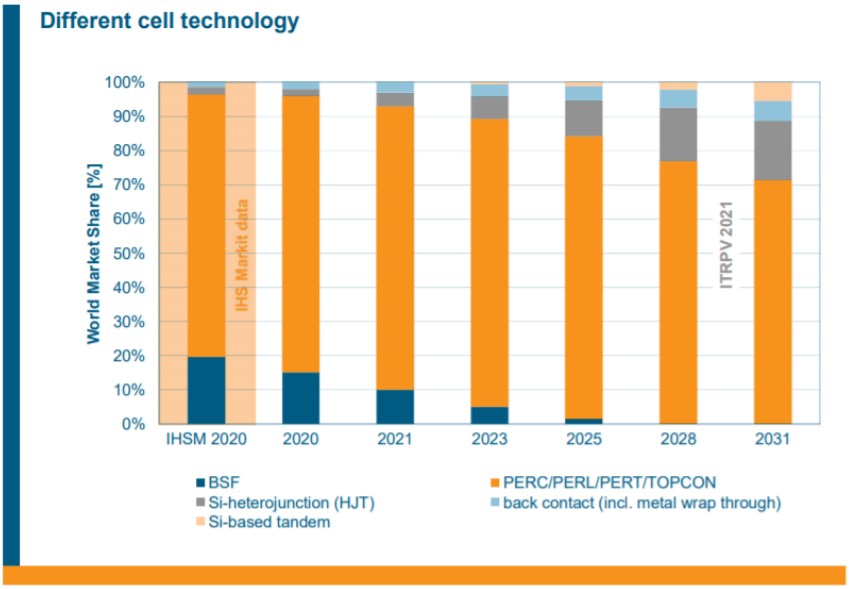
TOPCon 穿隧氧化鈍化接觸太陽能電池設備技術發展方案

一、TOPCon 穿隧氧化鈍化接觸太陽能電池發展背景

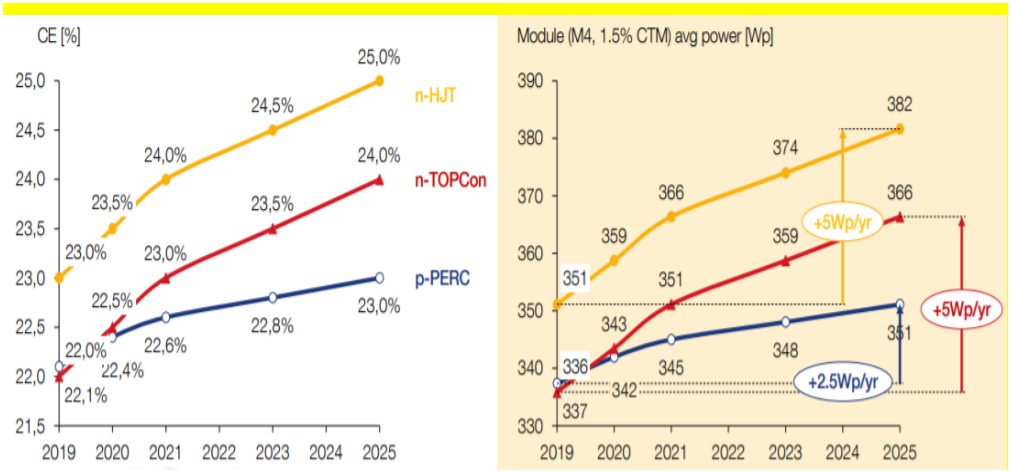
台灣再生能源中的太陽光電是最重要的發展主力之一，太陽光電於 2025 年設定完成 20GW 的設置目標，以台灣有限的土地與裝置面積，裝置量缺口應以國產矽晶太陽能電池來進行較符合經濟效益，朝高效率矽晶太陽能電池於單位面積內裝設可產生較高裝置發電量。而在發展新一代高效電池技術上，產業主要資源缺口為新型產線關鍵設備量能的挹注，目前主要競爭對手如中國與韓國廠商即是因以雄厚的資金，大量進行關建置製程設備的擴充生產，造成產品價格下降，面對國際的競爭，國內亟需發展自有國產高效矽晶專用關鍵製程設備以建立技術門檻與增加產品競爭力。

太陽光電未來技術發展是往高效率與低成本兩個方向來考量。目前最具經濟效益之高效率太陽能電池種類為矽晶太陽能電池，其中高效能矽基太陽能電池技術如異質接面(Heterojunction with Intrinsic Thin Film, HJT)與穿隧氧化層鈍化接觸(Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon)等採用 N 型晶圓之高效率電池技術效率可高達 23%以上，最受業界關注。惟 HJT 太陽能電池設備成本較高，而 TOPCon 電池技術的整線生產設備(Turnkey)與關鍵製程設備(如 PECVD, ALD 等)與現有主流電池 PERC 產線相容性較高，因此國內太陽能電池業者目前多投資 TOPCon 太陽能電池開發。

為了評估目前商業化高效太陽能電池(如 PERC、TOPCon 與 HJT 等)的效能，德國太陽能研究所（ISFH）在 2019 年 Silicon PV 的報告會上基於載子選擇性的概念從理論上對不同結構太陽能電池的理論效率極限做了細緻的分析，結論是鈍化接觸電池，TOPCon 電池具有最高的效率極限（28.2%~28.7%），高於 HJT 的 27.5%極限效率，同時也遠遠高於 PERC 電池（24.5%），最接近矽晶太陽能電池理論極限效率（29.43%）。圖 1(a)所示為 2020 至 2031 年不同電池技術之太陽電池之產品市占率，其國際太陽光電技術藍圖(International Technology Roadmap for Photovoltaic, ITRPV) 機構所進行估算，預估 N 型背面鈍化(PERC/PERL/PERT/TOPCon)及異質接面(HJT)為未來高效電池發展之主流，故其市場佔有率也會逐漸增加，圖 1(b)所示為該幾種電池之效率至 2025 年的元件效率與模組發電瓦數比較，HJT 領先 TOPCon 及 PERC，故 PERC 電池的效率成長幅度有限，未來若 HJT 與 TOPCon 成本可持續下修，PERC 市佔率將逐漸被該二者取代而下降。



(a)



(b)

圖 1(a) 太陽能電池結構與市占率(資料來源:ITRPV)(b)矽晶高效電池之技術比較

圖 2 示為德國 ISFH 提出之單晶鈍化接觸太陽能電池的效率提升曲線，從中可以看到鈍化接觸技術對於效率提升的潛力。目前 N 型前鈍化接觸太陽能電池世界紀錄(25.8%)由該研究所保持。

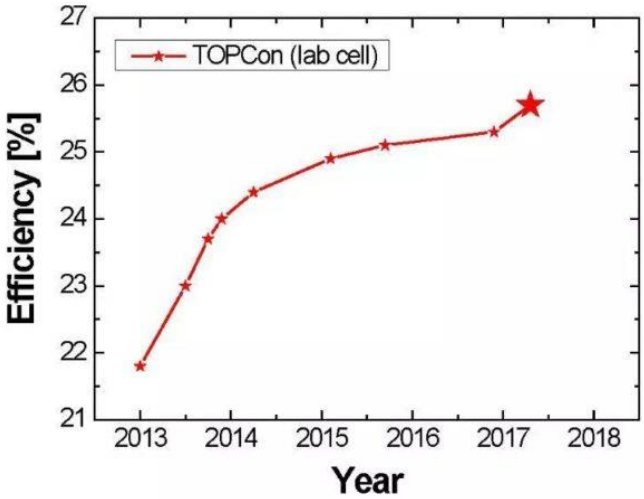


圖 1、ISFH 的 N 型單晶鈍化接觸太陽能電池效率進展

因此穿隧氧化層鈍化接觸電池(Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon)為主流業界認定 PERC 下一代之最可行方案，製程與 PERC 相容，不須雷射穿孔，關鍵為超薄(~1.5nm)氧化層製程設備，TOPCon 技術預期可達>23.5%之超高效率。在穿遂氧化層的製造上，ISFH 在 2013 年提出使用一層超薄的氧化層與摻雜的薄膜矽鈍化電池的背面，其中背面氧化層厚度 1.4nm，採用濕法化學生長。隨後在氧化層之上，沉積 20nm 摻磷的非晶矽，之後經過退火重結晶並加強鈍化效果。經過上述步驟，雙面鈍化的 200μm 厚度的 n 型 FZ 矽片的隱開路電壓(iVoc)可以達到 710mV 以上，但研究人員就已經發現當氧化層厚度超過 2nm 後，其穿隧效應就開始顯著下降，影響填充因數。因此更精確控制厚度的製程方式需要被提出，藉以使 TOPCon 電池技術得以進入到量產的階段。

二、高效電池技術發展方向建議

台灣為防止大陸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、聯合再生能源等，均有投入研發高效率 TOPCon 太陽能電池技術，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(厚度約 1.5 nm)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進行開發。

針對關鍵製程提出有別於市場現有設備方案，以電漿輔助鍍膜機制之設備，可實施於開發 TOPCon 太陽能電池，並進一步開發 TOPCon 太陽能電池爐管式設備，將 PEALD 與 PECVD 研發設備經驗朝整合為單一試量產設備，可達業界所需產能，具體降低國內廠商投入 TOPCon 高效率電池之產線建置成本，提升

台灣綠能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。國內過去以矽晶太陽能電池 PERC 為主的太陽光電產業，由於中國廠商狹政策補助優勢進行大規模投入，目前已較無利潤。國內廠商多朝高效矽晶 TOPCon 太陽能電池開發，其投資產線成本相較現有 PERC 太陽能電池業者而言，只需更新部分鈍化製程之設備，持續提昇效率便成為太陽能電池產業微利時代的較佳方案，市場預估 TOPCon 太陽能電池未來 10 年將會是市場上的主流產品，但目前量產廠商極少，仍未有標準最佳製程技術，因此值得國內業者加速投入。但由於目前國外生產穿隧氧化層之設備單價較高，主要競爭對手中國業者亦自主開發相關設備，因此如何提升國內太陽能電池廠商生產 TOPCon 太陽能電池技術與降低開發關鍵設備成本，是其發展上之關鍵議題。

為了克服原廠高價設備與國外關鍵專利限制之問題，圖 3 所示為可行性方案，以能大量生產的爐管式設備架構，具有單管 240 片以上晶片的容量，可容納晶片尺寸包含 M6 尺寸，並將整合 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，並再以 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℃以下，其與現有國際常用之製程方案 LPCVD 相比可，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，同時改善了設備穩定性。

藉由同時投入設備與製程技術，未來可改善量產均勻性不佳的問題，預期可協助業者在效率與良率上大幅改善，大幅節省太陽能電池製程設備成本(如進口 Turnkey 設備價格約為國產設備 2-3 倍)。高效太陽能電池製程與設備有高度相依性，台灣應自主開發太陽能電池關鍵設備技術，除節省太陽能電池廠設備成本外，更可加強製程技術上的自主性，更可健全台灣光電設備產業供應鏈。故設備開發目標為 TOPCon 高效矽晶太陽能電池關鍵穿隧鈍化層製程設備，據以完成高效穿隧鈍化型矽基太陽能電池元件(TOPCon)開發，即以 PEALD/PECVD 二合一設備於單一腔體實施穿隧氧化與鈍化接觸雙製程。

三、高效電池設備發展方向

(1)背穿隧及接觸鈍化雙製程設備方案

前述提出之連續式背穿隧氧化(SiOx)及背鈍化接觸(Poly-Si)雙製程設備開發，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。

由於標準 TOPCon 高效能矽晶太陽能電池結構，在 N 型矽晶片背面需依序成長 SiOx 穿隧層及 Poly-Si 鈍化層，但是目前量產型的高溫 LPCVD，其整管均勻性是無法提供精準的厚度分佈，如圖 4 所示為關鍵製程穿隧氧化層設備比較性能比較。可得知 PEALD 設備具有較低製程溫度，因原子層級的鍍膜而有較好的厚度分布均勻性因此具有較高良率。在最關鍵的穿隧氧化層製程上，採用電漿爐管式 PEALD 設備，其性能超越目前一般業者使用之製程方法。目前由國內外太陽能電池大廠 TOPCon 研發文獻中了解，現有的 LPCVD 設備性能有其極限存在，其鍍膜製程結果隨爐管長度而有所變化的特性將使得良率提昇極為困難。另外雖然 TOPCon 相較 PERC 具有較高的效率天花板，但要達到獲利條件，需要降低開發成本，提昇產線生產良率。

而以 PEALD 方式沉積可達到精準的穿隧氧化層厚度分佈，但其下一道 Poly-Si 鈍化層製程需額外在另一套設備進行，所以在非真空製程環境會與水氣、污染物直接接觸，造成製程時的非穩定度與降低製程生產速度，如圖 5 所示。所以若能在單一爐管內實現 PEALD 設備沉積 SiOx 穿隧層及 PECVD 設備沉積 Poly-Si 鈍化層，有效實現太陽能電池效率與良率的改善。將傳統 PERC 產線中的爐管式設備設計為 PEALD+PECVD 之雙製程沉積設備，用於 TOPCon 太陽能電池生產將是在技術面與經濟面上的最佳方案。即是最具競爭力之方案目標，開發出 PEALD+PECVD 的自製國產化設備對未來發展 TOPCon 藉以爭取最大獲利空間。

	新型方案設備	Centrotherm(德國)	Semco (法國)	Meyer Burger(瑞士)
設備型式	PEALD/PECVD共管	PECVD (DEPO X)	LPCVD (HORTUS)	PECVD (CAiA®)
腔體型式	爐管式	爐管式	爐管式	電極平板式
晶圓配置	垂直	垂直	垂直/水平	水平
製程溫度	<300℃	560℃	560℃	250℃
製程方法	1. 原子級沉積 2. Ultra-thin tunnel oxide(SiO_2)/(poly-Si): **PEALD/PECVD 40KHz** 示意圖	1.熱氧化法 2. Ultra-thin tunnel oxide(SiO_2): **Thermal oxidation** 	1. 熱氧化法 2. Ultra-thin tunnel oxide(SiO_2): **Thermal oxidation** 	1. 化學氣相沉積 2. Ultra-thin tunnel oxide(SiO_2): **PECVD 13.56MHz**
薄膜厚度	1.5~2 nm	1.5~2 nm	1.5~2 nm	1.5~2 nm
鍍膜不均勻性	≦±5%	≦±7%	≦±7%	≦±5%
良率	>90%	>80%	>80%	>80%

圖 4、關鍵製程穿隧氧化層設備性能比較

設備型式	PEALD+PECVD共管	LPCVD (現有技術)
製程溫度	<300℃	560℃
鍍膜不均勻性	≦±5%	≦±8%
參雜方式	原子級摻雜	磷擴散摻雜/結合退火製程
薄膜繞鍍	可實現無繞鍍沉積；輕微繞鍍易清潔	背繞鍍問題嚴重，並需額外增購蝕刻設備，建置成本提高且蝕刻製程較複雜
耗材成本	低	較高
整線設備需求	PEALD+PECVD (退火爐依製程需求配置)	LPCVD、擴散爐、離子注入機、退火爐、蝕刻機

圖 5、LPCVD 與雙製程設備(PECVD+PEALD)差異比較

(2)單腔雙製程沉積模組設計與系統介紹

單腔雙製程(PECVD/PEALD)設備的開發上，需進行鈍化層 (Poly-Si)及穿隧層(SiOx)薄膜驗證。如圖 6 所示之單腔雙製程真空爐管系統設計架構。開發爐管式電漿 PECVD 及 PEALD 雙製程反應腔體需求多重物理場的設計技術，包含穿隧鈍化薄膜沉積反應真空爐管設計、真空爐管電容耦合式電場及流場高均勻度設計與製作、批量式供料系統設計與供料管路建置、多區溫度控制與整機系統開發等，最後整合自動控制完成連續式雙製程沉積設備，用於製作高品質緻密性的背穿隧及接觸鈍化薄膜。

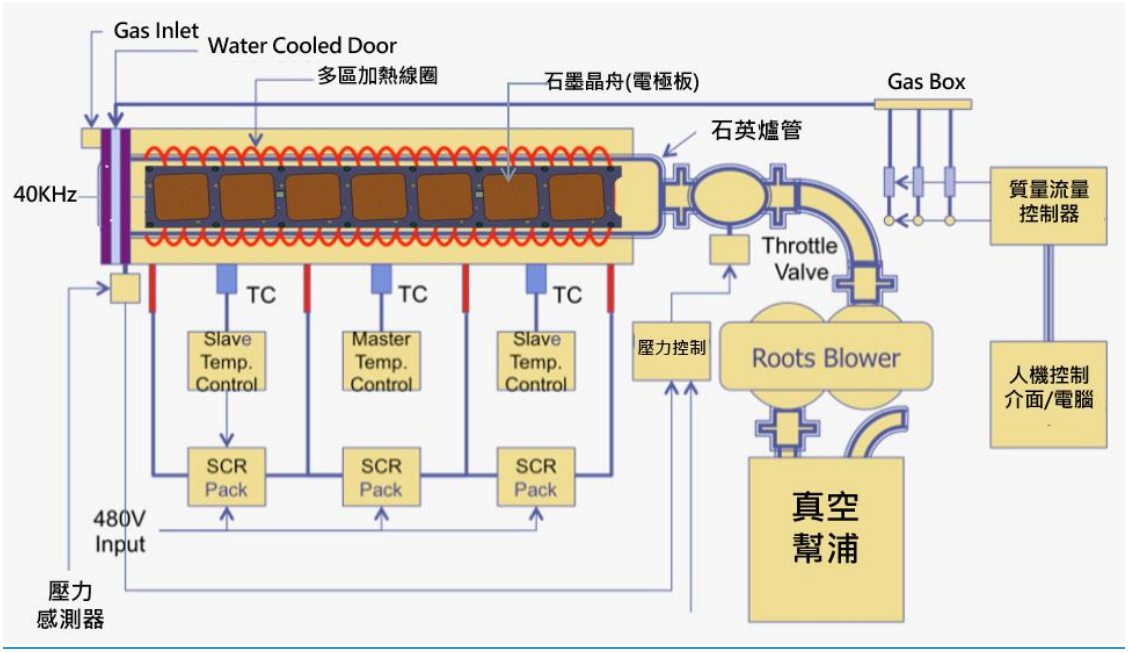


圖 6、單腔雙製程真空爐管系統設計架構

(3)電漿式薄膜沉積真空爐管設計

雙製程(PECVD/PEALD)沉積設備採用真空爐管式沉積方式，有別於典型上下電極板 CCP 水平腔體設備，並藉由多區加熱式自動控制爐管壓力沉積系統（Automatic Pressure System），可大幅增加生產能力。如圖 7 所示，此種架構是將高溫爐管包覆於加熱襯套之內，透過真空爐管的負壓抽氣系統、前驅物(BDEAS、TMA、SiH_4、O_2 等)供料系統、高均勻度電磁波分佈石墨晶舟設計、真空爐管流場設計，及製程爐體多區溫度控制系統設計使整批晶片成長薄膜厚度一致。

當爐管式電漿製程壓力下降到約 133Pa（1Torr）以下，真空爐管內分子的自由路徑與氣體擴散係數增大，使前驅反應物和副產物的質量傳輸速率加快，提高生長薄膜的反應速率，將具備較佳的階梯覆蓋能力，很好的組成成份和結構控制、較快的沉積速率及輸出量。以爐管式 PEALD 製程為例，透過電磁輔助利用電漿所產生的原子自由基以及其他處於激態的原子和分子(如氫原子、氧原子、氮原子)來強化傳統的原子層沉積製程，可在低溫下進行沉積，且可選用的前驅物更加多元，設備構造製造相對容易，因此當被鍍基板以平行或垂直放置時，基板間的的片距可減小到 2~5mm，當真空爐管中晶圓表面發生沉積之化學反應，通常伴隨著質量傳輸限制但與基板表面化學反應速率相比可不用考慮，如圖 7 所示，可採用之石英爐管及石墨晶舟，藉由直立密排載片方式可大幅提升設備每批次裝片之量產能力，如圖 8 為該設備所採用石墨晶舟於石英爐管內之配置圖與 wafer 晶圓擺放，電極片數為 21 片，第 1 片及 21 片最外側無電漿源，共 6 陣列每陣列可乘載 40 片 M6 晶片尺寸之 wafer，合計石墨晶舟共可乘載 240 片 M6 晶片進行薄膜製程。

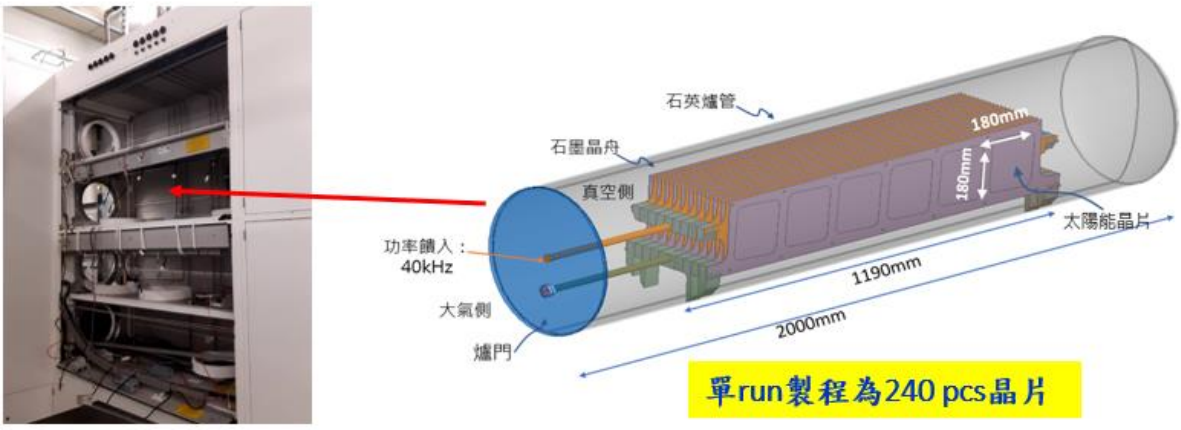


圖 7、電漿式薄膜沉積真空爐管示意圖

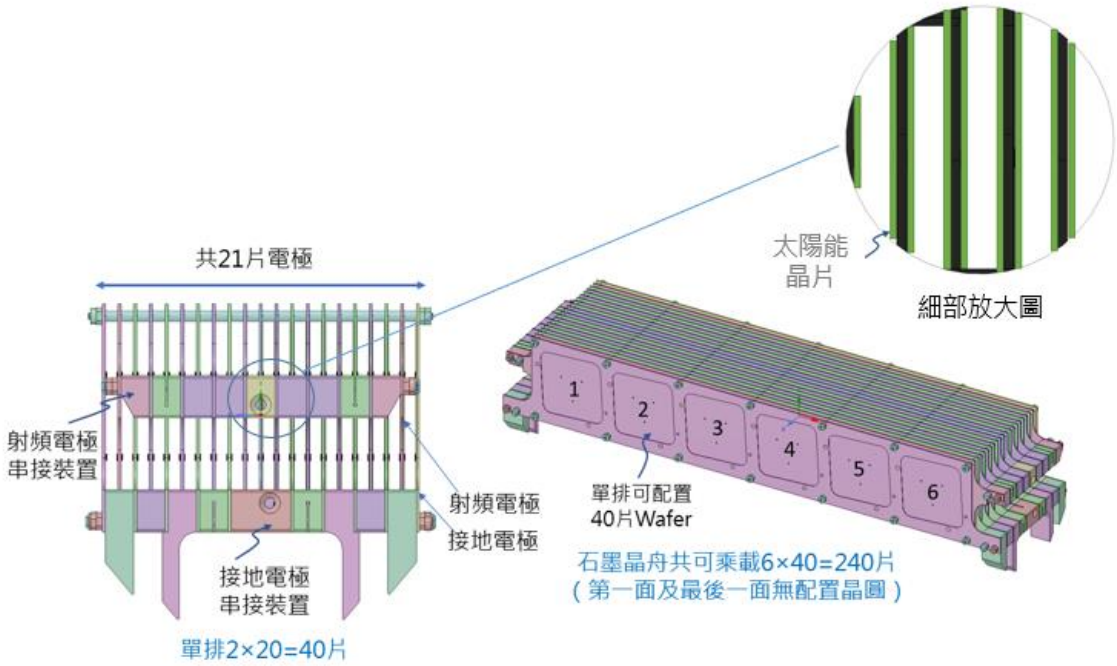


圖 8、石墨晶舟 wafer 配置圖與承載片數

四、結論

中國設備廠商在 PERC 矽晶電池製造幾乎已實現全面國產化。N 型電池生產線個別國產設備與國際廠商比還有一些差距。在傳統 BSF 鋁背場電池發展階段（約 2003~2013 年），生產設備主要來自於進口，並開始出現一些仿製設備。在 PERC 電池發展階段，中國設備廠商強勢崛起，以高性價比的優勢迅速替代了絕大部分進口設備占比，從前段清洗和蝕刻製程，到中間的擴散、化學氣相沉積、原子層沉積和雷射等製程，到後段網板印刷、電極燒結和測試分選製程，

都有其設備方案。目前已進入 N 型電池發展階段，設備商也開始逐步走出仿製階段，進入創新階段。如 TOPCon 電池的硼擴散和 LPCVD 兩個關鍵設備，主要是由深圳一家專業設備商推動成熟的；如 HJT 的 PECVD 和 PVD 設備，也有其設備方案達到更高優性價比，故對於台灣業者而言，勢必要發展自有設備及生產方法，以應對未來益加激烈的技術競爭。