高效太陽電池 TOPCon 與 PERC 製程成本差異分析

我國推動能源轉型規劃 2025 年再生能源占比目標要達 20%，太陽光電 2025 年須完成 20GW 的設置目標，近期日本政府經濟產業省估算，太陽能發電成本到 2030 年將首度低於核電成本成為最便宜的發電方式。因此，在符合台灣有限裝置面積與經濟效益下，應朝發展高效率矽晶太陽能電池產品並健全國內光電產業本土供應鏈，可於有限裝置面積裝設較高效能之太陽能電池裝置發電。而在發展新一代高效矽晶太陽能電池技術上，國內太陽光電廠商主要成本係投入為製程設備建置資金，主要競爭對手如中國、韓國等廠商即以雄厚的資金大量進行太陽能電池製程設備的擴產，造成傳統太陽能電池產品價格下降。面對國際競爭，國內亟需發展新一代高效矽晶太陽能電池產品(如 TOPCon 等)並開發自有專用關鍵製程設備，以建立技術門檻與增加國際競爭力。

圖 1 所示之 TOPCon 太陽能電池是國際太陽能電池廠對準開發之新一代高效矽晶太陽能電池產品之一，目前國內主流太陽能電池大廠(如茂迪、聯合再生等)均朝 TOPCon 太陽能電池進行開發，並將其視為未來取代 PERC 的主流產品，其產線設備可與 PERC 太陽能電池相容，同時具有高雙面率，低溫度係數，低衰減率等發電優勢，搭配雙面模組技術可大幅提升戶外發電效益，效益超越目前常規的 PERC 太陽能電池產品，可以較低建置面積達到更大的裝置容量。因此高效率 TOPCon 太陽能電池產品已是國際市場的重要發展趨勢，更是台灣太陽能電池製造商重要的新一代太陽能電池指標產品。TOPCon 被稱為穿隧氧化鈍化接觸太陽能電池技術，德國 Fraunfhofer ISE 於 2013 年首次提出穿隧氧化層鈍化接觸 TOPCon 技術，該技術是在電池背面製備一層超薄的可隧穿的氧化層和一層高摻雜的多晶矽薄層，二者共同形成了鈍化接觸結構，為矽片的背面提供了良好的表面鈍化。由於氧化層很薄(~1.5nm)，矽薄層有摻雜，電子可以穿透這兩層鈍化層，而電洞則被阻擋，如果在其上再沉積金屬，就可以得到無需開孔的鈍化接觸，德國 Fraunfhofer ISE 採用 N 型 FZ 矽基板，正面採用金字塔蝕刻，硼擴散，氧化鋁加氮化矽疊層膜鈍化和抗反射作用，背面採用 TOPCon 技術，其中穿隧氧化層製造設備為低壓化學氣相沉積系統(Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) 。本文導讀 B. Kafle 等人著作之文章名稱為 TOPCon – Technology options for cost efficient industrial manufacturing, 2021 年刊登在 Solar Energy Materials and Solar Cells 期刊 227 期之內容探討 TOPCon 與 PERC 製程成本差異。

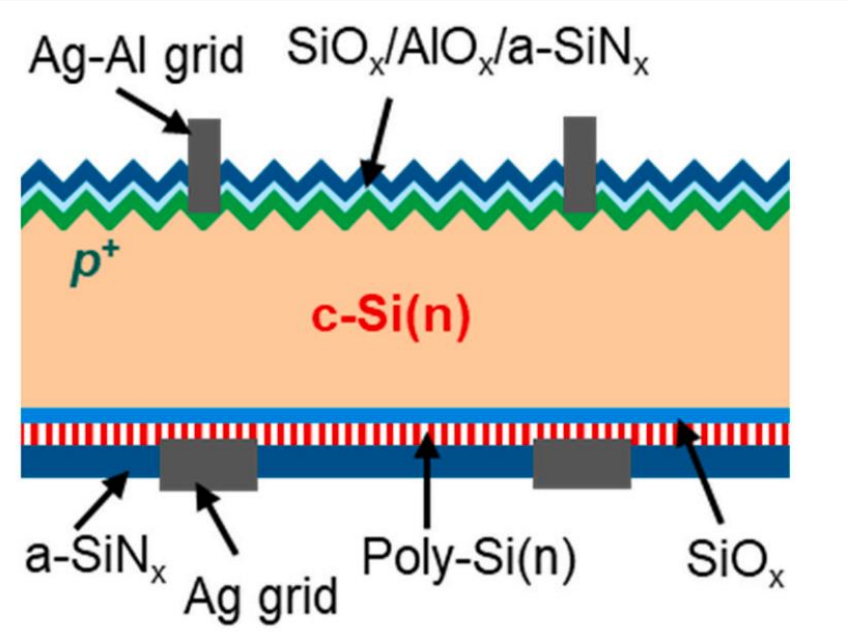

圖 1. TOPCon 電池結構示意圖

LPCVD 習知被用作在半導體廠的用於在低壓條件下沉積高階低覆蓋性的非晶矽/多晶矽層的半導體設施中重要製程之一。這樣做的主要優點技術是： a) 沿晶圓的良好厚度分佈，b）薄膜結構為具有良好階梯覆蓋性的緻密結構，c）使用接近 600°C 的相對較低的沉積溫度，d)可大批量晶圓進行生產，以及 e) 具有良好的摻雜分布。 TOPCon 概念需要在太陽能電池的背面沉積磷摻雜的 a-Si/poly-Si 層 (a-Si(n)/poly-Si(n))。在這裡，矽烷（SiH4）被用作用於矽沉積的氣體，可選用稀釋的 PH_3（在 N_2 中）以在薄膜層中進行摻雜。薄膜特性受以下因素影響:沉積壓力、矽烷濃度、摻雜含量，而最重要的是沉積溫度。對於相同的製程條件下，摻雜氣體的加入顯著影響薄膜生長，即沉積速率的變化。例如，取決於據報導，根據製程條件，加入 PH3 流量會降低沉積速率好幾倍 。這導致了 LPCVD a-Si 薄膜的製作上有兩種沉積方法:

a) 沉積本質 a-Si/poly-Si 層，然後是更換 POCl3 爐管擴散製程以形成 n 型摻雜多晶矽 (n) 層

b) 沉積 n 型摻雜的 a-Si(n)/多晶矽 (n) 層，並隨後在氮氣中進行熱退火。

在圖 2 中，計算了本質層的總體擁有成本(cost of ownership,COO) 和磷摻雜層為在 150 nm 的相同厚度，考慮到原位摻雜生長層的沉積速率降低約 36%與本質層的比較。可以觀察到，沉積磷摻雜層相對於本質非晶矽層，LPCVD 步驟的 COO 成本增加了約 15% 。在這裡，主要的成本增加因素之一是來自於顯著更長的製程時間，LPCVD 設備產出降低過程持續時間，這直接增加了所有的固定成本。磷摻雜層的額外 PH_3 通量的成本佔比並不顯著，因為相對應的 SiH_4 使用量高出 PH_3 約 20 幾倍，故主要製程耗材費用係來自於 SiH_4。

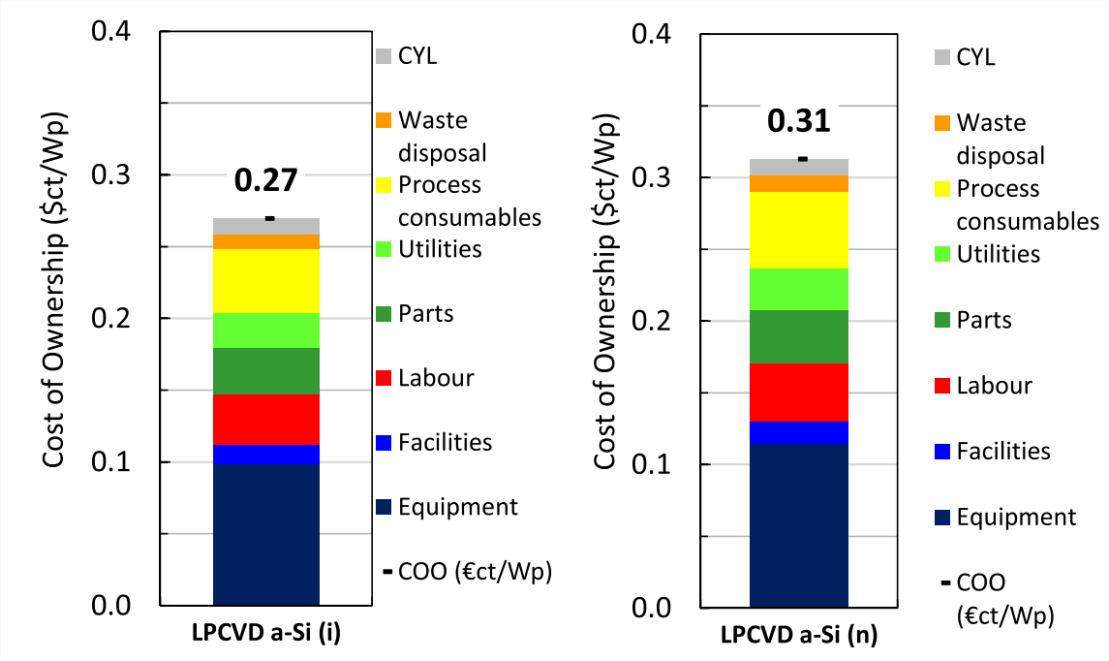

圖 2　150 nm LPCVD 沉積本質層（左）和磷摻雜非晶矽/多晶矽（右）層的擁有成本 (COO)。電池轉換效率為 23.5%。在這兩種情況下都假設 M4 尺寸的晶圓來計算 $ct/Wp 成本。此處 CYL 是指產能損失的成本。

TOPCon 的 LPCVD 生產路線

圖 3 顯示了用於 TOPCon 電池製造上的 LPCVD a-Si 技術的製程路線，以及雙面 pPERC 的參考製程路線比較。用於 p 型 PERC 電池(雙面 p-PERC)、進行鹼性表面粗糙化晶圓製程後，進入通入 POCl3 氣體的低壓爐管接收磷射極擴散爐。之後，通過使用雷射源在正面選擇性地形成磷的摻雜區，目的在於從磷矽玻璃 (PSG) 層驅動磷原子進入矽基板。這種選擇性射極製造方法目標在於降

低金屬接觸點下方少數電荷載流子的複合。隨後在同一個濕式化學清潔站點，去除射極或化學邊緣隔離 (CEI) 製程、PSG 蝕刻和進行臭氧清洗。臭氧清洗氧化矽表面形成氧化，然後在表面鈍化步驟之前進行 HF-dip 以最終去除氧化物。

提升效率的關鍵在於鈍化層的生長，正面和背面的鈍化是通過的熱氧化製程生長厚度約 2 nm 的薄矽氧化層在晶圓後（PECVD AlOx/a-SiNx 堆疊層）和前（PECVD a-SiNx）。AlOx/a-SiNx 的鈍化層是使雙面 p-PERC 生產的平均轉化效率高達 23.0%的必要步驟。鈍化處理後，背面網印在 Al 之前先網印 Ag 接觸層，然後是正面印有 Ag 網格。

兩條 TOPCon 路線的區別主要在於用於形成摻雜非晶矽/多晶矽層的方法。表面粗糙化製程後，硼摻雜在管擴散中使用 BBr_3 氣體對 TOPCon 電池進行摻雜形成 P 型摻雜硼（p+）形成硼射極(BSG)。隨後是濕化學製程，以單面蝕刻去除背面射極，而保持正面的 BSG 層完好無損；在執行基於臭氧的清潔程序之前。 BSG 在正面保持完整。為了保護硼射極在多晶矽的單面蝕刻（SSE）過程中不被蝕刻。之後，通過在 LPCVD 爐內氧化晶圓表面「原位」形成穿隧氧化層，然後沉積本質(LPCVD TOPCon exsitu) 或磷 (n+-)在前端製程中摻雜 a-Si/poly-Si 層 (LPCVD TOPCon insitu)。非晶矽/多晶矽沉積 LPCVD 製程是雙面鍍膜，因此會導致繞鍍在不需要的正側沉積層。

在 LPCVD TOPCon 異位製程路線上(exsitu)，需要將額外的 POCl3 擴散摻雜劑摻入 a-Si/poly-Si 層中，其並同時作為引起非晶層到多晶層相變所需的熱退火步驟。$POCl_3$ 擴散製程經過優化以摻雜多晶矽，使其具有恆定摻雜濃度的 n 型摻雜效果。在 LPCVD TOPCon exsitu 製程，採用濕式蝕刻工具在進行 POCl3 擴散後，去除 PSG 層隨後對多晶矽進行單面蝕刻 (SSE)，然後去除 BSG，最後是臭氧的濕化學清潔步驟。對於 LPCVD TOPCon 原位，磷摻雜的 LPCVD 層的沉積是在串聯中進行的用於在正面執行 a-Si 層 SSE 的濕化學工具，具有隨後的 BSG 蝕刻和基於臭氧的濕化學清洗。之後，需要經過高溫退火製程才能形成背面的多晶矽層。

為了減少 TOPCon 原位製程路線 中較昂貴的 LPCVD 沉積段的 COO，以優化的高溫退火步驟在正面硼射極上形成高質量的薄 SiOx 氧化層。這避免了使

用額外的熱氧化步驟形成 SiOx 氧化層，接續再進行沉積 PECVD AlOx/a-SiNx 疊層之前達到高質量鈍化效果。

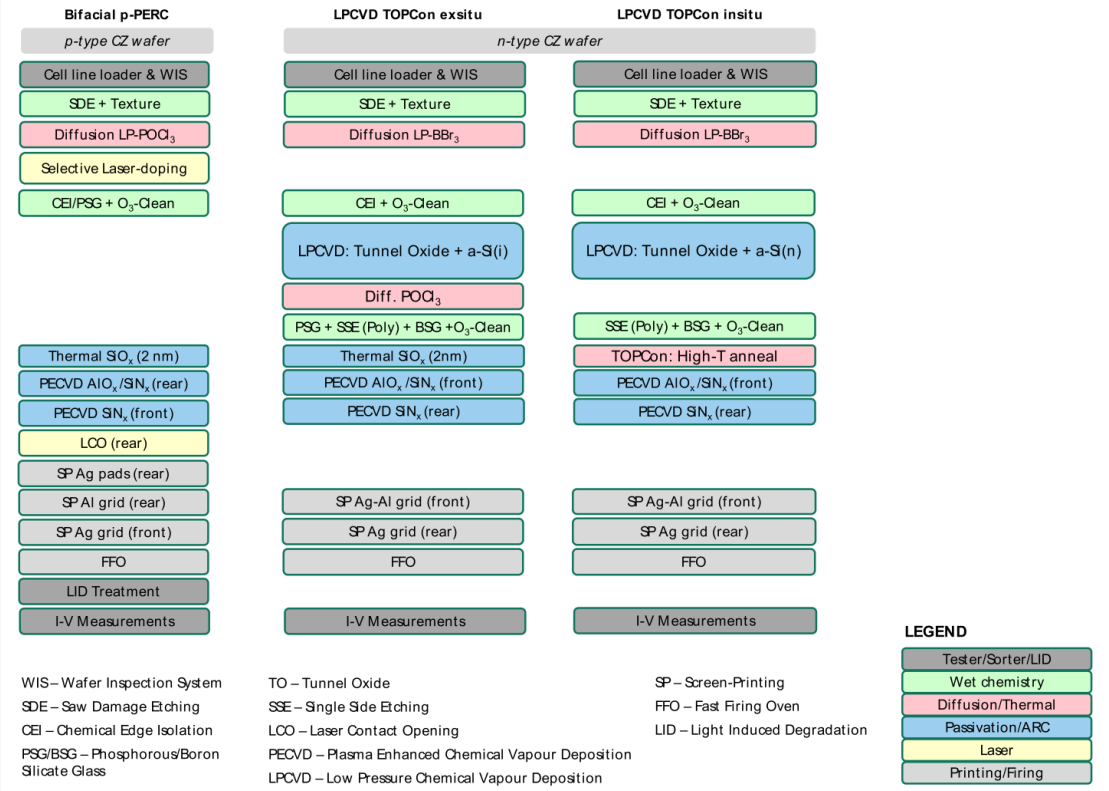

圖 3 顯示了基於 TOPCon 製程路線 LPCVD a-Si 技術，以及雙面 pPERC 的參考製程路線比較.

在比較 PERC 和 TOPCon 電池的總擁有成本 (Total cost of ownership) TCO 結果之前，直觀地仔細查看流程步驟的主要差異兩個從成本角度研究了 TOPCon 製程路線。現請參考在圖 4 ，在這裡，LPCVD TOPCon exsitu 路線具有四個製程步驟： LPCVD a/poly-Si(i) 沉積，LP $POCl_3$，整線濕化學製程 (PSG 蝕刻、SSE、BSG 蝕刻和 O_3 清洗）和低溫熱氧化（SiOx 硼射極）。 LPCVD TOPCon insitu 與其他 TOPCon 路線相比具有三個相異製程，這條路線獨有的步驟路線為：LPCVD a-Si(n) 沉積，SSE 的濕式化學製程、BSG 蝕刻和 O_3 清洗，以及高溫退火製程（多晶矽退火）。值得注意的是，雖然 150 nm 的 LPCVD a/poly-Si(n) COO 成本幾乎是高於 150 nm LPCVD a/ poly-Si(i)的 15%，但在 LPCVD TOPCon insitu 步驟中，摻雜 a/poly-Si 層的製程路線的累積起來可以降低約 18% 的 COO。在

這裡，LPCVD TOPCon insitu 生產法受益於沒有 $POCl_3$ 擴散步驟，LPCVD TOPCon insitu 將退火和氧化製程結合在一個製程步驟中，與 TOPCon exsitu 法相比還具有更少的製程數量與 LPCVD 的步驟，可降低生產成本。

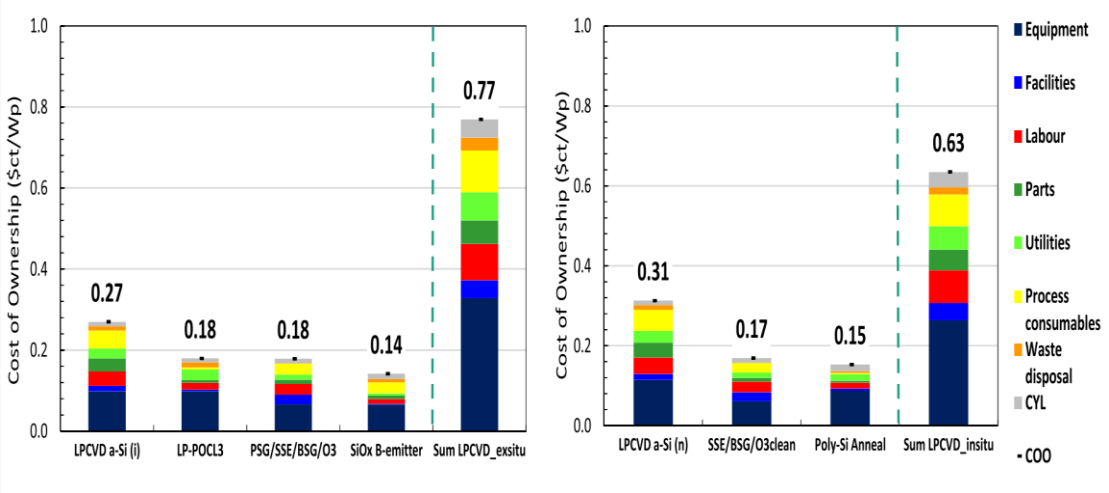

圖 4 TOPCon 概念獨有的各個製程步驟的 COO ($ct/Wp) - LPCVD TOPCon exsitu（左）和 LPCVD TOPCon insitu（右）。TOPCon 元件轉化效率假設為在 M4 尺寸晶圓上的效率為 23.5%，藉以計算 $ct/Wp 成本。這裡，CYL 是指產量損失的成本。

在圖 3 中，PERC 和 TOPCon 製程的總製造成本可分為濕化學、擴散和退火、鈍化、和金屬化製程四大類別。濕化學過程包括鹼蝕刻紋理化、CEI、玻璃去除(PSG/BSG)、O_3 清潔和 SSE 多晶矽層。可以看出，TOPCon 路線的濕化學製程總製造成本 COO 有所增加，主要是由於需要額外的玻璃蝕刻、SSE(poly) 和清潔製程步驟。擴散和退火製程包括 $POCl_3$ 和 BBr_3 摻雜，a-Si 的選擇性雷射摻雜和高溫退火步驟層。 TOPCon 路線的 COO 在擴散/退火製程中明顯更高，原因是：a) BBr_3 的製程持續時間更長與基於 POCl3 的製程相比，擴散導致顯著降低吞吐量，以及 b) 需要額外的 $POCl_3$ a-Si 層的摻雜製程或高溫退火步驟。鈍化製程包括熱氧化、LPCVD 多晶矽 PECVD AlOx/a-SiNx 疊層和 aSiNx:H 層的沉積和 PECVD 沉積。對於 TOPCon 路線，需要額外的 LPCVD 通常預計到 PERC 的沉積步驟會增加鈍化製程，如 LPCVD TOPCon exsitu 。然而，對於 LPCVD TOPCon 原位，製程成本通過結合高在單個製程步驟中進行溫度退火和氧化。金屬化成本包括焊盤 (Ag) 和網格（Al 和 Ag/Ag-Al) 和快速燒製過程。對於雙面 p-PERC 電池，雷射觸點打開和再生過程步驟也包括在“金屬化”類別。顯著更高的金屬化成本是 TOPCon 電池所需要的，主要是由於需要在兩側印刷 Ag 漿網格以形成具有低接觸電阻率的觸點。在事實上，在 TOPCon 電池的 COO

中，製程耗材成本的很大一部分主要與金屬化過程中的高銀消耗量有關。因此，為了進一步降低 TOPCon 電池的 COO，明顯需要減少銀漿的消耗。

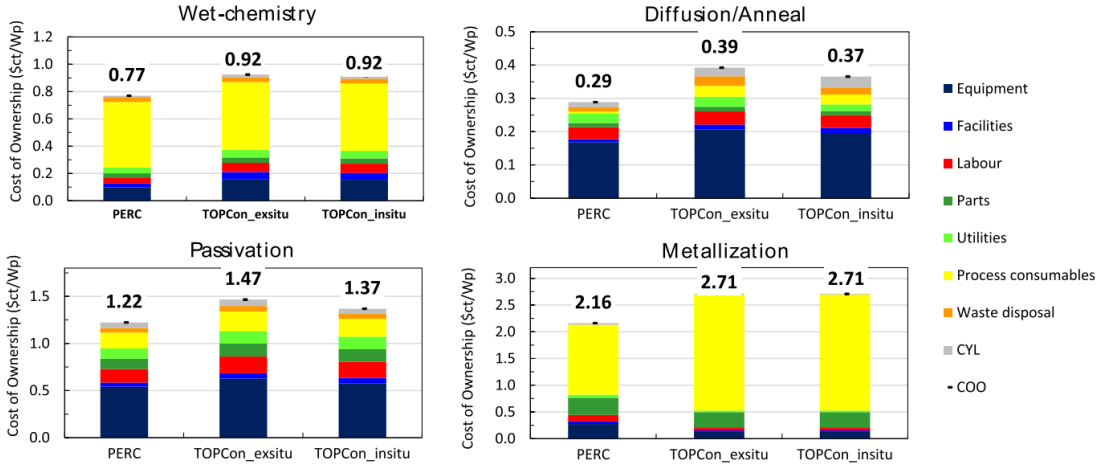

圖 3 雙面 p-PERC 與 LPCVD TOPCon 製程路線的擁有成本 ($ct/Wp) 比較，以及分類為濕化學、擴散和退火（擴散/退火）、鈍化和金屬化的各個製程步驟的成本。對於雙面 p-PERC 太陽能電池，選擇性雷射摻雜分為 Diffusion/退火與 POCl3 擴散製程