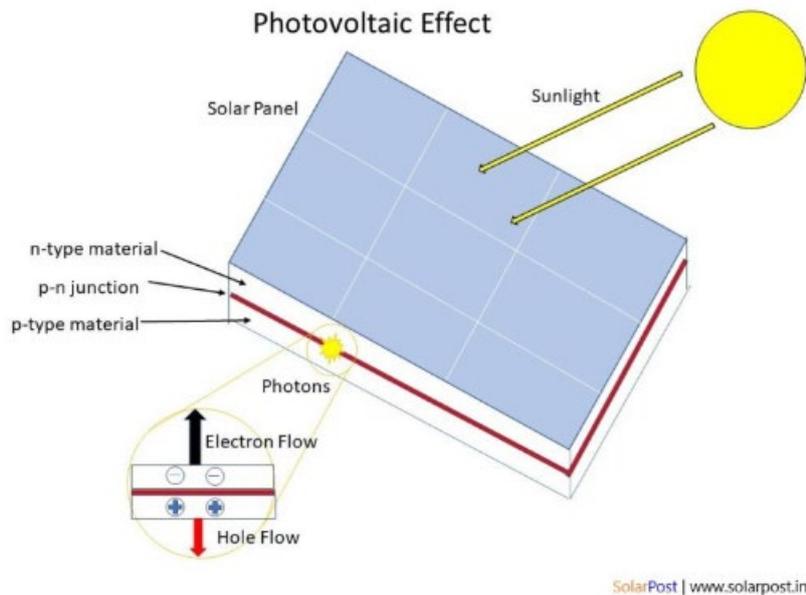
現今我們所說的太陽光電系統是一種將太陽光能轉換為電能的電力系統。典型的太陽光電系統包括太陽電池模組、逆變器、交流箱、直流箱以及監控系統等主要元件組成，吸收陽光並將其轉化為電能，從而提供潔淨且可再生的能源。

二、太陽光電的發展歷史

太陽光電技術的基礎可追溯到1839年亞歷山大·貝克勒爾（Alexandre Becquerel）所發現的光電效應，其將氯化銀置於酸性溶液中照光，並接鉑電極產生電壓，當接成電性迴路後便產生電流，得以將光能轉化為電能。1883年，查爾斯·弗里特（Charles Fritt）在硒上塗上一層非常薄的金屬，創造了第一個太陽電池，雖然弗里特希望他的太陽電池可以和湯瑪斯·愛迪生（Thomas Edison）的火力發電廠競爭，但這種基於金屬-硒接觸的太陽電池效率僅為1%，因此並不實用。硒的光電效應研究之後又持續了好幾十年，其間雖然有幾個實際應用的產出，但並未能廣泛使用。

現代太陽光電技術發展最重要里程碑出現在1940年，當時貝爾實驗室的半導體

研究員羅素·歐爾 (Russell Ohl) 進行高頻無線電的研究，希望精煉出更純的矽以接收更高頻率的無線電波。在研究中，他注意到某塊晶體矽有一個相當奇特的特性，每次測量時的導電性都不一樣。因此他打開檯燈仔細檢查，發現這塊矽晶中間有一條裂痕，推測這條裂痕是導致導電性不一致的原因。接著他又連接了一個電錶，發現指針竟然迅速跳到0.5伏特的位置，而當他關掉燈光時，指針又回到0伏特。經過進一步的分析，發現裂痕兩邊的矽晶含有不同的雜質：上半部含有少量硼，而下半部的雜質是磷。這些雜質原本應該存在於原料矽粉中，當原料經高溫熔化後自然冷卻時，較重的磷會比較快下沉，而較輕的硼下沉速度較慢。在這個過程中，恰巧在適當的時間和位置形成裂痕，將這兩種元素分隔在矽晶的兩邊。因此表面上看似完整的矽晶實際上是由具有不同特性的兩種矽組合而成，從而發現了太陽電池的基礎結構-PN接面 (PN junction)，如圖一所示。

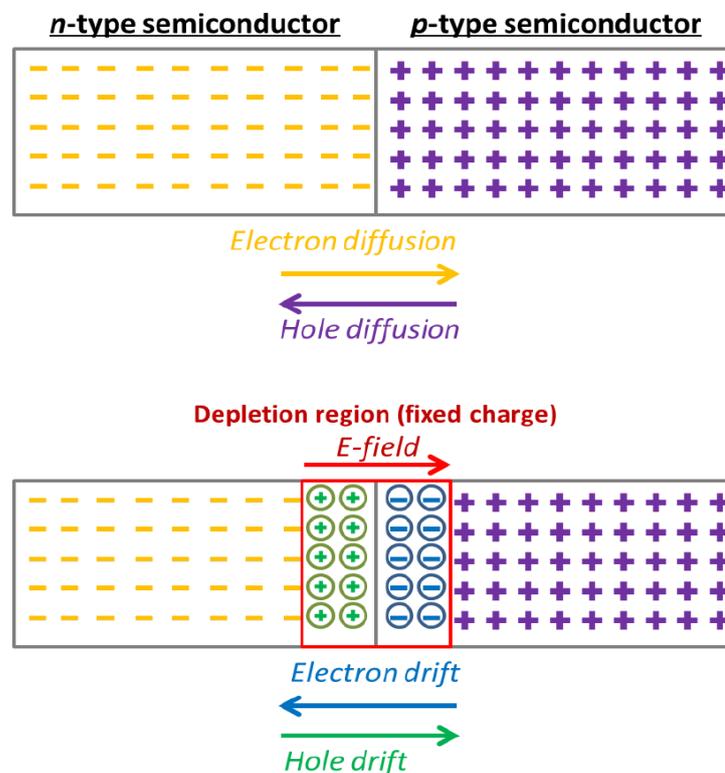


圖一、光電效應示意圖 (參考資料 : SolarPost)

接下來貝爾實驗室於1954年製作出第一個有實際應用價值的單晶矽太陽電池，該電池達到6%的效率。但由於當時主要是使用更便宜的典型能源—煤炭，因此並不具備成本效益。隨著太陽電池技術的進步，1970年代的效率逐漸提高，1973年發生石油危機，人們開始把太陽電池的應用轉移到一般民生用途上，使得太陽電池在市場應用上開始具有可行性與需求性。在接下來的幾年裡，隨著電晶體時代的來臨，半導體技術急速發展，令太陽電池效率有了更顯著的提升。到了1990年代，太陽電池的效率已突破20%。迄今，隨著新材料及技術的開發、製程的改良以及對可再生能源需求的增加，使得太陽光電的成本持續下降，成為最具有成本效益的能源類型。

三、太陽電池的基本原理

太陽光電系統是使用太陽電池將太陽能轉換為電能，太陽電池是由兩種不同類型的半導體組成，分別為P型和N型。將這兩種半導體緊密結合在一起，形成一個PN界面。由於P型和N型半導體分別含有較高濃度的電洞和電子，因此在它們之間會存在一濃度梯度，導致電洞和電子在P型和N型半導體之間互相擴散。電子會從N型半導體擴散到P型半導體，而電洞會從P型半導體擴散到N型半導體。當載子完成擴散後，電子和電洞會相互結合，導致N型半導體中的電子濃度減少，同時P型半導體中的電洞濃度也減少。在兩種半導體中間位置形成一個如圖二 [1]由N型半導體指向P型半導體的電場，稱為「內電場」。

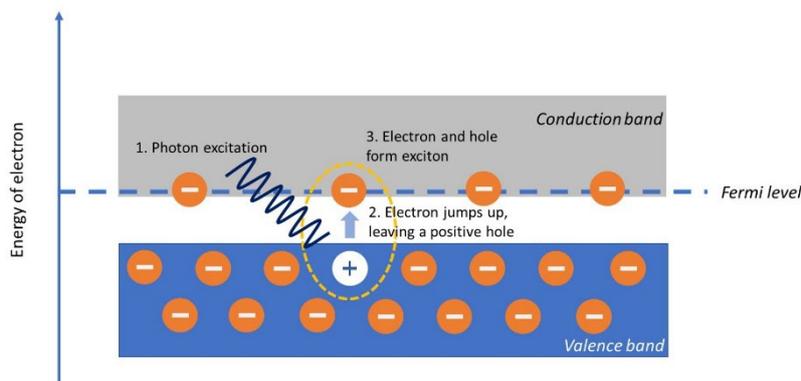


圖二、PN 界面內電場示意圖 [1]

根據愛因斯坦所提出的理論，光由光子組成，這些光子可以被太陽電池吸收。圖三說明當適合波長的光照射到太陽電池上時，光子能量被轉移到PN界面中的半導體材料中，導致電子跳到一個更高的能量狀態，稱為導帶，並留下了一個電洞在價帶中。由於額外能量導致電子移動，產生了兩個電荷載流子，即電子-電洞對。

未被光子激發時，電子與周圍原子形成化學鍵形成穩定的結合，因此無法移動。然而當電子被光子激發至導帶時，這些電子可以開始自由地在材料中移動。同時由於

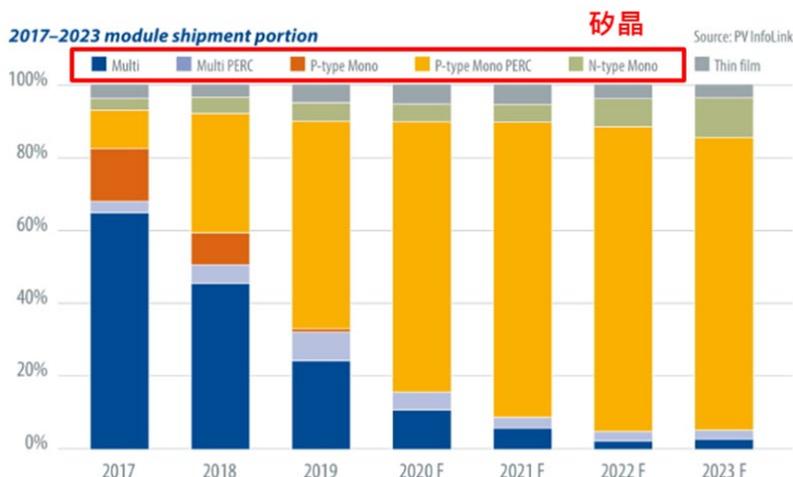
PN接面所產生的內電場存在，電子和電洞的移動方向與預期相反，被釋放的電子不是被吸引到P側，而是傾向於移動到N側，而電子移動後所留下的電洞，則移動到P側。正是電子-電洞對的這種移動過程，在電池中產生了直流電流。



圖三、光電效應電子電洞對形成示意圖（參考資料：PHYSORG）

三、太陽電池的種類

目前全球太陽光電市場中，矽晶太陽電池占比達95%以上，為市場主流（圖四）。主要原因有三：（1）矽晶太陽電池是目前工業化生產效率最高的太陽電池類型，單晶矽太陽電池的實驗室效率可達26%以上，多晶矽太陽電池亦可達22%。長期來看，矽晶太陽電池更具成本效益，節省更多的土地使用面積。（2）矽的含量豐富，為地球含量第二多的元素，成本相較其他材料更具競爭力，且特性穩定、無毒。再加上近年來，矽晶太陽電池已有成熟、標準化的產業供應鏈，使其量產成本大幅降低，無論是技術或市場，都比起其他材料更成熟穩定 [2]。（3）矽晶太陽電池封裝成模組的壽命長達25年以上，長期攤提可降低每度電均化成本。基於上述優勢，使矽晶太陽電池成為目前太陽光電市場的主流產品。

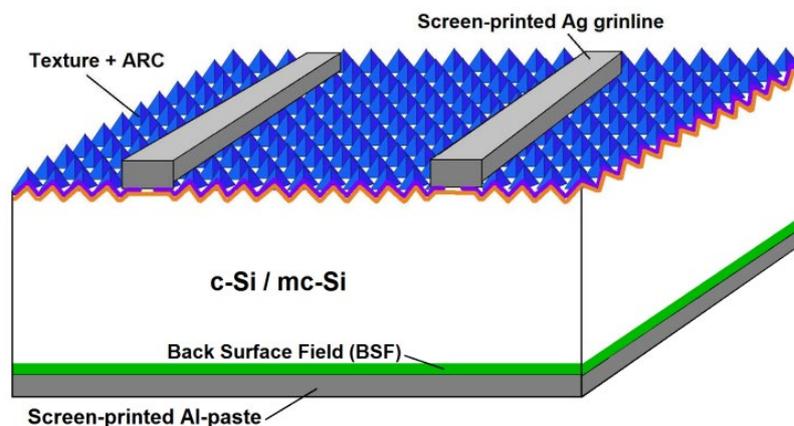


圖四、不同類型太陽電池之市占率（參考資料：PV InfoLink）

同時根據晶片類型，矽晶太陽電池可分為使用硼（或鎵）摻雜和磷摻雜之矽晶片所製作的P型和N型電池兩類。P型電池包括傳統的鋁背表面場（Aluminum-Back Surface Field, Al-BSF）太陽電池以及鈍化射極與背面（Passivated Emitter and Rear Cell, PERC）太陽電池。N型電池的主流技術有穿隧氧化鈍化接觸（Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon）、異質接面（Heterojunction, HJT）以及交指式背接觸（Interdigital Back Contact, IBC）太陽電池。近年來，由於N型晶片的製造成本逐漸下降至與P型晶片相近，性價比也顯著提升。許多在N型電池上的優勢也更受到關注，例如：（1）P型晶片少數載子是電子，N型晶片少數載子是電洞，矽晶片中摻雜對於電子的捕獲遠大於電洞，因此N型晶片表面復合速率較低，少數載子壽命比P型晶片高1-2個數量級，能大幅提升電池的開路電壓，電池轉換效率更高。（2）N型晶片的摻雜為磷，晶體矽中硼含量極低，在本質上削弱了硼氧鍵的影響，光致衰減效應趨近於零。（3）N型晶片溫度係數較優，在高溫環境下的功率輸出衰減較小。（4）N型電池雙面受光發電結構的雙面率較佳，弱光反應好，在日照強度低於 400 W/m^2 的陰雨天及晨昏仍可發電。接下來我們將針對以上所提到幾種常見的P型及N型矽晶太陽電池技術做一系列介紹。

(1) Al-BSF太陽電池

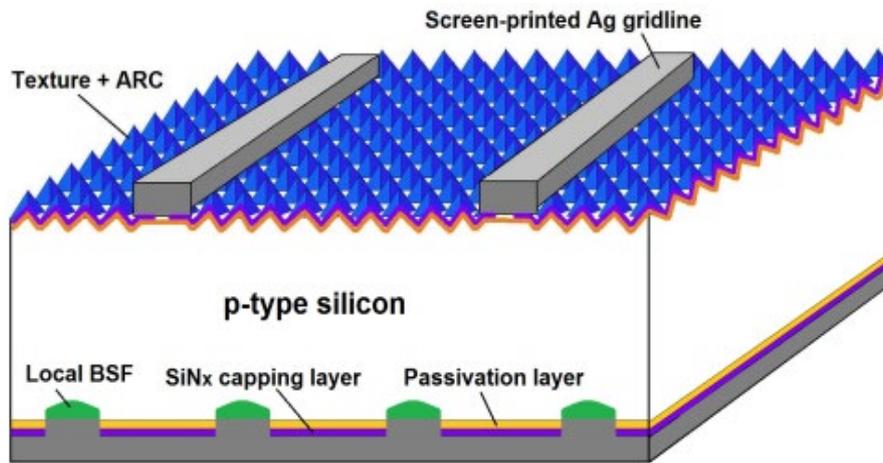
Al-BSF太陽電池的結構如圖五 [3]，主要由P型單晶/多晶矽晶片、磷擴散所形成之PN接面、正面 SiN_x 鈍化/抗反射層、正面金屬柵線電極以及背面全鋁電極所組成。鋁背電極燒結後形成具有高度摻雜的 p^+ 層，創造了一個背電場，有助於減少背面少數載流子的復合，從而提高電池的效率。典型的商規Al-BSF太陽電池製程簡易，開路電壓（ V_{oc} ）約為620~650 mV，短路電流密度（ J_{sc} ）在 $35\sim 39 \text{ mA/cm}^2$ 範圍內，填充因子（F.F.）則落於76~80 %之間，電池轉換效率為16~20%。



圖五、Al-BSF 太陽電池結構示意圖 [3]

(2) PERC太陽電池

PERC太陽電池的概念最早是在1989年由澳洲新南威爾斯大學 (University of New South Wales, UNSW) 的馬丁·格林 (Martin Green) 教授所率領之團隊所提出，其結構由常規AI-BSF太陽電池導入背面特殊結構衍生而來，是首個在標準測試條件 (Standard Test Conditions, STC) 下超過20%轉換效率的矽晶太陽電池結構，面積2 cm×2 cm之小電池，效率可達22.8% [4-5]。其主要重點在於針對矽晶太陽電池的背表面進行鈍化及採用局部之金屬電極接觸，降低背表面載子復合機率及速率，達到增加光在電池背面之反射率及紅外光吸收之目的而提升電池效率，其結構如圖六所示。

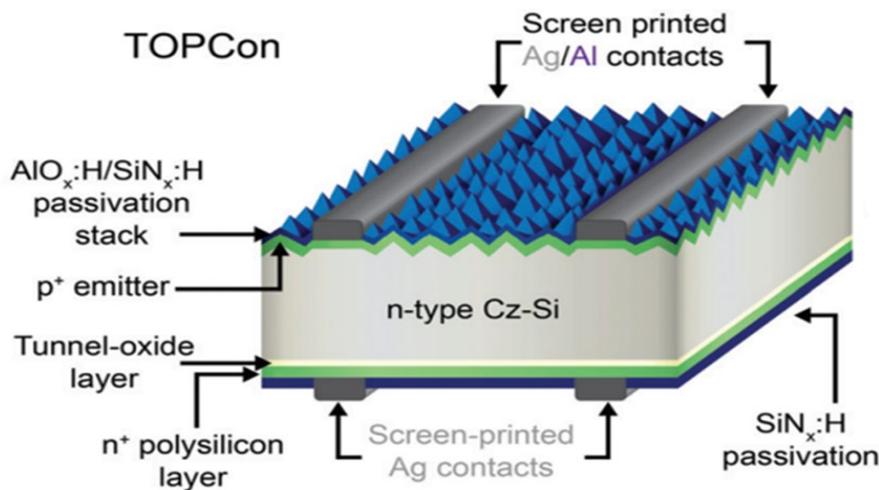


圖六、PERC 太陽電池結構示意圖 [3]

PERC 太陽電池開始量產至今，其最高效率紀錄就不停地被刷新。2022年7月5日天合光能 (Trina Solar) 光伏科學與技術國家重點實驗室開發210 mm×210 mm 高效 PERC 太陽電池，經中國計量科學院第三方測試認證，最高電池效率達到24.5%，刷新了大面積 M12 產業化 P 型單晶矽 PERC 太陽電池效率新的世界紀錄。值得一提的是這些紀錄不僅只是單純的 PERC 太陽電池，也結合了鈍化電極、選擇性射極、二次網印、先進電極圖案等結構與製程技術。

(3) TOPCon太陽電池

TOPCon是一種基於選擇性載子原理的技術，概念由德國Fraunhofer ISE研究單位於2013年提出，圖七為N型TOPCon太陽電池的結構示意圖。其電池結構主要是以N型晶片為基板的太陽電池，正面結構與n-PERC太陽能電池沒有太大差異，為普通金字塔織化、硼擴散、ALD氧化鋁與PECVD氮化矽的疊層結構達到鈍化和抗反射效果。核心技術為在電池背面製備一層超薄穿隧氧化矽，然後再沉積一層摻雜磷的多晶矽薄膜，二者共同形成了鈍化接觸結構。在適當的退火溫度下，TOPCon太陽電池之隱含開路電壓 (iV_{oc}) 大於740 mV，復合電流密度 (J_0) 小於5 fA/cm²，顯示穿隧氧化層鈍化接觸結構具有優異的鈍化性能。

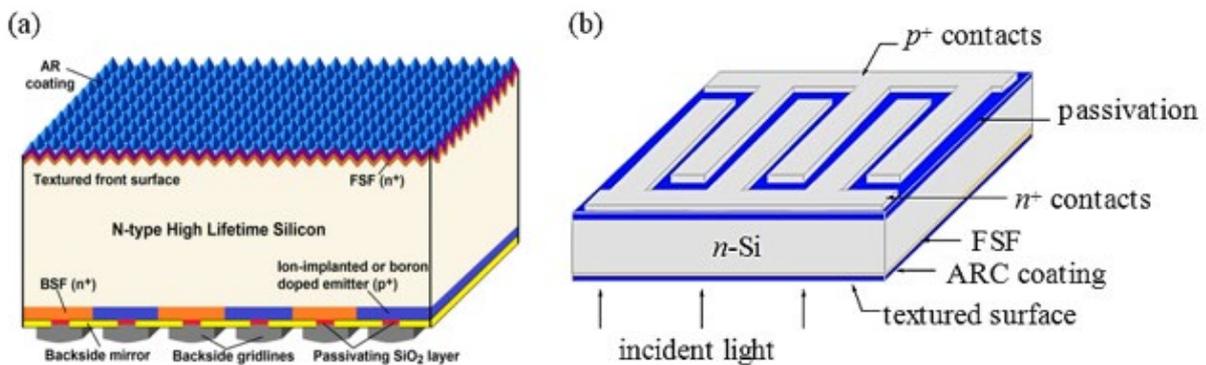


圖七、TOPCon 太陽電池結構示意圖 (參考資料：GSES)

TOPCon 太陽電池最大程度保留和利用現有傳統 P 型 PERC 太陽電池之設備製程，只需增加硼擴散、氧化層、矽薄膜沉積等設備，無須背面開孔和對準印刷。所以 TOPCon 太陽電池因其優異的高效率及兼容性，越來越受市場的關注，成為 N 型高效電池產業化的切入點。在經濟部能源署支持下，茂迪與工研院合作進行 TOPCon 太陽電池技術開發，以不到兩年的時間將 TOPCon 太陽電池與模組導入試量產，於 2021 年正式進入市場，並於 2022 年擴產至 200 MW，並成為獲得經濟部標準檢驗局國產下世代技術太陽能模組自願性產品驗證 (Voluntary Product Certification, VPC) 認證首例。目前所製備的電池效率達 24%，模組效率達 22.5%，功率達 410W。茂迪投資 4 億元於 2022 年 10 月開始生產 M6 尺寸 TOPCon 太陽電池，2023 年規劃升級為 M10 尺寸，將來產能達 400 MW，電池及模組產值上看新台幣 45.5 億元，為台灣太陽光電產業國際競爭力指標。

(4) IBC太陽電池

1987年，Lammert 和 Schartz 首次提出交指式背接觸太陽電池的結構概念 [6]。圖八為 IBC 太陽電池的截面和電極佈局示意圖。IBC 太陽電池具有以下幾個特點：首先，它採用無正面電極的設計，這不僅可以消除傳統太陽電池不可避免的電極遮光造成的光學損失，還可以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，這種電極佈局帶來了兩個優勢：一是可以通過優化電極比例來獲得最佳的電學特性和鈍化效果，二是在模組封裝階段，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。



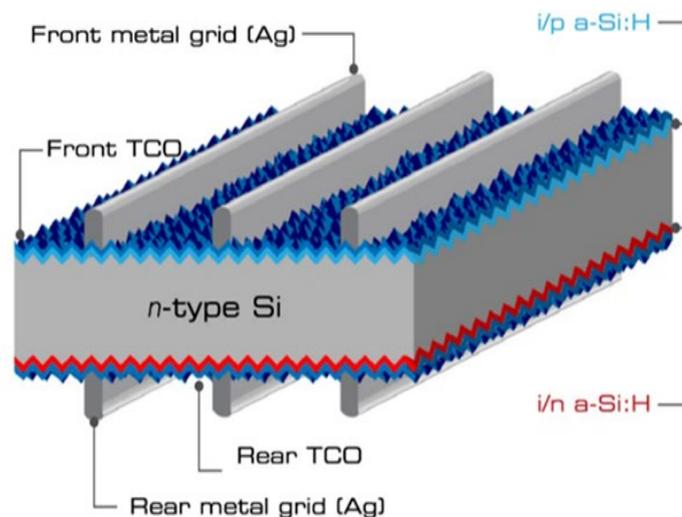
圖八、IBC 電池之(a)截面圖示與(b)電極佈局

IBC 太陽電池在當前各類矽晶電池技術效率最高，國際上 SunPower 處於領先地位。自1985年以來，即聚焦於研發 IBC 太陽電池，是首家能夠實現量產 IBC 太陽電池的公司。自推出第一代 IBC 太陽電池後，SunPower 就不斷往兩個方向升級 IBC 太陽電池技術：(1) 更簡化的製程及更低的成本；(2) 更好的鈍化技術。從 SunPower 將技術全部轉移給 Moxeon 後所披露的最新技術資訊來看，其最新一代 IBC 太陽電池 (Moxeon 6) 已吸收 TOPCon 太陽電池鈍化接觸的技術優點，保留銅電極製程，量產製程拋棄早期的黃光微影獲得簡化，成本在可接受範圍，電池轉換效率達到25%以上。2023年7月，採用 Moxeon 6的太陽光電模組經由 NREL 認證，模組效率可達22.8%，輸出功率為440 W。

(5) HJT太陽電池

HJT 太陽電池將同質 PN 接面轉變為異質接面，具備良好的雙面對稱特性。異質接面太陽電池，也被稱為 HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) 太陽電池，全稱為本質薄膜異質接面太陽電池。這種異質接面太陽電池最早由日本的三洋 (Sanyo) 公司於1990年成功研發，並獲得 HIT®商標註冊。後來為避免專利糾紛，

其他進入異質接面技術領域的公司採用不同的術語，如 HJT 和 SHJ 等等。在2014年，於2009年合併 Sanyo 的 Panasonic 推升 HIT 太陽電池 (143.7 cm²) 達到25.6%的效率，擁有極高的開路電壓和填充因子，分別達到740 mV 和83 % [7]。採用 N 型單晶矽晶片的 HJT 電池具有雙面對稱結構，正面依次為透明導電氧化物 (Transparent Conductive Oxide, TCO) 薄膜、P 型非晶矽薄膜和本質氫化非晶矽薄膜；背面依次為 TCO、N 型非晶矽薄膜和本質氫化非晶矽薄膜；最後使用網版印刷採低溫形成雙面電極，如圖九所示。

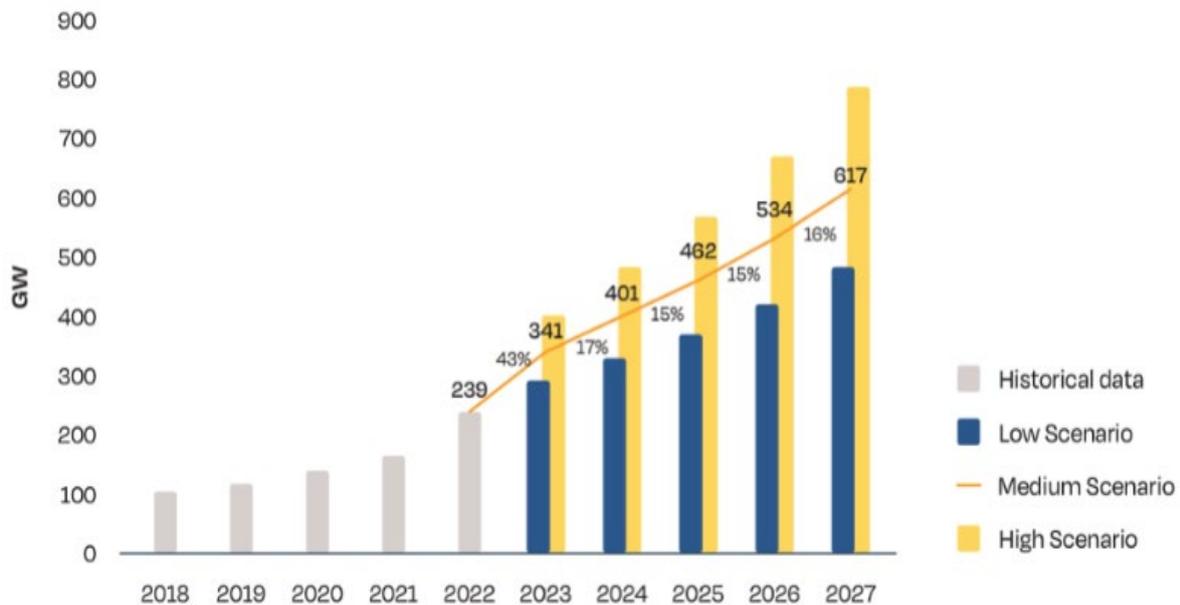


圖九、HJT 太陽電池結構示意圖 (參考資料 : AE SOLAR)

HJT 太陽電池 PN 接面是兩種不同的材料 (晶體矽和非晶矽)，這種異質構造減少了 PN 接面處的載流子復合，超薄本質氫化非晶矽薄膜是其中的核心工藝。在 HJT 太陽電池中，矽晶片和摻雜非晶矽層之間間隔一層富氫的鈍化材料。高品質的鈍化層能夠鈍化異質介面的缺陷、減少載流子復合並增加開路電壓。在眾多鈍化材料中，本質氫化非晶矽薄膜是當前最佳選擇。由於存在氫原子，介面形成的 Si-H 鍵成為有效修補矽晶表面懸鍵 (Dangling Bond)，從而降低介面缺陷態密度、提高少數載子壽命和增加開路電壓。同時異質接面兩端具有較大的電位差，間隔於中間的氫化非晶矽薄膜可以提供緩衝作用，調節能帶偏移，降低缺陷密度，減少漏電流，提高電池的輸出性能。綜上所述，HJT 太陽電池具有許多優勢，包括較高的雙面率、較低的溫度係數、較低的衰減特性以及流程的簡化和低溫製程等。但 HJT 太陽電池需使用相當多的 PECVD 製程，非晶矽製程門檻較高，設備相當昂貴，因此成本相對較高，目前市占率僅7 %。隨著技術的進一步發展，HJT 太陽電池的成本可望降低，成為更具吸引力的太陽光電產品，市占率將逐步提升。

四、太陽光電的市場及應用

由於石化能源的過度開發，造成空氣汙染、溫室氣體效應、氣候變遷等議題，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、巴黎協定以及從巴黎協定衍伸出來的淨零碳排，許多政府紛紛對太陽光電提出有效的獎勵補助政策，例如通過對太陽電池系統的補貼以及減免稅收來鼓勵企業和個人安裝太陽光電系統等等。截至目前，全球已有128個國家宣示2050年達成淨零碳排，促成太陽光電產業蓬勃發展。我國更於2022年3月正式公布「臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明」，提供至2050年淨零之軌跡與行動路徑，以促進關鍵領域之技術、研究與創新，引導產業綠色轉型，帶動新一波經濟成長。並期盼在不同關鍵里程碑下，促進綠色融資與增加投資，使太陽光電產品技術不斷提升，提高效率和品質。圖十為2023年SolarPower Europe發表的2023~2027年全球太陽光電的年裝設量及預測，儘管全球受到持續存在的新冠疫情（COVID-19）、戰爭衝突影響以及大環境通貨膨脹，相關原物料全面上漲，但以長遠來看，整體需求還是持續成長。



圖十、2023~2027年全球 PV 年裝設量及預測（參考資料：SolarPower Europe 2023）

現今太陽光電產生的電力不僅為生活在世界最偏遠地區的人們提供能源，也同樣為大城市的居民提供服務，用於抽水、照明、充電電池、電網供電等多種用途。無論你是誰，身在何處，從事何種工作，太陽光電技術可能已經在你未察覺到的方式影響著日常生活。以下是一些太陽光電技術的主要應用範疇：

(1) 獨立電力供應

在都市地區，太陽光電技術可提供獨立設備、工具、甚至整個住宅和社區的電力供應，包括交通信號燈、無線電發射器和水泵等基礎設施。而在最遙遠和農村地區，延伸傳統的電網並不是很容易或具有成本效益，甚至在某些情況下是不可能建置亟需的電力線路。在這些情境下，太陽光電技術就提供替代的解決方案。

(2) 太空科技能源

從國際空間站到環繞地球軌道的衛星，再到火星和月球上的探測器，太陽光電技術在太空科技應用方面扮演著至關重要的角色。高效率的太陽光電技術一直是推動太空探索的主要動力來源，不僅為宇航器提供可靠的電力，同時也為科學研究和探索活動提供必不可少的能源支持。太陽光電技術的應用不僅確保太空任務的持續進行，同時也為人類對太空探索的未來奠定堅實的基礎。隨著技術的不斷發展，太陽光電將繼續在太空能源領域發揮著關鍵作用，推動人類對宇宙的不斷探索向前邁進。

(3) 交通運輸

除了為電動車輛提供輔助動力外，太陽光電技術在如圖十一所示現代交通領域扮演著越來越重要的角色，已被廣泛應用於車載設備以提供額外的能源供應。許多汽車製造商甚至將太陽能板安裝在車頂或天窗上捕捉陽光並轉換為電能，用於車內設備的供電，從而提高車輛以及其他交通工具的能源效率。此外一些電動車充電站也採用太陽能發電系統做為其電力來源，不僅減少對傳統電網的依賴，同時也推動使用更環保的潔淨能源。



圖十一、太陽光電技術應用於交通運輸 (參考資料: PV IN MOTION 2023)

(4) 太陽能發電站

太陽能發電站是一個大型太陽能設施，利用太陽能板收集太陽能以產生電力，這些發電站與屋頂太陽光電系統和商業太陽光電系統有所區別。太陽能發電站運作方式類似於天然氣發電廠，將所產生的電力輸送到電網中，為公用事業的能源供應體系提供支持。與住宅和商業系統不同，太陽能發電站是分散設置的，通常在廣闊的區域中安裝地面太陽能板，其又可細分為不同類型的太陽能發電站，包括社區型太陽能發電站和公用事業級太陽能發電站。這些太陽能發電站可以用於為數據中心或其他大型能源用戶提供電力，或是供給政府使用。

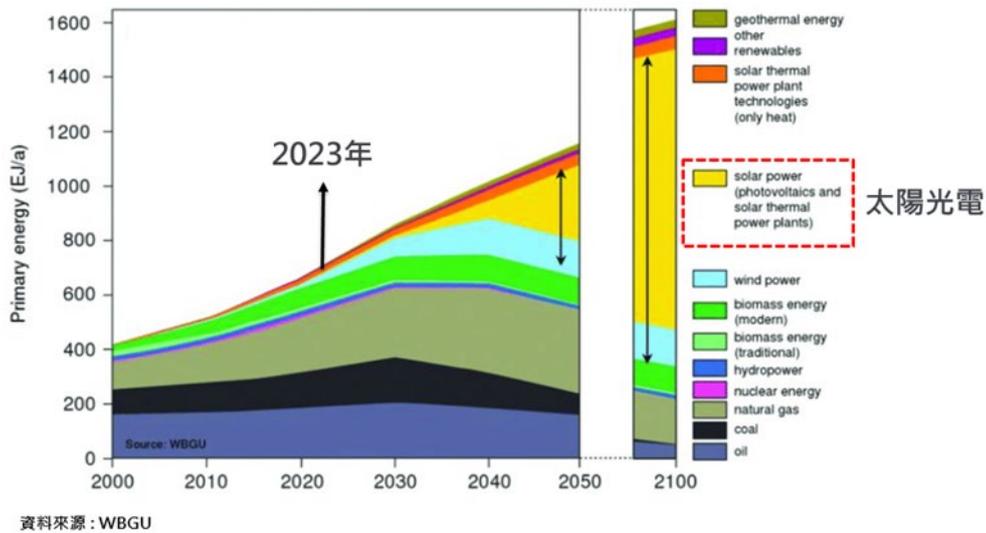
五、太陽光電的未來展望與結論

在全球能源轉型的浪潮中，太陽能是一種無限、清潔且可再生的能源資源，正成為推動全球可持續發展的重要力量。太陽光電技術是太陽能應用的主要形式之一，不僅具備著極為廣闊的應用前景，其快速發展與創新也為人們帶來無限的想像空間。

首先從技術創新的角度來看，太陽光電技術將會更加高效、穩定且智能化。隨著科技的不斷進步，人們將會見證到太陽電池的轉換效率持續提高，光電設備的耐用性不斷增強，智能控制系統的應用日益普及。這些技術的革新將使得太陽光電系統在更加惡劣的環境條件下仍能高效運行，並且更加容易融入城市化和工業化的環境中，為能源轉型提供堅實的支撐。

其次從市場發展的角度來看，太陽光電將成為全球能源市場的重要組成部分。隨著全球對環保意識的不斷提高以及能源政策的支持力度加大，太陽光電產業將會迎來更加廣闊的市場空間。在新興經濟體的快速發展以及發達國家對綠色能源需求的提高下，太陽光電市場將會迎來更多投資和機會，從而加速技術創新和成本下降的步伐。進一步降低太陽能發電的門檻，使得更多地區和國家能夠參與可再生能源的利用。

此外從可持續發展的角度來看，太陽光電的普及將有助於實現碳中和的目標。透過大規模太陽光電系統的建設，全球將有更多機會減少對傳統能源的依賴，減少溫室氣體排放，並逐漸實現碳中和的目標。這將對環境保護、氣候變化等全球性問題產生積極的影響，推動人類社會邁向更加清潔、綠色、可持續的發展道路。根據德國全球變遷諮詢委員會 (German Advisory Council on Global Change, WBGU) 預測，2050年後太陽光電將成為占比最高之電力來源 (圖十二)。因此未來太陽光電將在多個層面上展現其強大的潛力，為人類社會的可持續發展帶來更多希望與可能。



圖十二、WBGU 之能源供應情境預測 (參考資料：WBGU)

六、參考資料

1. D. Berney Needleman, Optical design guidelines for spectral splitting photovoltaic systems : a sensitivity analysis approach (2014) .
2. A. Reinders, P. Verlinden, W. Van Sark, and A. Freundlich, Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications: *John Wiley & Sons* (2017) .
3. N. Chen, "Understanding and development of cost-effective industrial aluminum back surface field (Al-BSF) silicon solar cells", *The University of North Carolina at Charlotte ProQuest Dissertations Publishing* (2015) .
4. N. Chen, A. Chowdury, E. Ahmad, V. Unsur, and A. Ebong, "Assessing the impact of multi-busbars on metallization cost and efficiency of solar cells with digital inkjet-printed gridlines", In *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET-CNS)* , *10th International Conference*, 60 (2013) .
5. A. Blakers, A. Wang, A. Milne, J. Zhao, and M. Green, "22.8% efficient silicon solar cell", *Applied Physics Letters*, 55, 1363 (1989) .
6. 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 (1997) .
7. Panasonic, Panasonic HIT. "Solar Cell Achieves World's Highest Energy Conversion Efficiency of 25.6% at Research Level." Press release (2014) .