

## 高效率太陽電池關鍵製程設備-管式電漿輔助原子層沉積 (PEALD)

過去以矽晶太陽電池 PERC 為主的太陽光電產業，由於中國廠商挾政策補助優勢進行大規模投入，目前利潤逐漸下降。國內廠商已朝高效矽晶 TOPCon 太陽電池開發，其架構如圖 1 所示。TOPCon 電池投資產線成本相較現有 PERC 太陽電池業者而言，只需更新部分穿隧鈍化製程之設備，提昇高效率便成為太陽電池產業微利時代的較佳方案，市場預估 TOPCon 太陽電池未來 10 年將會是市場上的主流產品，但目前國內量產廠商極少，主因仍未有標準最佳製程技術，因此值得國內業者加速投入。由於目前國外生產穿隧氧化層之 LPCVD 設備單價仍高，主要競爭對手中國廠家亦自主開發相關設備，因此如何提升國內太陽電池廠商生產 TOPCon 太陽電池技術與降低關鍵製程設備成本，是亟待投入開發與解決之議題。

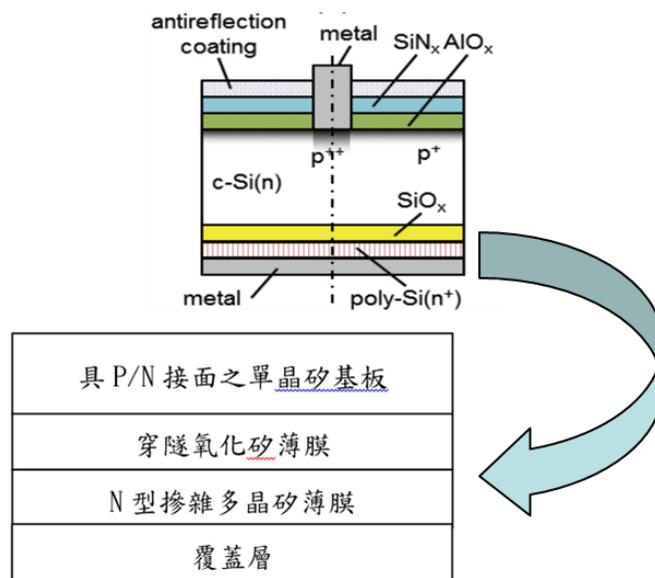


圖 1 TOPCon 電池結構

作為突破太陽電池效率的關鍵因素，關鍵製程設備一直是重要議題。近期由新加坡及澳洲科學家組成之國際研究團隊在《太陽電池進展》期刊上(Prog Photovolt Res Appl. 2022;1-10)發表透過一種能夠在原子尺度上控制穿隧氧化層沉積的新技術，製造了穿隧氧化層鈍化接觸 (TOPCon) 太陽電池。這項新技術旨在解決傳統低壓化學氣相沉積 (LPCVD) 方法帶來的問題，包括高維護成本和低沉積率，特別是對於原位摻雜。科學家們將所提出的方法描述為一種創新的管式量產型電漿輔助原子層沉積 (PEALD) 技術。它可以以低成本和高產量提供高質量、緻密的穿隧氧化矽 ( $\text{SiO}_x$ ) 薄膜。亦很容易地套用到用於單晶 PERC 太

陽能元件製造的管式 PECVD 系統中。一個沉積設備足以完成所有薄膜層的沉積，使其製造製程比傳統方法更具競爭力。該小組使用厚度為 170 $\mu\text{m}$ 、面積為 440.96 平方厘米的 G1n 型晶圓構建了電池。在溫度 200  $^{\circ}\text{C}$  和 25 秒的循環時間下沉積了所有薄膜。然後通過調整原子層沉積 (ALD) 循環次數來控制  $\text{SiO}_x$  厚度，並將所有樣品在管式爐中以 920  $^{\circ}\text{C}$  的溫度退火 45 分鐘，以促進結晶和摻雜劑活化。性能最佳的元件實現了 24.2% 的功率轉換效率、42.65 V 的開路電壓、17.74 A 的短路電流和 81.0%。證明「基於新型量產型管式 PEALD 技術實現的原子級控制穿隧氧化層，實現了商用 TOPCon 電池效率 > 24%」。

台灣為防止中國低品質太陽能板低價傾銷及面對歐美太陽能電池的競爭，國內大廠如茂迪等，目前均已投入研發高效率 TOPCon 太陽能電池產品量產，期能與市場上產品做出區隔，並藉由高效率與低國產設備成本活化多餘的設備產線。TOPCon 太陽能電池製程中穿隧氧化層為其關鍵製程技術，然而目前尚無標準化製程與國產化設備，關鍵製程技術及設備亟需開發，故 TOPCon 太陽能電池爐管式設備即是重要標的。金屬中心團隊將對應關鍵製程之 PEALD 與 PECVD 研發製程設備經驗整合為試量產製程設備，可符合業界所需產能，降低國內廠商投入 TOPCon 高效率太陽電池之產線建置成本，期望能提升台灣太陽光電產業國際競爭力，並能藉由導入高值化的關鍵製程設備而使 TOPCon 太陽能電池產品具有較大獲利空間。

團隊針對連續式背穿隧氧化( $\text{SiO}_x$ )及背鈍化接觸(Poly-Si)雙製程設備進行開發，在單一爐管內同時就有電漿增強式原子層沉積 (Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition, PEALD) 及電漿增強式化學氣相沉積 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 之整合功能。開發內容包含：爐管式電漿關鍵模組系統，包含石英爐管設計，石墨矩陣式電極晶舟開發設計、氣體供應噴頭模組、電漿源匹配電路設計、反應爐管之均溫受熱裝置，系統的自動化控制，將以上模組重新設計改造以有效實現太陽能電池效率與良率的改善，朝符合業界用於生產 N 型高效太陽能電池的背穿隧鈍化薄膜沉積需求，單腔雙製程爐管式(PECVD/PEALD)之設備架構如圖 2 所示。

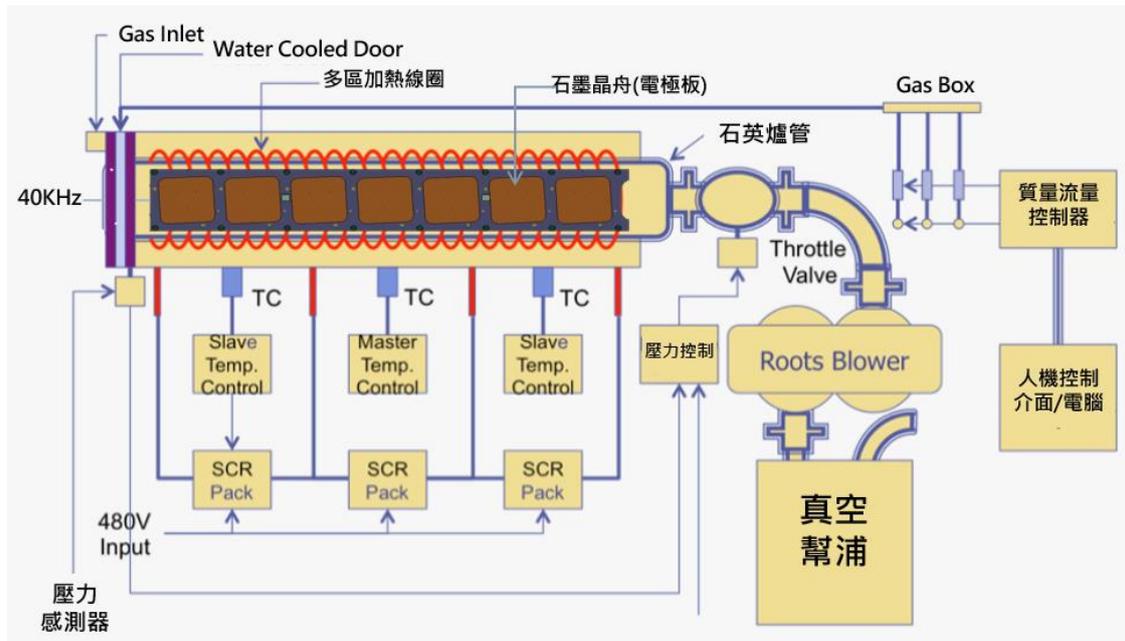


圖 1、單腔雙製程真空爐管系統設計架構

雙製程合一關鍵設備技術可用於改善 SiOx/poly-Si 薄膜製程中厚度分布均勻性不佳之問題，藉由雙製程合一的特性有利於提高 TOPCon 生產良率，並進一步降低製造成本。

研發(1) 爐管式電漿(沉積 Poly-Si/ SiOx 薄膜)之關鍵自製零組件設計開發，其包含：

- a. 爐管式電漿(沉積 Poly-Si/ SiOx 薄膜)雙製程真空系統設計
- b. 爐管式電漿之電容耦合式電場均勻度設計

與(2) 爐管式 PECVD、PEALD 之關鍵模組技術與系統整合：

- a. 真空爐管流場高均勻度設計與製作
- b. 批量式供料系統設計與供料管路建置
- c. 多區溫度控制與整機系統開發

進行爐管式單腔雙製程(PECVD/PEALD)設備開發。如圖 3 所示之爐管式單腔雙製程(PECVD/PEALD)設備及周邊裝置。

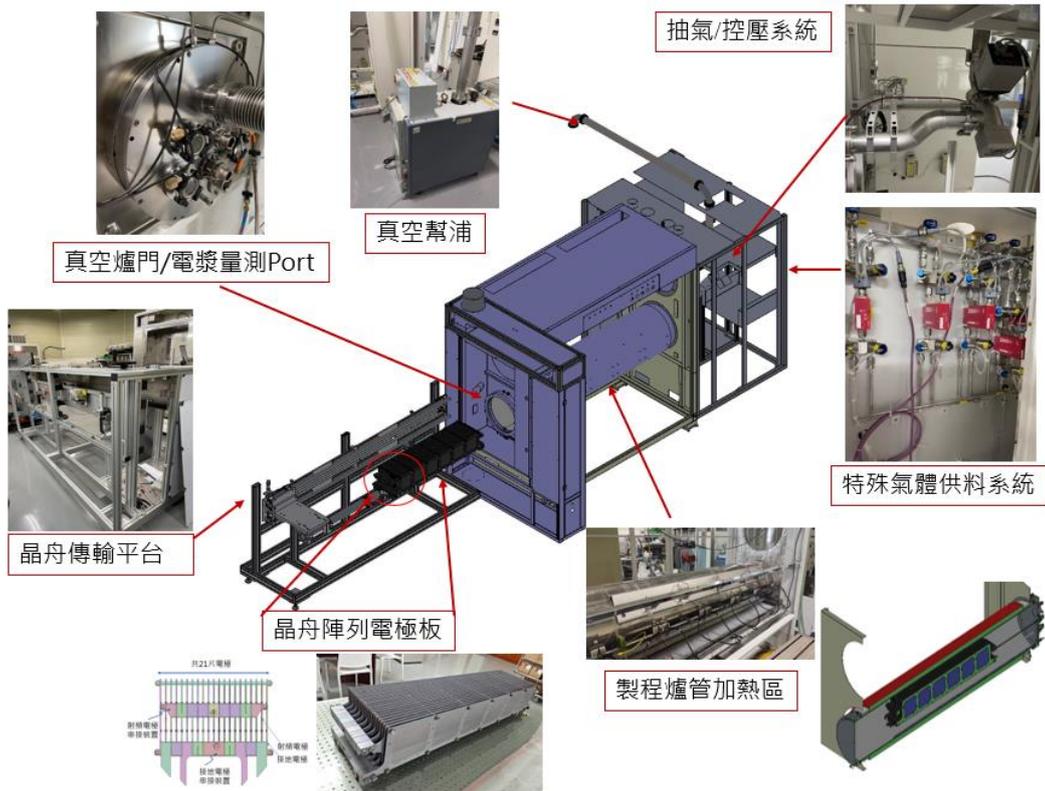


圖 3、單腔雙製程爐管式(PECVD/PEALD)設備

整合 PEALD 與 PECVD 的製程機制在單一腔體中實現。選用低溫高覆蓋性的 PEALD 之原子層沉積機制製造穿隧氧化層，再以 PECVD 製作多晶矽層，如此連續製程將構成 TOPCon 電池結構最關鍵的穿隧鈍化層結構。並藉由採用電漿機制降低製程溫度至 250°C 以下，採取現有量產的爐管式設備架構，具有單爐管 240 片晶片的容量，可容納 M6 晶片尺寸，初步先以 80 片進行製程驗證，鍍膜區域如圖 4 所示，圖 5(a)所示則為石墨晶舟進料位置，圖 5(b)所示則為該設備處於電漿製程狀態。

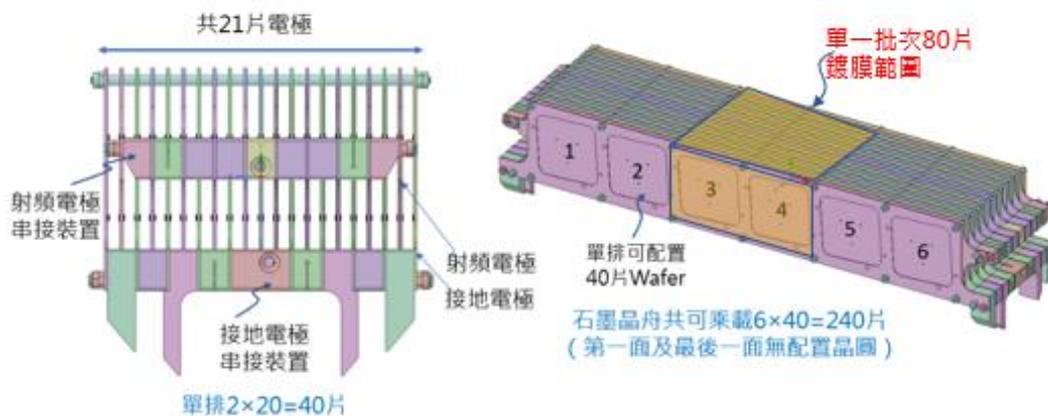


圖 4 批次 80 片鍍膜區域

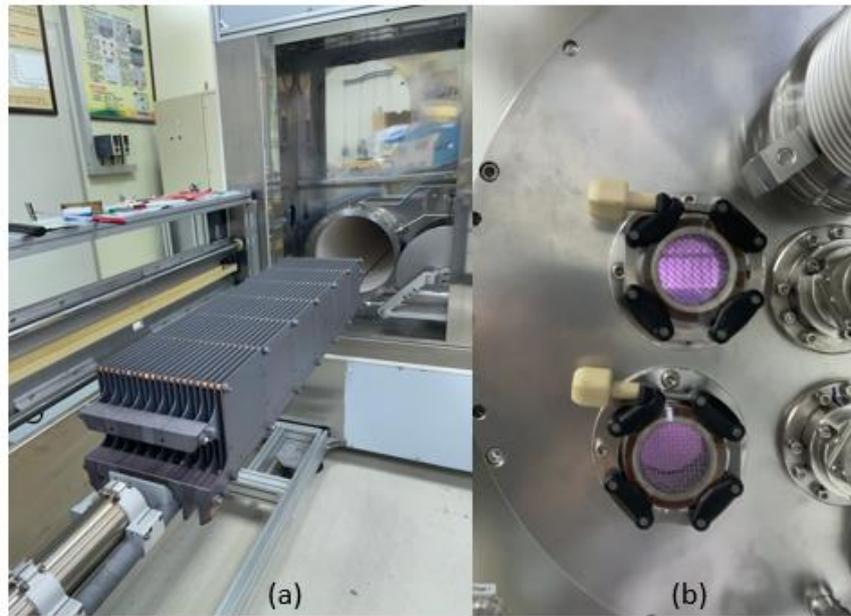


圖 5(a)石墨晶舟進料位置(b)電漿製程狀態

圖 6 為爐管晶舟第 3、4 區的 TOPCon 元件效率分布統計圖。完成 M6 尺寸(166mm\*166mm)TOPCon 單晶太陽能電池元件共 20 片，其轉換效率落在 22.3%~23.7 之間，主要集中區在 23% 以上，其最佳光電轉換效率達 23.7%，其短路電流密度達  $40.8\text{mA}/\text{cm}^2$ ，開路電壓達 0.713V，填充因子達 81.5%(如圖 7 所示)，如圖 8 所示為 TOPCon 太陽能電池元件之外部量子效率圖，由圖得知較高與較低效率的太陽能元件，於 500~1000nm 波段有明顯的差異，也就是鈍化層的優劣所影響其廣波段的斷層差異。從期中至期末這段時間透過不斷的優化鈍化層薄膜能力，提升其有效少數載子生命週期來提升元件 Voc，進而提升整體太陽能電池效率。

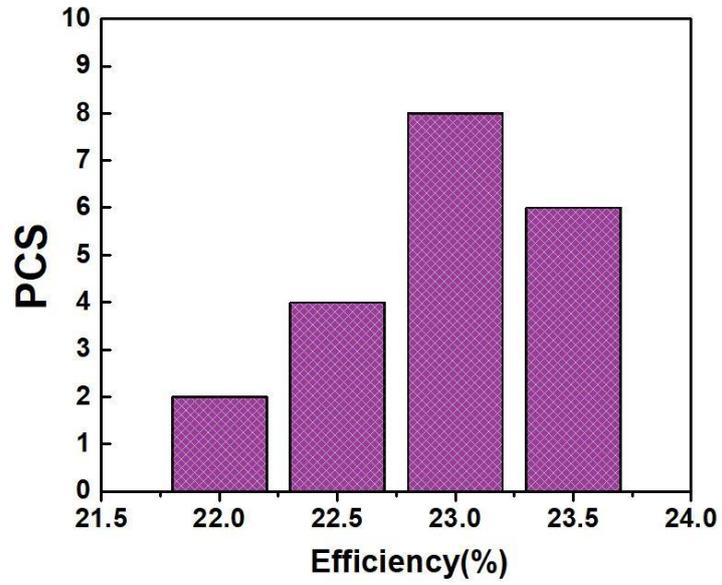


圖 6、爐管晶舟第 3、4 區的 TOPCon 元件效率分布統計圖

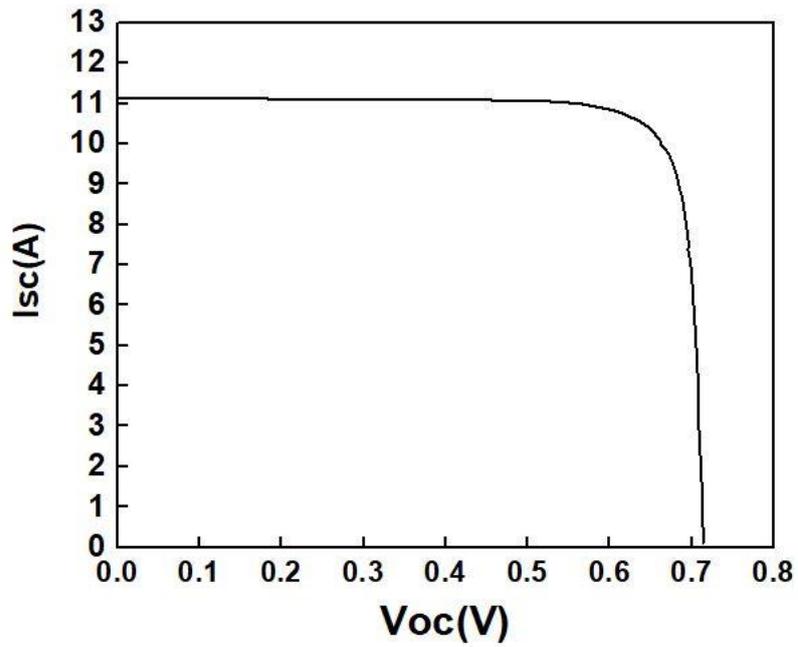


圖 7、TOPCon 太陽能電池元件之光電轉換效率圖

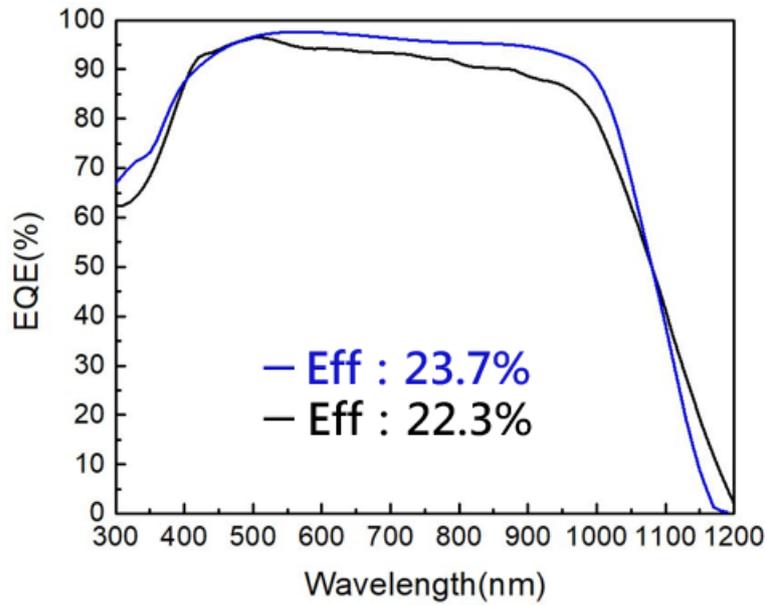


圖 8、TOPCon 太陽能電池元件之外部量子效率圖

本文介紹為了克服原廠高價設備與國外關鍵專利限制之問題，金屬中心團隊採取現有量產的爐管式設備架構，具有單爐管 240 片晶片的容量，可容納 M6 晶片尺寸，目標整合 PEALD 與 PECVD 的製程機制，在單一腔體中實現。選用低溫高覆蓋性的 PEALD 之原子層沉積機制製造穿隧氧化層，再以 PECVD 製作多晶矽層，如此連續製程將構成 TOPCon 電池結構最關鍵的穿隧鈍化層結構。並藉由採用電漿機制降低製程溫度至 250°C 以下，其與現有國際常用之製程方案 LPCVD 相比可，除可迴避部分大廠專利製程外，本計畫之創新製程設備技術更大幅度降低設備之熱預算並可延長爐管設備中各項部件使用壽命與提升設備穩定性，未來將可藉由模組替換，為現有終端廠內舊有 PERC 設備進行升級。