

矽晶太陽電池市場分析與發展策略

一、背景說明

為了降低溫室氣體排放，減緩溫室效應所引發之氣候異常現象，針對當前應用最廣泛之綠能技術，臺灣從基礎民生工業到高科技產業都擁有堅實研發及生產能力。近來國際太陽光電產業發展受阻，唯有提升現有矽晶太陽電池效率才有可能降低生產成本，突破現有困境。然而，對於現有太陽電池業者而言，鈍化發射極觸點（Passivated Emitter and Rear Cell, PERC），其結構如圖 1 所示，設備上投資成本較低，技術已趨成熟，今年將開始步入量產化的高峰階段。也因此如圖 2 所示，ITRPV2016 預期直到 2026 年，PERC 電池會是主流，且市佔率將近 50%。另 Energy Trend 也預估 2017 年全球太陽能電池總產能將持續增加，而自 2016 年開始大幅擴充的 PERC 產能將在 2017 年上半年陸續調整完畢，全年度 PERC 電池產能規模將達 25GW，產出總量將倍增，如圖 3 所示。

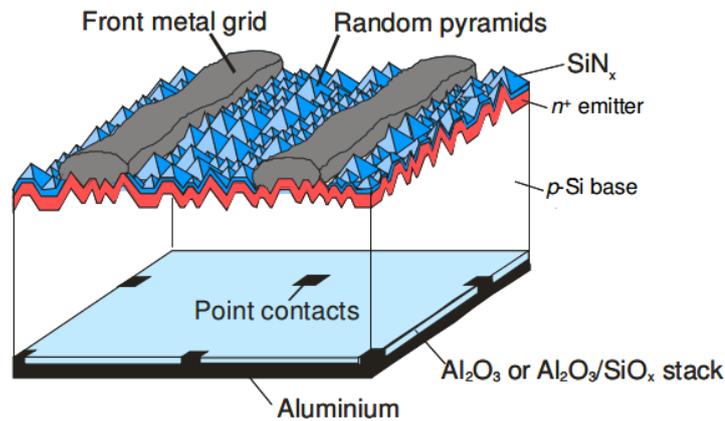


圖 1、鈍化射極接點太陽電池基本結構圖

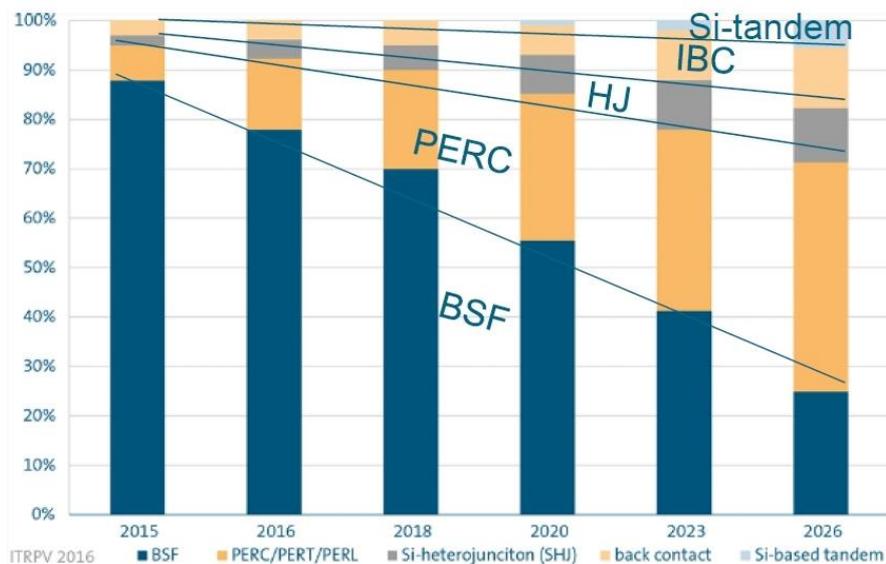


圖 2、2015~2026 年矽晶太陽電池之市佔比

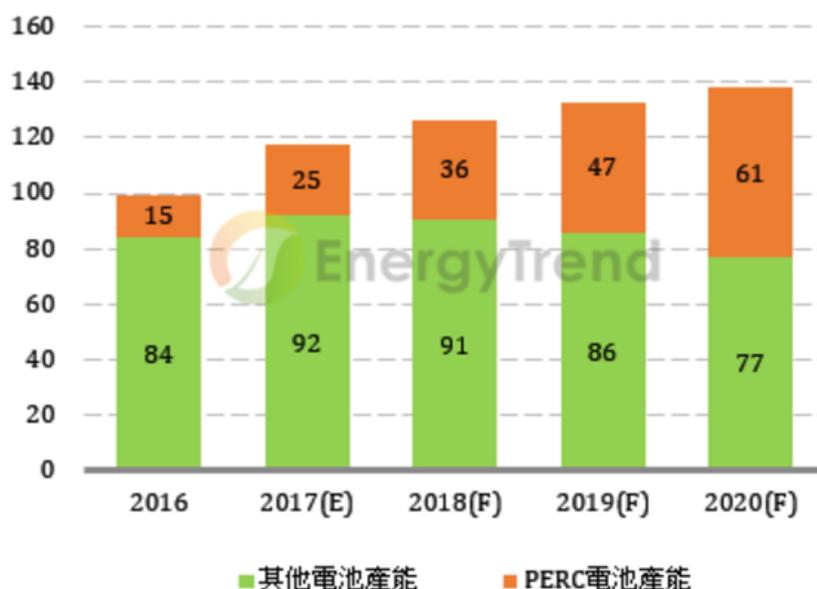


圖 3、2016~2020 年全球太陽能電池產能預估

鈍化射極接點元件技術，即利用原子層沉積(Atomic Layer Deposition, ALD)系統與電漿輔助化學氣相沉積 (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 系統製備 Al_2O_3 及 SiN_x 材料，ALD 系統可製備緻密且優良的 Al_2O_3 薄膜而 PECVD 則是可快速沉積高品質的 SiN_x 薄膜。 Al_2O_3 及 SiN_x 在電池背面形成鈍化層，並且形成背電場，同時將 P-N 極間的電勢差最大化，降低電子複合，從而提升電池轉化效率。另一方面，在太陽能電池正面製備 SiN_x 薄膜，除了可鈍化晶圓表面亦可形成抗反射光學薄膜，增加入射光源能量，提升電池轉化效率。

台廠 PERC 高效電池的整體生產品質相當優異，不論在電池效率或生產良率上都有出色的表現，但因 PERC 產能擴充上較缺乏優勢，與競爭對手一樣採用國外大廠設備，台廠也將面臨挑戰，最主要的競爭對手來自韓華 Q-cells 產能龍頭和眾多中國電池廠的快速崛起。PERC 的核心概念在於為常規太陽電池增加全覆蓋的背面鈍化膜，採用沉積氧化鋁的方法，而量產可行方案可在電漿增強化學氣相沉積 (PECVD) 與原子層沉積 (ALD) 之間選擇。所需的背鈍化材料要有高密度的固定負電荷，同時還要具有化學鈍化作用，氧化鋁恰好符合這些要求。氧化鋁的傲人之處在於固定負電荷密度高達 $10^{13}/cm^3$ 。多數鈍化膜都帶正電荷，如氧化矽和氮化矽，而氧化鋁則不同。在沉積過程當中，負電荷恰好處在氧化鋁和矽晶表面生成的氧化矽介面的交界處，可確保產生高效的場鈍化效果。氧化鋁化學鈍化的效果也非常好，扮演著高效的氫原子儲庫作用，在熱處理過程中提供充足的氫原子，使矽片表層懸空鍵達到飽和。就其光學性質而言，氧化鋁膜的帶隙為 6.4eV，可以容許太陽電池所需的一部分陽光透過。

2016 年 ITRPV 路線圖預計氧化鋁 (Aluminum Oxide) 將在 2020 年之前完全主導 PERC 鈍化市場，達到完全壟斷；然而在 2017 年 3 月公佈的第 8 期中，其採取了稍為保守的態度。但這不能改變氮氧化合物 (Silicon Oxynitride)

被逐漸淘汰的命運，如圖 4 所示。

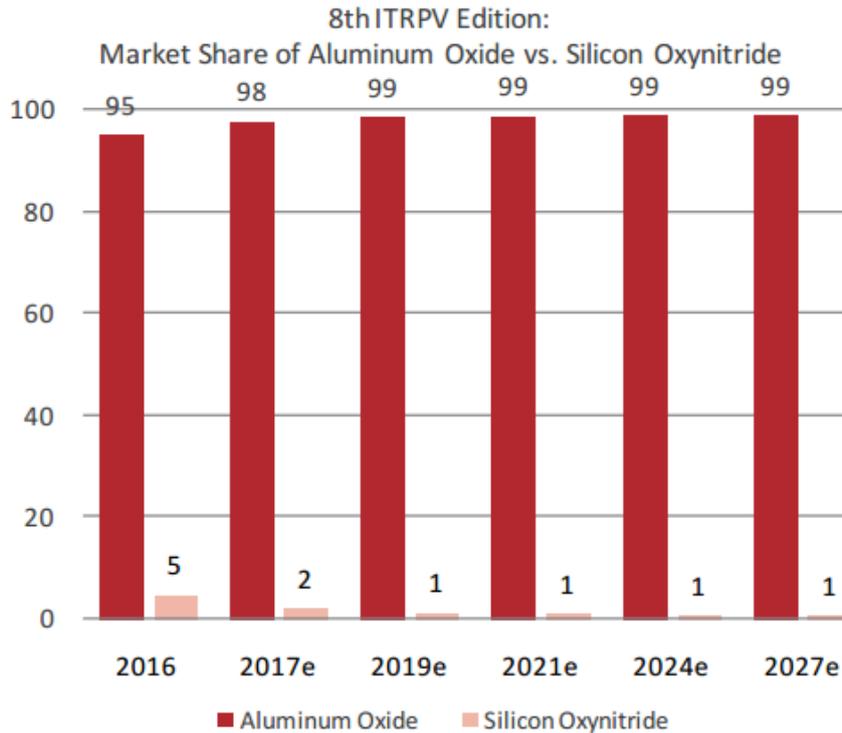


圖 4、氧化铝及氮氧化矽市佔比

PECVD 設備的領導者德國 Meyer Burger AG 領軍、Semco、Singulus 和 Centrotherm 公司皆有推出相關產品。Meyer Burger 表示，僅在 2016 年該公司設備出貨量就相當於 12 GW 產能，主要用於沉積背鈍化膜和正面抗反射塗層，產能達到每小時 3,000 片以上。ALD 的優勢在於氧化鋁膜是在原子層級上一層一層生成的，從而具有很好的階梯覆蓋性。此外，其製程溫度要求較低，為 100 到 350 °C 之間。但缺點在於 ALD 方法沉積率較低，每個製程週期僅生成一層原子膜，膜的厚度介於 0.9-1.5 Å，主要受以下參數影響，包括反應器的設計、溫度和氧化程式，而為了獲得理想厚度，需多次重複製程步驟。

為了改善產能，雖然傳統 ALD 系統架構為疊加製程週期達到需求產能，一些業者已將設備改進為空間區隔式，亦即不再是將反應物交替送到一個反應腔中，而是把反應腔分成了多個不同的區域。這些反應區通過內部氣簾隔開，而氣盾同時也充當各反應區之間的隔間，防止反應器壁出現交叉反應和寄生沉澱。並藉此提高了兩個半反應以及抽空淨化的速度，使沉積效率得到大幅改善，同時又不失 ALD 的優勢，荷蘭公司 Levitech 和 SoLay Tec 研製的產品則基於這種空間區隔 ALD 原理。該方法不僅適應於線上 (In-line) 嵌入式運行模式，也可運行於大氣壓力之下，節省抽送和排放反應器氣體所需時間。這種空間 ALD 方法是專門為太陽電池工業研發的，產能也能達到 3,000 片/小時，以年產能 100MW 估算，由目前的矽晶太陽能產線擴充設備成為 PERC 產線，並分別以 PECVD 與 ALD，所需支出之費用如圖 5 所示。

100MW PERC 電池生產線使用PECVD		100MW PERC 電池生產線使用ALD	
(PECVD) 設備項目	價格 (歐元)	(ALD) 設備項目	價格 (歐元)
雷射設備	40~70萬	雷射設備	40~70萬
PECVD (Al ₂ O ₃ /SiN _x)	150萬	ALD(Al ₂ O ₃)	120萬
		PECVD (SiN _x)	100萬
BSF升級到PERC電池生產線共需支出設備價格	250~350萬	BSF升級到PERC電池生產線共需支出	320~420萬
主要耗材:TMA 1kg 約450			

圖 5、傳統矽晶太陽能產線擴充設備成為 PERC 產線所需支出之費用

其中原子層沉積系統設備為 PERC 高效電池之主要關鍵設備，國內多仰賴進口設備導致成本較高，設備攤提年限長，因此需國內自主開發品質穩定且低成本之 ALD 鍍膜設備與技術。2016 年全球 PECVD 的市場份額接近 90%，而 ALD 僅略高於 5%。雖然 PECVD 或多或少將保持這一領先地位，但上升趨勢不大，而 ALD 預計會在未來十年內大幅提升其市佔率。上一版 ITRPV 中對 ALD 的前景更為樂觀，曾預期其市佔率將從 2018 年的 5% 上升至 2026 年的接近 15%。韓華 Q Cells 公布了採用 ALD 與 MW-PECVD 沉積氧化鋁的對比結果，發現 ALD 沉積膜有更高的效率，該電池製造商在慕尼黑 EUPVSEC 2016 會議上發表了這個研究結果，這比使用 MW-PECVD 設備得到的電池的效率高了 0.15%。但效率只是量產所需考慮的眾多問題中的一個。阿特斯太陽能在會上也對 ALD 與 PECVD 的鈍化性能做了比較，阿特斯的研究結果同樣表明，ALD 沉積膜的性能比 PECVD 略好，絕對效率提高了 0.06%。在兩者性能分析上，首先探討薄膜厚度，膜越薄，氧化鋁的鈍化性能就越好。但是沉積技術有其侷限性，ALD 可以處理非常薄的薄膜，使用 PECVD 時則需要相對更厚的薄膜。而在主要前軀體 TMA 消耗量部分，膜的厚度直接影響對 TMA 的消耗，氧化鋁沉積的主要成本之一在於 TMA 消耗量，而 ALD 系統對 TMA 的消耗量通常較低。ALD 方法消耗 TMA 較低的原因之一，為該方法只需沉積較薄的膜層就可達到 PECVD 方法的同等效果，PECVD 及 ALD 各家廠商 TMA 消耗量與對應之膜厚分析如圖 6 所示。

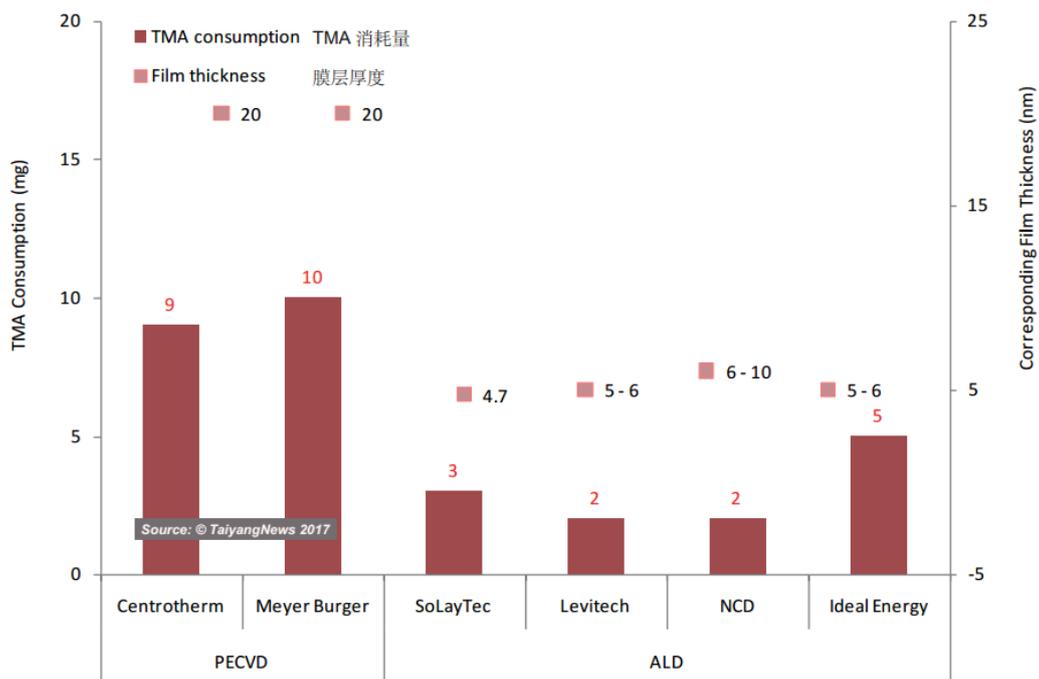


圖 6、TMA 消耗量與對應之膜厚

綜上所述，兩種設備優缺點為 PECVD 系統可以氧化鋁與保護膜沉積二合一完成，降低了技術升級的複雜性和資本支出，而 ALD 擁有較低的 TMA 消耗率，具有降低製造成本的潛力。整體而言，ALD 系統的沉積膜品質最好，TMA 前驅體使用效率最高。PECVD 技術具有最長久的規模化生產經驗，同時氧化鋁和氮化矽沉積可在同一系統中完成，降低進一步的投資成本。因此，若能達成國產化開發一大氣 ALD 系統及 PECVD 系統，並能兩者整合成氧化鋁和氮化矽沉積可二合一完成之設備系統，並導入業界進行 PERC 電池製程，勢必具有極高競爭力。

根據 Energy Trend 的調查，中國國家能源局發布了高效率電池補助專案之電池效率門檻，多晶模組的轉換效率分別落在 17.8% 與 17%。以現行產品來看，這意味著單、多晶 PERC 將較有競爭力；而相對於性價比之間的競爭，PERC 產線是否成熟到足以供應類似補助專案所需，將成為太陽電池業者搶攻市佔率的關鍵。

第三批領跑者計畫的模組轉換效率門檻訂在單晶 17.8%，而多晶則維持在 17%。另一方面，中國國家能源局亦公布了 2018 年 1 月 1 日起的光伏模組門檻，整體 60-cell 模組之瓦數與電池轉換效率換算如圖 7：

		模組效率	模組瓦數*	電池效率**	第一年效率衰退	後續效率衰退(每年)
領跑者	單晶	17.8%	295W	20.5%	<3%	<0.7%
	多晶	17.0%	280W	19.2~19.4%	<2.5%	<0.7%
一般(2018起)	單晶	16.8%	275W	19.1%		
	多晶	16.0%	265W	18.2%		

* 以 60-cell, 模組面積 1650x992 mm 計算

** 以 M2 Size 換算

Source: 中國國家能源局

圖 7、中國大陸高效率電池補助計畫所限定之標的規格[資料來源:energytrend]

因此發展高效率 PERC 技術確實為目前推展太陽電池之方案，因 PERC 電池結構理論專利其實已提出 20 年以上，因此其中最關鍵技術在於採用的製程設備。惟目前國內廠商所用皆為國外廠設備，在局勢上形成與國際競爭對手，尤其是中國大陸太陽能廠進行設備方面的軍備競賽，並因此逐漸削弱本土業者的競爭力。因此有必要國產化自主開發其中的關鍵設備，藉以延續本土廠商於 PERC 電池的技術優勢，並可藉由降低設備投資成本，同時增進本土廠商產品的性價比，並在獨有設備的基礎上建立技術獨有性。

綜上分析，未來矽晶太陽電池具有市場競爭力的策略包含：

1. 關鍵製程設備能國產化：傳統矽晶太陽電池廠陸續轉型為 PERC 太陽電池產線，需導入性能良好的鈍化製程設備，若能由國產化開發的設備取代國外廠高價的 PECVD 及 ALD 設備，可進一步增加產品的性價比，強化產品競爭力。除了降低業者成本支出外，亦在設備性能上建立差異。
2. 新材料引入：導入 N 型基板，採用去除 p 型基板具有之原生 LID (Light Induced Degradation) 現象，採用對應 N 型晶圓新鈍化層材料，除去除 PID (Potential Induced Degradation) 效應，同時減少表面複合速率，可達到比 P 型至少高 2% 以上的轉換效率，提高到 23% 以上。將電池單元轉換效率提高至 24%。

然而目前產業現況及其所面臨之問題如下：

1. 國內已有諸多學術單位在科技部的補助下研究 ALD 及 PECVD 設備，並獲得良好之研究成果。但學術單位研究之設備面積及產能不足，在量產上仍有設備導入與驗證之困難。
2. 部分學研機構在能源局的補助下，亦進行鈍化射極結構太陽電池的製程研究，並獲得良好之研究成果。然而，所研究的製程研究是否可於量產設備實現，尚有疑慮。
3. 更重要的問題是，設備業者沒有與終端業者進行良好合作，開發試量產的關鍵鈍化膜製程設備並進行驗證，雖國內業者設備相關製造及開發能

力皆十分成熟，但並無契機切入該設備市場。

圖 8 所示為典型真空鍍膜設備系統的六大模組，包含：(1)射頻與電漿系統、(2)傳輸系統、(3)溫控系統、(4)氣體供應系統、(5)控制系統，以及(6)真空系統。臺灣從基礎民生工業到高科技產業都擁有堅實研發及生產能力，但面對國外大廠產品海外傾銷與低價競爭，國內業者成本下降壓力大。為避開競爭激烈低價製造，新世代的鈦化射極太陽電池技術，應該由開發關鍵製程設備切入。

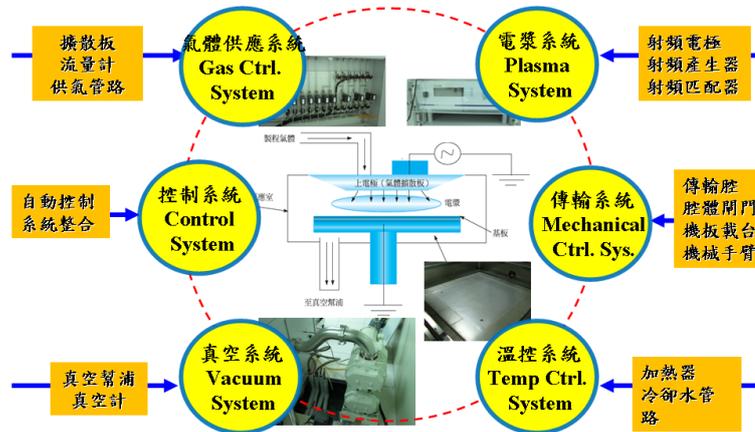


圖 8、PECVD 之各模組解析

金屬工業研究發展中心執行 2012 年度「南科綠能低碳產業聚落先期計畫」、2013~2014 年度「南科綠能低碳產業聚落服務平臺推動計畫」、2012~2013 年度工業局「平面顯示器設備自製率躍升計畫」、2012~2013 年度工業局「推動半導體製程設備暨零組件躍升計畫」、2014 年度工業局「光電設備暨零組件產業發展計畫」、2014 年度「半導體設備暨零組件產業發展計畫」、2012~2014 年度技術處「CIGS 太陽電池關鍵技術開發計畫」、2015 年度能源局「高性能太陽光電系統技術及設備研發計畫」、2016~2018 年度能源局「用於矽晶異質接面太陽電池的關鍵製程研發設備開發計畫」，藉由計畫的開發與專利的申請，本中心對於技術建立與深化皆具前瞻與創新性的豐富經驗與能力。

本計畫將藉由對於鍍膜製程系統腔體內的流場及熱場分析設計技術，電漿場分析控制技術打造 PERC 製程中關鍵鈦化薄膜製程設備 ALD，並優化其效能開發具有大面積鍍膜能力之試量產型設備，其中採用關鍵模組矩陣式開發法，在試量產驗證後，可因應業界需求增加矩陣單元擴充產能，結合本土設備業者進一步開發高產能量產設備。並結合金屬中心獨有的 VHF PECVD 技術，一方面提高頻率減少離子轟擊效應，進而提高化學氣相沉積速率並改善薄膜介面品質，達到節省製程時間增快產能之功效。最終希望結合終端廠合作開發本土化關鍵設備製程技術，發展太陽電池產業成為國際的重要領導產業。

二、願景設定→應用情境規劃

新世代的太陽光電的開發是重要的議題，未來技術發展是往高效率與低成本兩個方向來考量。國內過去以矽晶太陽電池為主的太陽光電產業，必定要跨到目前理論效率最高的異質接面太陽電池，然而其投資成本相較現有太陽能電池業者而言，是屬整線設備進行汰舊換新，投資成本高。因此發展只需部分設備更新的鈦化射極電池，便是太陽能產業微利時代的較佳方案，且未來十年仍會是市場上的主流產品。目前原廠之 ALD 與 PECVD 設備單價較高，且國際競爭對手亦能購買同樣設備切入相同市場，使太陽電池成為紅海市場，造成市場萎縮，其是必須克服之問題。

- 願景設定：

為能同時達到高效率與低製造成本的發展願景，避開國際競爭對手在採用相同設備下，快速縮短與台廠技術差距。因此藉由採用國產化自製開發關鍵模組並整合為整機設備，建立高性價比優勢。藉由設備與技術建立獨有專利優勢，持續優化鈦化射極技術為基底的太陽電池結構，以及配合採用 N 型基板的技術結構搭配新的鈦化膜層，發展自有的高效率低成本矽晶太陽電池製程技術。

若能提出開發之鈦化薄膜技術為基底之矽晶太陽電池關鍵設備，並用於目前主流之鈦化射極矽晶太陽電池及衍生更高效率之結構，藉由導入開發本土化設備，可在相較現行投資設備更低的成本下，導入關鍵的鈦化層技術， $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$ 膜層，減少介面的載子複合現象，以達高轉換效率之成效。並導入採用 N 型基板的鈦化射極的延伸結構，以達高轉換效率之成效。與目前傳統製程之矽晶太陽電池之最高效率(19.5%)相比，在相同面積的電池模組而言，可以多產生 15% 的功率，亦即是同一面積模組，節能減碳的效益能達 12.5% 以上，是非常可觀的數據，亦是發展本計畫高效能電池的重要目的。藉由本技術開發成果之移轉，使現有太陽能電池業者維持技術領先地位，並改善成本結構。並可藉由獨特設備及製程技術之發展，迴避現有國外大廠於鈦化射極電池結構上之相關技術。藉由本計畫的引入，效率預期可達 22.5%。

而更為了克服國外原廠高價之 ALD 及 PECVD 整線設備之問題，應可藉由提出鈦化射極矽晶電池之新製程設備架構，建構相關研發試量產整線經驗。在鈦化射極接點電池之鈦化膜($\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$)製程設備，採用非真空 ALD 設備進行射極鈦化層的沉積，並搭配使用高頻 40.68MHz 電漿成長氮化矽薄膜，取代本質非晶矽薄膜層，並整合雷射開孔製程、與網印等設備成整線輸出設備。

金屬中心多年來從事真空鍍膜產線相關設備及零組件開發，對於基本設備系統具有豐富實務經驗，並與國內眾多設備及終端廠商保持良好合作關係，本計畫之整線整合相關技術除了國內設備廠合作外，並將會與太陽電池廠商進行設備及製程驗證工作，因此整線整合方面工程雖耗大艱難，但相信藉由結合廠商的經驗加入定能克服。

- 應用情境規劃：

開發用於鈍化射極矽晶電池矽晶太陽電池的連續式鍍膜整線設備，可節能減碳以降低溫室氣體排放，減緩溫室效應所引發之氣候異常現象，帶動全球綠能產業蓬勃發展。臺灣從基礎民生工業到高科技產業都擁有堅實研發及生產能力，但面對日、韓與中國大陸產品低價競爭，國內業者成本下降壓力大。為避開競爭激烈低價製造，部分如異質接面太陽電池技術可開始切入經營太陽光電系統以提升營收與獲利，正是提供國內發展綠能產業的大好契機。開發之關鍵製程設備為非真空原子層沉積設備(ALD)與高頻電漿增強式化學氣相沉積設備(PECVD)，可全面國產化，除有效提升產品效能，並有效降低生產成本。關鍵整線製程設備技術可轉移給國內太陽能設備廠商，提升國內太陽電池設備廠商國際競爭優勢。

高效率電池技術可以轉移給國內太陽電池製造廠(如：茂迪、聯合再生、元晶等)，以提升國內太陽電池製造廠技術量能與產品成本，配合國產化之整線設備，可大幅提升太陽電池之普及率。

三、產業化/節能減碳效益

- 產業化：

本計畫之全程目標在於開發出包含鈍化層鍍膜、雷射開孔與電極之連續式整線設備，預計全程完成後，可協助太陽電池產品製造廠在鈍化射極接面薄膜製程技術支援下，獲得高發電效率($\geq 22.5\%$)，除了可以有效突破國外在鈍化射極矽晶太陽電池的專利布局，並在關鍵製程設備上可全面國產化。

金屬中心多年來從事真空鍍膜產線相關設備及零組件開發，對於基本設備系統具有豐富實務經驗，並與國內眾多設備及終端廠商保持良好合作關係。所開發之連續式鍍膜腔體(p/i/n)製程設備，大量佈局高頻 40.68MHz PECVD 腔體關鍵組件：射頻電極、射頻饋入、射頻組抗匹配等關鍵專利，可以應用其他光電產業，如發光二極體、平面顯示器等元件製造上。

在設備開發技術方面，開發之高效率電池製程設備，可藉由專利或技轉方式推廣至國內光電設備廠(均豪、富臨等)。關鍵製程設備非真空原子層鍍膜設備(ALD)與超高頻電漿增強式化學氣相沉積設備(VHF PECVD)可全面國產化，除有效提升產品效能，並有效降低生產成本，以提升國內太陽電池設備廠商國際競爭優勢。

在產品製程技術方面，本計畫開發之高效率電池製程研發技術能量，可藉由專利或技轉方式推廣至國內終端太陽電池產品製造廠(茂迪、聯合再生、元晶等)量能，進行量產化設備製程驗證測試，讓計畫所開發之技術與設備導入產線製程中，使鈍化射極太陽電池產品可實際產出應用。並可提升國內太陽電池製造廠技

術量能與產品成本，配合國產化之研發試量產整線設備，可大幅提升太陽電池之普及率。

本計畫之整線整合相關技術除與國內設備廠合作外，將會與太陽電池廠商進行設備及製程驗證工作，因此，整線整合方面工程雖耗大艱難，但相信藉由結合廠商的經驗加入定能克服。

● 節能減碳效益：

在相同面積的電池模組而言，採用鈍化射極太陽電池技術之矽晶太陽電池可以多產生 15% 的功率。效率預期可達 22.5%。與目前傳統製程之矽晶太陽電池之最高效率 19.1% 相比，在相同面積的電池模組而言，可以多產生 15% 的功率，亦即是同一面積模組，節能減碳的效益能達 15% 以上。原先矽晶太陽電池的能源回收期，由原先的 2 年，降低到 1.5 年。也因此該電池能夠提早發電，進一步降低了電池的每瓦的成本。

因此，太陽電池效率提升後相對使用者意願可望提升，國內的太陽電池的裝置瓦數在國內能源比重將逐漸由火力、核能及水力等轉成太陽再生能源。相對衍生之效益如下：

1. 在製程上，採用高頻 40.68MHz 電漿輔助化學氣相沉積系統(PECVD)，由於高沉積速率，間接促使製程達到節能減碳。
2. 在成功開發出高效率 22.5% 鈍化射極矽晶太陽電池後，預期國內的太陽電池製造廠商，每家產能將可以提升到 1GW，將可以擴大太陽電池的市佔率。
3. 對 1GW 的模組安裝量而言，比起傳統的電池模組，在相同的土地面積下，能增加 14.8% 的功率發電，以每天 3.5 小時的發電來看，每天的 CO₂ 的排放量將可以減少 1944.25 噸 CO₂ 的排放量，而整年將可以達到 70887 噸 CO₂ 的減量排放量。
4. 預計十年內，國內的太陽電池的裝置瓦數將達每年 1GW 以上。以每天 3.5 小時的發電來看，每天的 CO₂ 的排放量，將比起使用相同度數的傳統火力發電，將可以減少 2,625 噸 CO₂ 的排放量，這是相當可觀的減碳排放。

貳、政策依據

經濟部政策宣示將於 2025 年完成非核家園。為達成 2025 年非核家園目標，我國積極推動太陽光電發電設置。2016 年我國啟動能源轉型，積極開發綠色新能源，目標 2025 年再生能源發電量佔總發電量的比例達 20%，太陽光電 2025 年設置目標量為 20GW。



台灣2025年太陽光電裝置量目標

單位：MW

能源別	2015年	2016年	2020年	2025年
太陽光電	842	1,342	8,776	20,000
陸域風力	647	747	1,200	1,200
離岸風力	0	8	520	3,000
地熱能	0	1	150	200
生質能	741	742	768	813
水力	2,089	2,089	2,100	2,150
總計	4,319	4,929	13,514	27,363

資料來源：能源局(2016)；MIRDC彙整

台灣2025年各類再生能源目標裝置容量

圖 9、台灣 2025 年各類再生能源目標裝置容量