

出國報告（出國類別：其他）

## 赴荷蘭參加 2014 歐洲光伏太陽能國際 研討會及參訪相關機構

服務機關：核能研究所

姓名職稱：黃裕清 副工程師

曹正熙 副研究員

陳長盈 研究員

林金福 副所長

派赴國家：荷蘭

出國期間：103 年 9 月 17 日~103 年 9 月 28 日

報告日期：103 年 10 月 28 日



## 摘要

參加於荷蘭阿姆斯特丹舉行之第二十九屆歐洲光伏太陽能國際研討會暨展覽會，蒐集各國國家實驗室、大型廠商公司、跨國型之整合計畫及學術界目前之研發現況、成果、創新技術、工作經驗及其未來之重點規劃等，本所藉由此國際研討會及展覽會吸取新知，並經由研討交流以提升研究技術，同時掌握國際太陽能電池之技術現況發展及趨勢，期有助於未來本所太陽能電池之技術發展及研究規劃。公差行程中順道參訪有機太陽能電池跨國整合型計畫 (Solliance 計畫) 之計畫總部及荷蘭 HOLST 研究中心，瞭解該中心在分子太陽電池量產製程技術之研發現況及細節，並交換各類型太陽能電池量產技術及產業開發之經驗與展望。

本報告分門別類有系統地整理各項太陽能電池最新的技術發展，分享新型太陽電池的見習心得如下：

(一) 低耗能、低成本、非真空、軟性基板之溶液印刷製程 (綠色製造程序) 為國際太陽能產業未來發展趨勢。

(二) 低照度 (辦公室照明) 及非日間環境之相關 PV 效能及可靠度測試是未來國際太陽光電須補強及重點開發項目。

(三) 從素材至成品封裝卷對卷量產一貫作業之 OPV 量產線開發是本屆會議熱點之一，本所應加速規畫整合卷對卷 OPV 一貫量產線之技術開發。

(五) 鈣鈦礦結構太陽電池為具有潛力之太陽電池，而且是本所現有之 OPV 核心製程技術的延續及最佳應用，建議本所及早佈局相關前瞻性研究及高穩定性研發。

# 目 次

(頁碼)

摘 要	· · · · · .
一、目 的	· · · · · . 1
二、過 程	· · · · · . 3
三、心 得	· · · · · . 6
四、建 議 事 項	· · · · · . 62
五、附 錄	· · · · · . 63

# 一、目的

為因應未來太陽光電技術發展之變革，本所太陽能研發團隊須蒐集全球各類型太陽能電池之最新技術發展現況、產業市場需求與發展趨勢分析等資料，並建立與國外知名研究團隊及國際整合型計畫之交流管道，作為相關研究計畫前瞻發展規劃，及未來拓展成為競爭性產業化和佈局之重要參考。參與國際知名研討會，即具有上述之積極意義，期能創新研究，成功推動國內產業化應用，在未來國際市場中更具競爭力。

本屆歐洲光電太陽能電池會議(29th European Photovoltaic Solar Energy Conference; 簡稱 2014 EU PVSEC)暨展覽會係於荷蘭阿姆斯特丹舉行，屬全球最大之太陽能電池會議，參與會議之世界各國專家與廠商代表計有 3,000 員，成員包括來自 76 個國家之產業界、官方代表、歐盟聯合研究組織、學術界與投資公司齊聚一堂，互相交換工作心得經驗並展現最新成果進度，藉由參與研討會吸取寶貴新知，期能找出技術上最可行的突破改進方向策略、技術突破、市場分析與產業開拓，掌握未來方向為日後成功的重要一步。除積極探尋合作對象和擴大商機外，了解未來合乎多變化市場的發展佈局及商機走向，有助於未來本所在此領域之研究規劃。本國際會議的內容，從基礎材料端的開發、各種 PV 製程技術的發展與改進、前瞻研究的最新觀念想法與成果至最後國際市場分析，涵蓋範圍從矽晶太陽能電池，半導體型薄膜太陽能電池至有機太陽能電池，從元件模組之量產製程技術至後端民生產品設計應用發展應有盡有，參展廠商展示了各種太陽能電池製程中之種種生產設備及未來深具潛力應用之電池產品項目。本所藉由參與研討會暨展覽機會蒐集了各國先進研發單位及整合型跨國計畫之目前技術發展現況、成果或突破性之資料，針對本所太陽能電池各分項計畫之現有發展方向作系統分類整理以供研發參考，會中本所並發表一篇有關高分子太陽能電池量產商業型技術之研發成果的會議論文。

本報告特別在有機高分子太陽能電池方面之最新技術發展及國際發展現況，作細節上分析探討比較，提供豐富資訊以作為本所在高分子太陽能電池製程發展規劃及執行之參考。會議前順道參訪荷蘭 HOLST 研究中心，討論及瞭解該中心在分子太陽電池量

產製程技術之研發現況及細節；並拜訪有機太陽能電池跨國整合型計畫(Solliance 計畫)之計畫總部辦公室，交換各類型太陽能電池量產技術及產業開發之經驗與展望，作為本所高分子太陽能電池商用量產技術、產業化及突破創新之參考，期能儘早與國際現況接軌及展開技術佈局。

## 二、過 程

9月17~18日：

搭乘華航班機由桃園機場出發，經曼谷中轉後抵達荷蘭阿姆斯特丹史基浦機場。  
於機場內轉乘火車前往愛因荷芬(Eindhoven)，宿於 Hotel Benno。

9月19日：

參訪 Holst Centre 實驗室及有機太陽能電池跨國整合型計畫 Solliance 總部辦公室(Eindhoven)。而後搭乘火車返回阿姆斯特丹，宿於 Delta Hotel City Center。

9月20~21日：

整理資料(阿姆斯特丹)。

9月22~26日：

參加於荷蘭阿姆斯特丹之 RAI Convention & Exhibition Centre 舉行之第 29 屆歐洲光伏太陽能國際研討會暨展覽會。會場如圖 2.1 所示，會議議程如圖 2.2 所示，當日並於海報論文展示區張貼本所發表之高分子太陽電池壁報論文一篇，圖 2.3 為本所所張貼之海報與通訊作者。

9月27~28日：

從荷蘭阿姆斯特丹史基浦機場，搭乘華航班機返回台灣桃園機場。

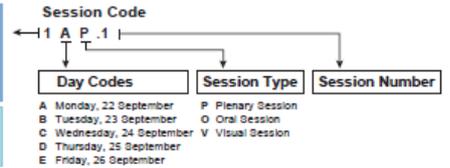


## Conference Programme Outline

	Monday, 22 September	Tuesday, 23 September	Wednesday, 24 September	Thursday, 25 September	Friday, 26 September		
08:30	Scientific Opening 1AP.1 Jinghui Zhou* Invited + 2 plenarys, 08:30-10:00	2BO.1 T2.4	3BO.5 T3.1	4BO.9 T4.4	5BO.1 T5.1	6BO.1 T6.1	08:30
10:00	International Addresses	Break 2BP.1 1 keynote + 2 plenarys, 10:30-12:00	3CP.1 3 keynote, 09:30 4CP.2 1 keynote + 1 plenary, 12:10	5DP.1 1 keynote + 2 plenarys, 09:30 6DP.2 1 keynote + 2 plenarys, 12:10	7EP.1 1 keynote + 2 plenarys, 10:30-12:00	8EO.3 T8 Energy Systems	10:00
12:30		Lunch	Lunch	Lunch		Closing Session	12:30
13:30	1AO.1 T1.1	2AO.4 T2.2	3AO.7 T3.1	4AO.10 T4.1/2	5AO.1 T5.1	6AO.2 T6.1	13:30
15:30	1AO.2 T1.1	2AO.5 T2.2	3AO.8 T3.1	4AO.11 T4.1/2/3/4	5AO.2 T5.3	6AO.3 T6.1	
16:15	1AO.2 T1.1	2AO.5 T2.2	3AO.8 T3.1	4AO.11 T4.1/2/3/4	5AO.2 T5.3	6AO.3 T6.1	
16:45	1AO.2 T1.1	2AO.5 T2.2	3AO.8 T3.1	4AO.11 T4.1/2/3/4	5AO.2 T5.3	6AO.3 T6.1	
17:00	1AO.3 T1.2	2AO.6 T2.3	3AO.9 T3.2	4AO.12 T4.3	5AO.3 T5.4	6AO.4 T6.2	
18:30		EU PVSEC Welcome Reception	EU PVSEC Dinner				

Topics / Subtopics	1 New Materials and Concepts for Solar Cells and Modules	2 Wafer-Based Silicon Solar Cells and Materials Technology	3 Thin Film Solar Cells	4 Solar Cells / Assemblies / Modules for Terrestrial Concentrator Systems and for Space Solar Generators
	T1.1 Fundamental Material Studies T1.2 New Materials and Concepts for Cells T1.3 Novel Materials and Concepts for Modules	T2.1 Silicon Feedstock, Crystallisation and Wafering T2.2 Silicon Solar Cell Improvements T2.3 Silicon Solar Cell Characterisation and Modelling T2.4 Manufacturing Issues and Processing	T3.1 Silicon-based Thin Film Solar Cells T3.2 CdTe, CIGS and Related Ternary and Quaternary Thin Film Solar Cells T3.3 Organic-based PV	T4.1 Si-V-based Multi-junction Solar Cells, Concentrator Solar Cells and Space Solar Cells T4.2 Electrical Characterisation and Modelling of Cells and Modules T4.3 Terrestrial Concentrator Modules and Systems T4.4 Solar Generators for Space Missions

5 Operations, Performance and Reliability of Photovoltaics (from Cells to Systems)	6 PV Applications	7 PV - A Major Electricity Source
T5.1 Operation of PV Systems and Plants T5.2 Balance of System Components T5.3 PV Modules T5.4 Performance and Reliability of Solar Cells T5.5 Quality and Sustainability in Manufacturing and Recycling T5.6 Standardisation as Tool for Innovation and Cost Reduction	T6.1 PV and Smart Buildings T6.2 PV as Building Material Component (focus on technical issues) T6.3 PV and Architecture T6.4 PV Applications without a Centralised Grid	T7.1 PV in the Electricity Markets T7.2 PV Business Opportunities T7.3 PV Globalisation, Policies and Administrative Issues



EU PVSEC / Status as of 26 June 2014

圖 2.2 EU PVSEC 2014 研討會暨展覽會議議程



圖 2.3 本所發表之海報論文及通訊作者

### 三、心得

#### (一) 荷蘭 Holst Centre 研究中心概述與參訪心得

由著名的歐洲研發機構 IMEC 與 TNO 所建造的 Holst Centre，於 2006 年開始運作，致力於發展超低功率電子與軟性電子，應用範圍涵蓋照明、太陽能、顯示器與衛生保健等等。IMEC(Interuniversity Microelectronics Centre)為世界上最大的獨立微電子研究中心，研發的重點是下一代的新型電子技術，目標為領先業界三到十年的技術需求，備受全球半導體業推崇。Holst Centre 身為旗下之重點研發單位，延攬了來自世界各地超過 28 個國家的研究人員約 180 名，還有 70 個業界與學術研究團隊常駐共同進行研發。近幾年來，由於受到了當地政府與荷蘭政府的共同支持，Holst Centre 正以相當迅速的速度建立 R&D 研發同盟。Holst Centre 主要的合作夥伴與經費來源皆來自於業界，其營運模式是藉由彼此間想法的整合、設備與專長技能的整合並縮短邁向市場化的時間，以降低 R&D 的成本與風險。因此 Holst Centre 提供了一個技術平台，對於業界所需要的技術主題，提出各種計畫來讓有興趣的公司，藉由這個平台來共同參與。因此在 Holst Centre 中，成員間互相合作分享技術與 know-how，並藉由每半年舉行研討會與線上資訊分享的方式，加強各團隊成員的交流以迅速提升技術能量。

如前所述，Holst Centre 致力發展軟性電子應用在照明、能源、顯示器以及相關電子產品中。在照明應用方面，他們提出有機發光二極體(OLED)照明計畫，目的在於開發低成本的發光箔片(lighting foils)，未來可取代傳統照明裝置。目前此項技術是應用在玻璃上，利用真空顯影的方式，大約有 40~60%的材料損耗率，因此成本約為 10,000 €/m<sup>2</sup>；他們的目標是在 2016 年，利用直接印刷的方式製作在軟性基板上，降低材料損耗率至 5%以內，也將成本降至 100 €/m<sup>2</sup>。而在能源領域中，Holst Centre 著重於建立低成本的新方法來產生與儲存能源，其中有機太陽電池(organic solar cells)與 3D 電池因其能夠像列印報紙般快速且低成本的製作，特別受到重視。舉例來說，他們現在的有機太陽能電池模組效率約 2%，平均每瓦發電成本約 20€、戶外壽命約 2 年；2016 年預期達到模組效率為 10%，平均每瓦發電成本降至 0.5€，且在戶外有超過 5 年的壽命。

在顯示器與其它應用電子產品方面，Holst Centre 的目標是開發輕薄、不易損壞的軟性電子，未來可應用在軟性顯示器、穿戴式健康監控裝置與電子標籤上。從 Holst Centre 提出的技術藍圖與目標來看，可以了解低成本、溶液製程與軟性電子是未來發展的方向，這與核能研究所(INER)近幾年來的發展目標一致，顯見此研究方向是目前全球在有機光電及其應用上的共識。以有機太陽電池為例，雖然其發電效率與壽命仍不及傳統矽晶太陽電池，但若是發電成本能夠有效降低，相信還是具有高度的競爭力。且有機太陽電池在邁向商品化的過程中，最常令人質疑的就是其壽命的問題，而在 Holst Centre 簡報數據中已經揭示，目前戶外壽命已可超過兩年；而根據其資深研究員 Yulia Galagan 博士在參訪中指出，利用 Holst Centre 所開發出來的高品質阻水阻氣膜來封裝有機太陽電池，在 85°C/85%RH(相對溼度)的加速老化環境測試下，可達到超過 7,000 小時以上的電池壽命，換算相當於超過 30 年以上的戶外壽命。雖然他們並未透露更多的技術細節，但此一結果無疑是對有機太陽電池打了一支強心針，也使得核能研究所持續研發有機太陽電池技術更具信心。此外，他們也在現場展示了各式各樣不同的有機太陽能電池產品(如圖 3.1.1)，充分顯示出有機太陽能電池應用在室內與軟板上，無限可能的應用性。



圖 3.1.1 Holst Centre 製作之 OPV 原型產品。

## (二) 歐洲整合型計畫 Solliance OPV Program 概述與參訪心得

歐洲大型整合計畫 Solliance 聚集了許多優秀的 R&D 研發團隊，主要成員包含有 ECN(荷蘭重要的能源研究單位)、IMEC(世界著名之微電子研究單位)、TNO(荷蘭重要應用科學研究機構)、Holst Centre、TU/e (愛因荷芬工業大學)與 FZJ(德國最大能源相關研究機關)等單位，此計畫主要的目的是追求卓越的薄膜太陽電池技術，包含薄膜系矽晶太陽能電池、CIGS 與 OPV 等，其中 OPV Program 即是 Solliance 最為重點研發的一項。

Solliance OPV Program 首先於會議中提出他們的效率藍圖，如圖 3.2.1 所示。效率藍圖中包含了現在最高效率值、Solliance 單一電池最高效率值、Solliance 模組效率值、以量產製程製備之模組效率值及其各個目標效率值。由圖 3.2.1 可知，Solliance 目前最高效率值已突破 10%，目標在 2015 年效率值能夠達到 14%，且元件於 65°C/85%RH 加速環境測試一千小時後，效率值衰減能夠小於 5%。而在模組方面，以真空製程製作之效率值已達約 7%，2015 年的目標效率要大到 9%，模組面積大於 100cm<sup>2</sup>，其中有效發電面積大於 90%，元件於 65°C/85%RH 加速環境測試一千小時後，效率值衰減能夠小於 5%。在以可量產之溶液製程製作模組技術上，目前效率將近 2%，2015 目標效率將達 6%，且使用非鹵素溶劑，模組面積大於 100cm<sup>2</sup>，有效發電面積大於 80%，元件於 65°C/85%RH 加速環境測試一千小時後，效率值衰減能夠小於 5%，估計此時每瓦成本將小於 0.5€。由 Solliance 提出的技術藍圖看來，除了效率穩定提升之外，元件壽命與環保無污染、量產大面積製程與模組技術也是未來 OPV 的發展重點目標。核能研究所近幾年來致力於發展量產大面積製程與模組技術，在效率表現上優於目前 Solliance 效率結果，但在元件穩定度的研究上則稍微落後，未來亟需加強這部分之研究。

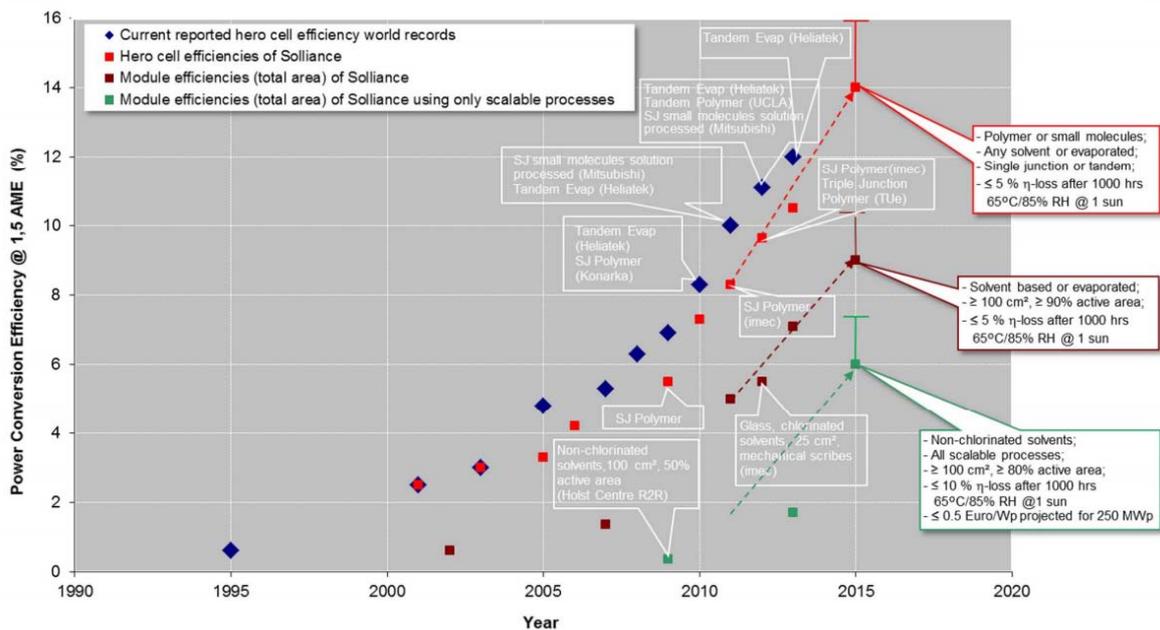


圖 3.2.1 Solliance OPV Program 的技術藍圖與未來目標。

Solliance OPV Program 目前研究主要包含四個部分：(1)材料與元件；(2)大面積製程；(3)元件壽命；與(4)產品開發應用。以下就這四個部份分別敘述其研究現況。

### 材料與元件：

目前 Solliance OPV Program 在元件材料研究方面包含小分子(small molecule)、高分子(polymer)與鈣鈦礦結構材料(perovskite)，製程方式則包含真空蒸鍍製程與溶液製程兩種，而在元件結構方面則除了一般的單一元件(single cell)外，也包括了疊加型(tandem)和三接面(triple junction)等等。其目前所達之最佳效率值如圖 3.2.2 所示。

Technology	Single junction	Tandem	Triple junction
Evaporated	8,5%	9,3%	n.a.y.
Solution processed small molecules	8,1%	2% (world's first)	n.a.y.
Solution processed polymers	9,8% 9% (certified)*	10,6%*	9,6%
Perovskites	13,1%		

圖 3.2.2. Solliance OPV Program 於小面積元件之最高效率表現

其中，與核能研究所的研究最為相關的，是溶液製程製備高分子太陽電池與鈣鈦礦結構

太陽能電池。以溶液製程製備高分子太陽電池，其研究之元件結構如圖 3.2.3 所示。

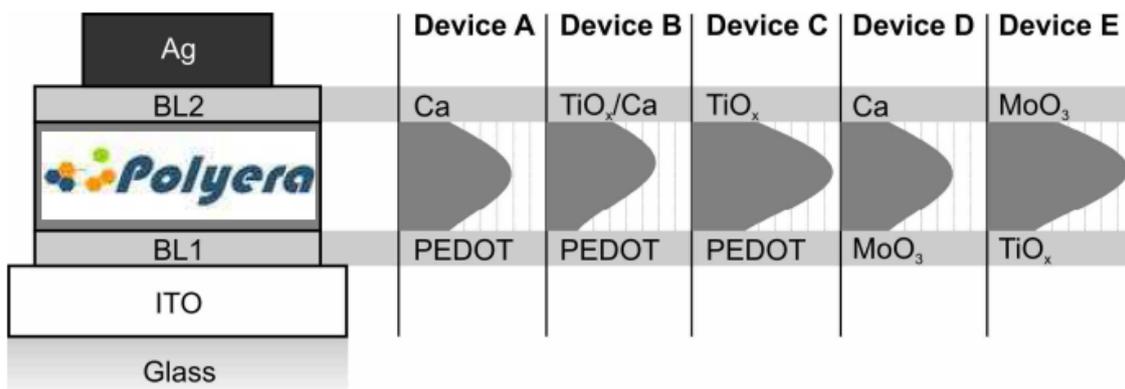


圖 3.2.3 Solliance OPV Program 元件結構。

在這五種元件結構中，效率最高的是 Device E 之反式結構(最佳效率經驗證為 9%，)；此種反式結構除了主動層之外，皆使用無機物作為其他界面層，能夠有效的提升高分子太陽電池的壽命與穩定度。而在疊加型太陽電池研究上，也能有效的調控前、後電池之間的界面，成功的將前後電池疊加起來，也將元件效率提升至 10.64%，其元件效率圖如圖 3.2.4 所示。

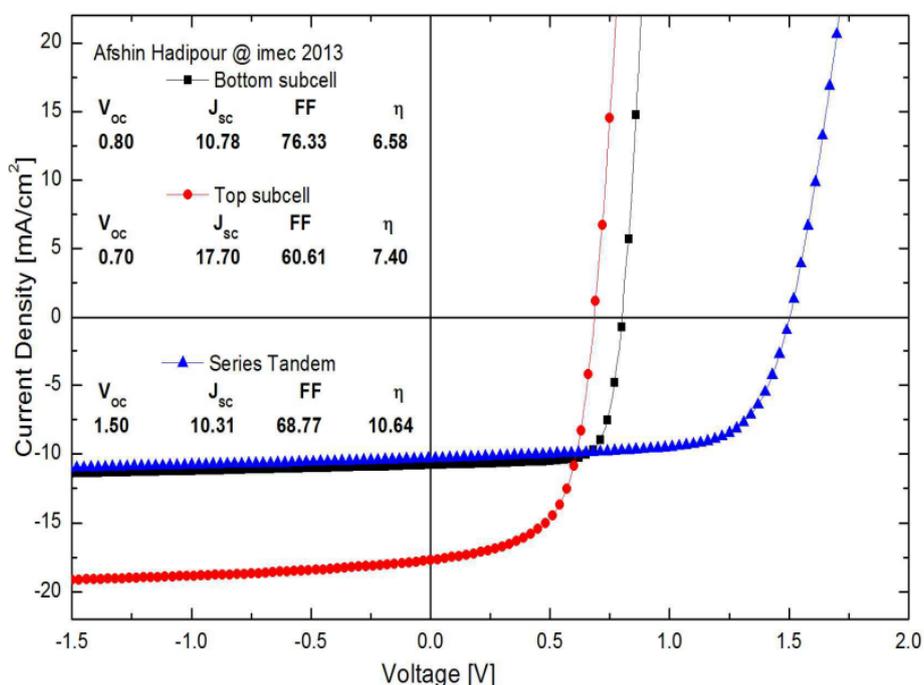


圖 3.2.4 疊加型太陽電池之前電池、後電池與全電池之效率表現。

此外，近三年來最令人期待的新型太陽電池—鈣鈦礦結構太陽電池，Solliance OPV

Program 也以溶液法製作平面元件結構(planar configuration)之鈣鈦礦結構太陽電池，其元件結構、截面圖與鈣鈦礦結構晶相如圖 3.2.5 所示；且其元件效率已可達 13.1%，效率表現如圖 3.2.6 所示。

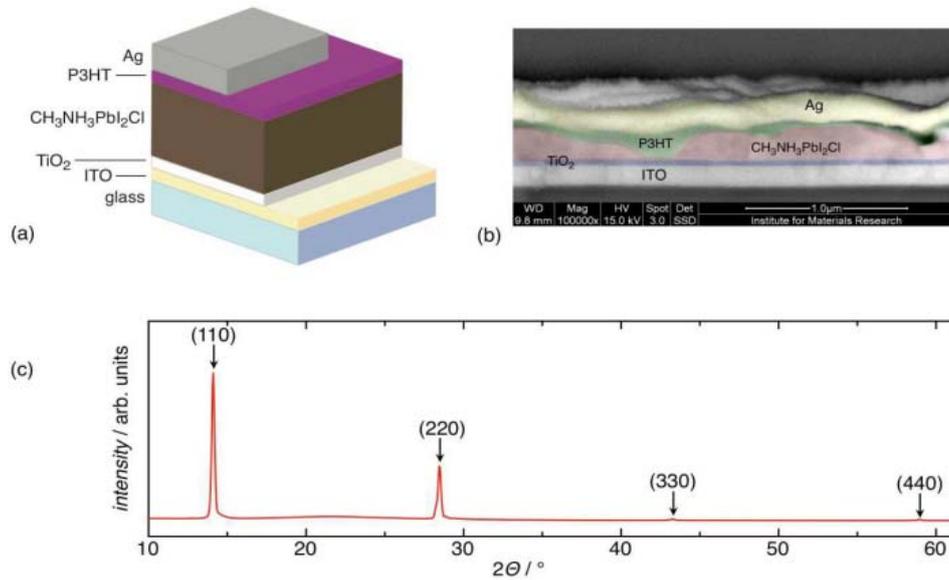


圖 3.2.5 鈣鈦礦太陽電池(a)結構、(b)元件截面圖與(c)鈣鈦礦結構晶相圖。

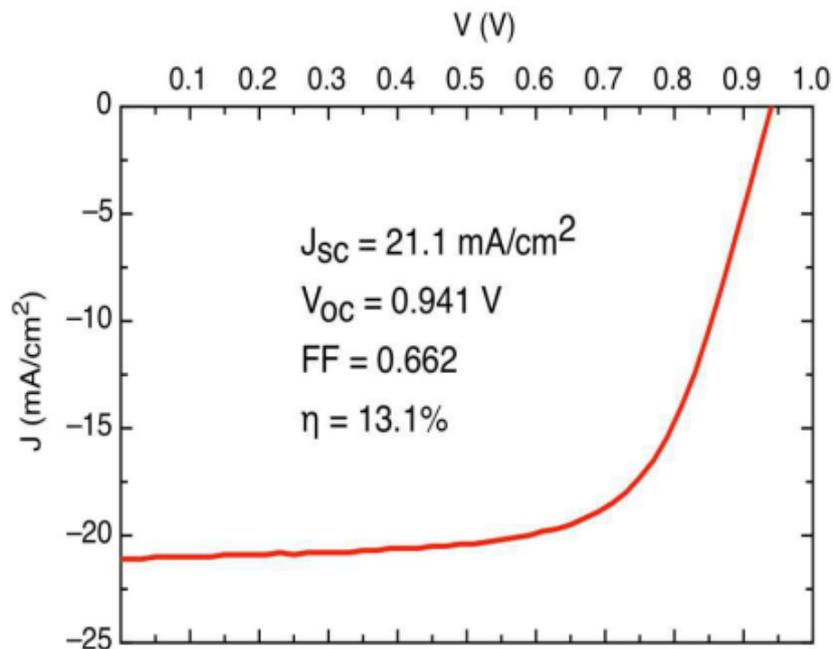
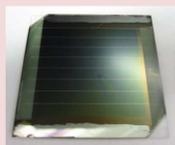
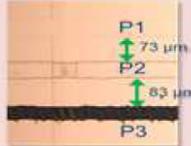
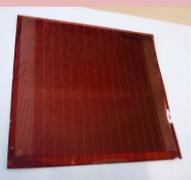
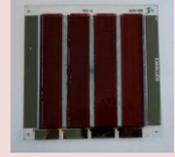


圖 3.2.6 Solliance OPV Program 製備之鈣鈦礦太陽電池元件效率圖。

雖然鈣鈦礦結構太陽電池高效率的表現，讓人對於 OPV 的未來更加期待，但他們也表示，

目前鈣鈦礦太陽電池距離商業化還有一段路要走，現階段仍然是以高分子太陽電池作為邁向市場的研發主力。因此 Solliance 也致力於開發 OPV 模組技術，分別利用蒸鍍與溶液製程，來製作非透明與透明之模組，其所研發之結構、製程方法與最高效率如圖 3.2.7 所示。

Picture	Deposition Technology	Interconnection Technology	Aperture Efficiency	Picture
	Evaporated single junction	Mechanically scribed	1,2%*	
	Evaporated tandem	Mechanically scribed	7,2%	
	Solution processed Non-transparent	Mechanically scribed	5,5% (certified)	
	Solution processed Semi-transparent	Mechanically scribed	5%	
	Solution processed Non transparent	Laser scribed (multi-step)	2,3%*	
	All solution processed	Laser scribed (back-end)	< 0,5%*	
	All Solution processed	Ink Jet Printed (all layers)	0,72%*	

*\*low performing materials*

圖 3.2.7 Solliance OPV Program 模組技術研發現況。

由圖 3.2.7 可知，目前以蒸鍍製程方式製作之疊加型電池模組效率最高，可達 7.2%；而以溶液製程製作之單一型電池非透明模組效率可達 5.5%，半透明模組效率可達 5%。其中，爲了提高模組有效發電面積，同時也開發了以雷射切割的方式來進行模組圖案化，目前效率達到 2.3%，顯示未來仍有許多改善空間。此外，Solliance 也開發以噴墨印刷的方式來製作模組，目前效率雖僅有 0.72%，但因噴墨印刷製程方式具有可高度圖案化的優點，未來可客製化製作 OPV 模組，因此他們認爲仍是有極大的研發價值，此外，他們初步所使用的是效率表現較低的材料，未來材料與製程上仍有很大的進步空間，來提升其效率並拓展其應用市場。

### 大面積製程：

爲了符合商業化量產的需求，大面積商業量產製程技術的開發是至關重要的一環，其中卷對卷塗佈製程方式(Roll-to-roll manufacturing)是最適合的製程方法，但在將 OPV 應用至卷對卷製程上，有許多重要的因素需要克服，諸如每一層均需可溶液製程、選用綠色溶劑、

取代常用之銦錫氧化物透明電極(ITO)、蒸鍍銀電極、因應軟性基板所需之低溫製程、軟式封裝所需之阻水阻氣膜與高產率等等。他們此次主要針對了幾個特別重要的部分加以說明，包括 ITO 透明電極的取代、大面積量產製程(噴塗、噴墨印刷與狹縫塗佈)開發與模組技術。這些研究方向也正與核能研究所目前研究的方向一致，因此深具參考價值。首先，在 ITO 透明電極取代的部分，Solliance 利用三種方式，包含噴墨印刷銀線、網印金屬網格與高導電度之導電高分子作為 ITO 取代電極，它們的導電度與穿透度各有不同，也因此製作成元件與模組時，效率也會隨之變化。這三種透明取代電極的性質與相對應之效率如圖 3.2.8 所示。

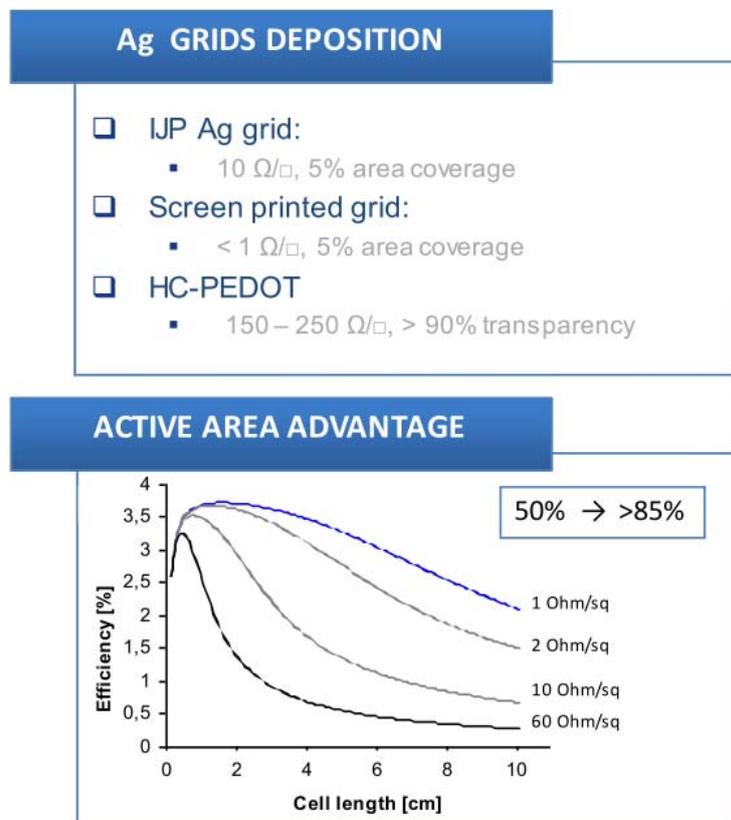


圖 3.2.8 ITO 替代電極之性質，與相對應之效率圖。

由圖上可知，目前 Solliance 以噴墨印刷銀線與網印金屬網格所製備之替代電極，可具有較低的片電阻值，且僅佔整體元件面積的 5%。而高導電度的 HC-PEDOT，雖然它具有與 ITO 相當的穿透度，但由於片電阻仍然太大(150~250 $\Omega/\square$ )，因此在 OPV 應用上，僅能作為輔助電極。Solliance 所開發之全溶液製程之反式太陽電池，其元件結構與模組如圖 3.2.9 所示。

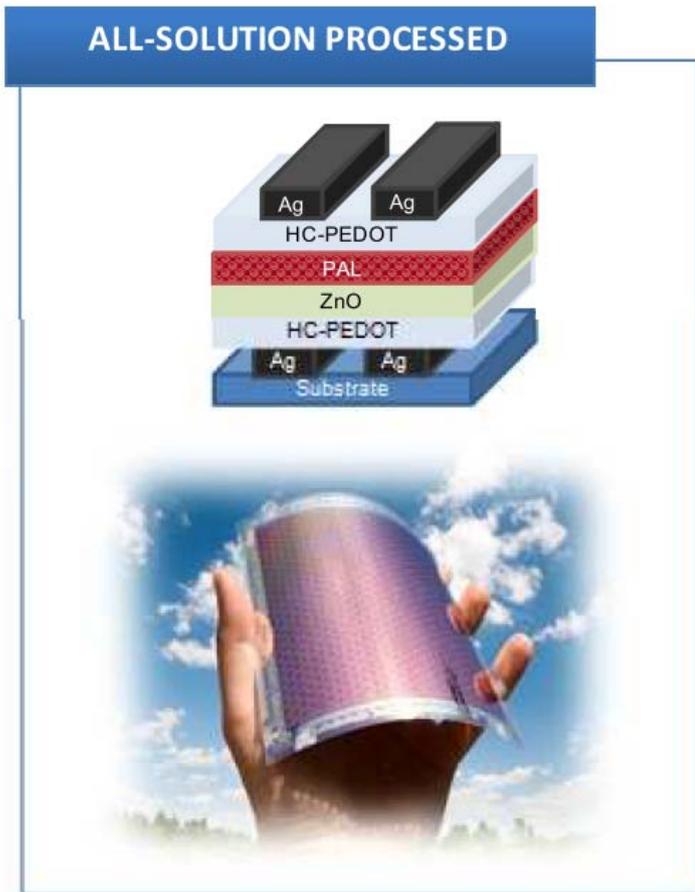


圖 3.2.9 Solliance 所製備的全溶液 OPV 電池元件結構與模組圖。

在大面積量產製程上，Solliance 主要研發卷對卷狹縫塗佈製程、噴墨印刷與噴塗製程技術。在狹縫塗佈製程技術上，已可成功塗佈 PEDOT:PSS、ZnO、主動層與銀金屬電極。另外，他們也結合了卷對卷狹縫塗佈技術與雷射切割技術，來製作大面積串聯模組。其模組結構為 PET/ITO/ZnO/Photoactive layer/PEDOT:PSS/Ag，利用雷射切割的方式，可以將主動層有效發電面積提升至 97~98%，且其效率(2.3%)與小面積元件(2.5%)相當。模組效率圖與模組如圖 3.2.10 所示。

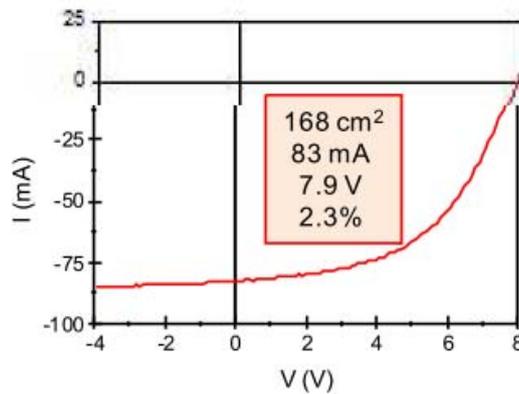


圖 3.2.10 卷對卷狹縫塗佈模組與其效率圖。

Solliance 初步已證實其量產製程的可行性，且擁有不錯的效率表現，雖然現在的模組上電極是蒸鍍或是網印所製作，他們提出未來將以溶液製程製作每一層，且替換較高效率之主動層材料，來提升模組效率並且更貼近商業化目標。

而在噴墨印刷製備 OPV 方面，Solliance 特別著重於噴墨印刷製程特有之高度可圖案化優點，製作出各式不同圖案之 OPV 元件，如圖 3.2.11 所示。由於噴墨印刷製程具有很大的設計自由度，是其他製程方式所難以取代的優勢，在未來應用於各式商品上，能夠更靈活的滿足不同客戶的需求，因此雖然其製程速度不及狹縫塗佈迅速，但 Solliance 相信其在未來上也將佔有不同的利基市場。



圖 3.2.11 噴墨印刷製程製備不同圖案之 OPV 元件。

目前 Solliance 已掌握了適合於噴墨印刷製程的「墨水」(即各層溶液)，以噴墨印刷製程製備 ZnO 層與主動層，最高效率已可達 7%；而若是包含上下電極均以噴墨印刷方式製備，則效率可達 4.2%，其元件結構圖與效率圖如圖 3.2.12 所示。

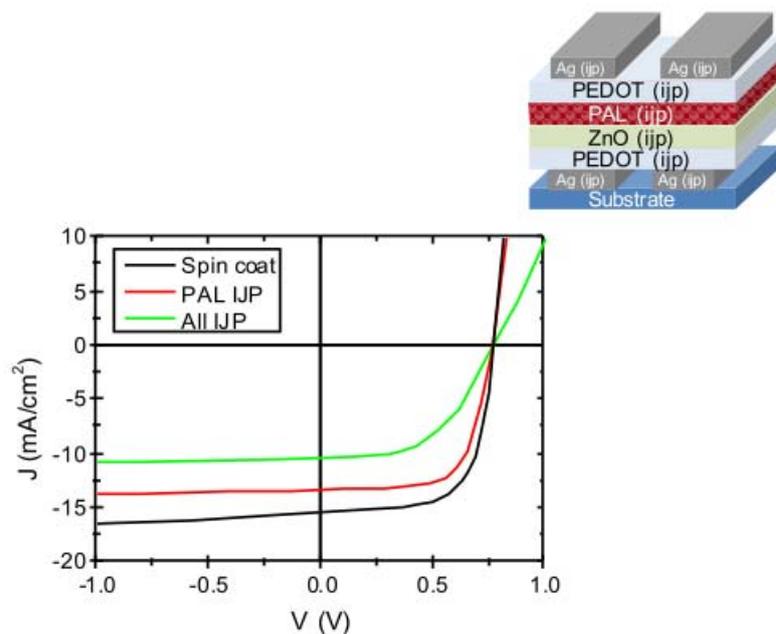


圖 3.2.12 全噴墨印刷製程製備之元件結構與效率圖。

此外，在噴塗製程的研發上，Solliance 也成功的利用噴塗製程，製備出具 6.4% 高效率的 OPV 元件，其相對應之製程條件、元件效率與製程示意圖如圖 3.2.13 所示。結果顯示，利用噴塗製程所製備之 OPV 元件，已經和傳統實驗室旋轉塗佈製程所製備的不相上下，顯示出噴塗製程幾乎已經可以取代習用之旋轉塗佈製程。

▪ **Concurrently pumped ultrasonic spray coating PAL**

- Spray width: 5-70 mm
- Substrate: 30x30 cm<sup>2</sup>
- Viscosity: 1-1000 cPs
- Nozzle velocity: 1-1000 mm/s

	PCE (%)	FF (%)	EQE (mA/cm <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (mV)	V <sub>oc</sub> (mV)
Spray	6.4	65	17.8	550	550
Spin	6.4	64	18.3	550	550

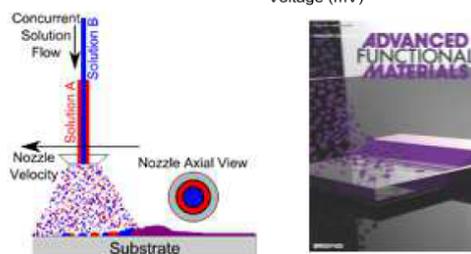
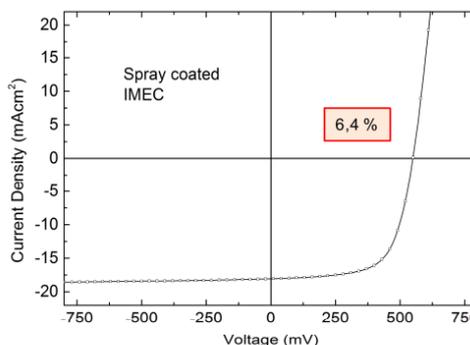


圖 3.2.13 Solliance 所開發之噴塗製程技術。

綜合以上所述，Solliance OPV Program 目前在大面積量產製程技術開發上，不論是狹縫塗佈、噴塗與噴墨印刷製程技術，皆有相當可觀的優秀結果。圖 3.2.14 為 Solliance 在量產製程技術上所投資的各種機台設備，其中包含卷對卷和片對片等製程。由這些設備機台與相關之研發技術，可以了解 Solliance 已經建立起可與產業迅速連結的小型試量產線；而選用何種製程技術，則端視後端客戶應用來決定；每一種製程技術都有其特有之優點，可滿足後續各式不同市場需求。

R2R (choice is CoO and application related)

# Current available equipment

Slot Die, Spray Coating, Ink Jet (choice is CoO and application related)



Slot die → together with nTact: R2R intermittent stripe coating



Coatema/Troller/nTact 30 cm modular R2R coat and print line



R2R 30 cm ink jet modules

S2S



nTact S2S intermittent slot die with shims Direct coating of squares or rectangles



Spray Coater Sonotek



R&R PixDro/MiPlaza S2S 6 inch ink jet engine with integrated dryer



圖 3.2.14 Solliance OPV Program 所研發之量產技術與其相關設備機台。

而為了更進一步更接近真正量產線，Solliance 也與多家廠商，包括 VDL、Rextoth、Smit Ovens、spgprint 與 nTact 等，合作開發了大型連續型量產設備，其示意圖如圖 3.2.15 所示。

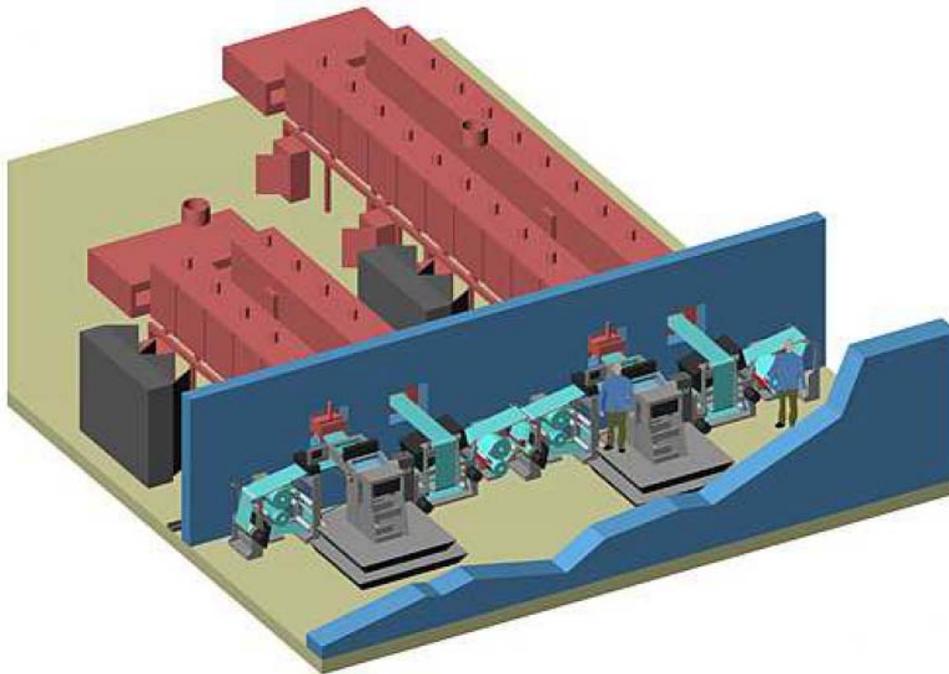


圖 3.2.15 Solliance OPV Program 新建置之大型連續量產製程設備。

此大型量產設備確保各個膜層能夠連續製作且不受汙染，且腔體內部亦可保持惰性氣體環境，避免水氣與氧氣對於元件效率的影響。Solliance 於今年建置完成此套系統，目前正逐漸開始試運行機台設備，並有些初步的測試結果。礙於商業機密，Solliance 研發人員僅帶我們參觀了此項機台設備的外觀，取而代之則讓我們參觀先前作量產製程研發的機台與實驗室，圖 3.2.16 為同仁與 Solliance 研發人員穿著無塵衣，準備進入無塵室參觀他們先期批次型量產機台的合影。



圖 3.2.16 與 Solliance 研發人員著無塵衣進入無塵室參觀合影。

### 元件壽命：

當技術成熟至有機會邁入市場，進而完成商品化的階段時，製程元件的穩定度與壽命是商品能否成功的重要因素，因此，當開發量產製程技術達到一定水準之後，就需要開始進行穩定度與壽命的測試與改進。圖 3.2.17 是 Solliance 在元件穩定與壽命上所規劃的研究藍圖，由此研究方向可知，Solliance 將穩定度與壽命分為三個面向，首先試圖由基礎理論去了解元件劣化機制，並開發不同控制方式來降低劣化的速度。第二個方向是進行戶外穩定度

測試實驗，目前在 OPV 壽命量測規範方面，尚無一個經過大家認可的標準規範，因此以戶外測試進行穩定度量測，雖然所花的時間較長，但卻也是最能真實表現 OPV 元件在實際應用上的壽命。最後則是開發封裝技術，Solliance 正積極開發高阻水阻氣膜，藉由封裝技術來提升元件壽命。

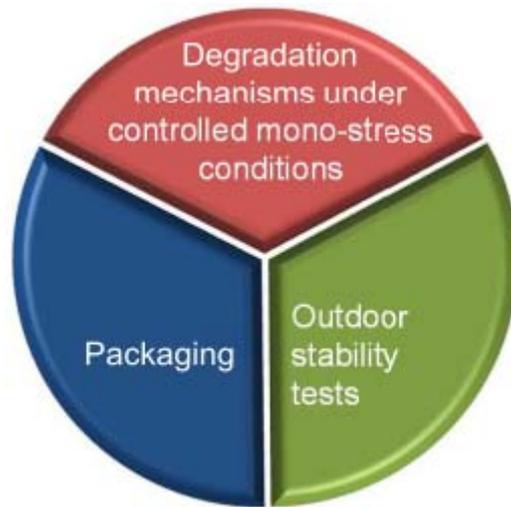


圖 3.2.17 Solliance OPV Program 在元件壽命方面的研究藍圖。

在研究元件劣化機制上，Solliance 研究了個別因素對於元件的影響，其中包括空氣穩定性、熱穩定性與照光下的穩定性；實驗條件如圖 3.2.18 所示。此外，在進行空氣、熱與光的測試實驗中，Solliance 利用如圖 3.2.19 的儀器來進行單一個別因素的影響。ATLAS 系統主要是模擬一般氣候下可能存在的環境，因此可以控制空氣的濕度與溫度；而 Custom-built Rera 系統，則是能夠持續照光與施加偏壓測試。經由這些儀器設備，就可以個別釐清何種因素，是最主要影響 OPV 元件劣化的原因與機制。根據他們的實驗結果顯示，濕度與長時間照光這兩項因素，對於 OPV 元件的穩定度有著較大的影響。

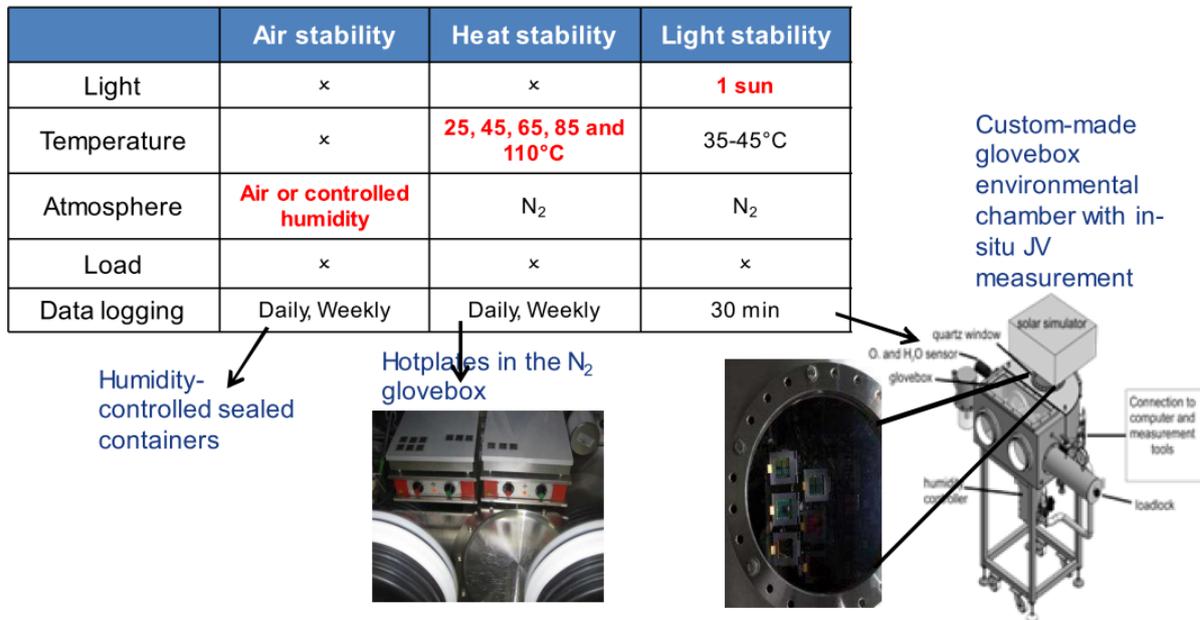


圖 3.2.18 Solliance OPV Program 對於元件劣化機制研究之條件與設備。

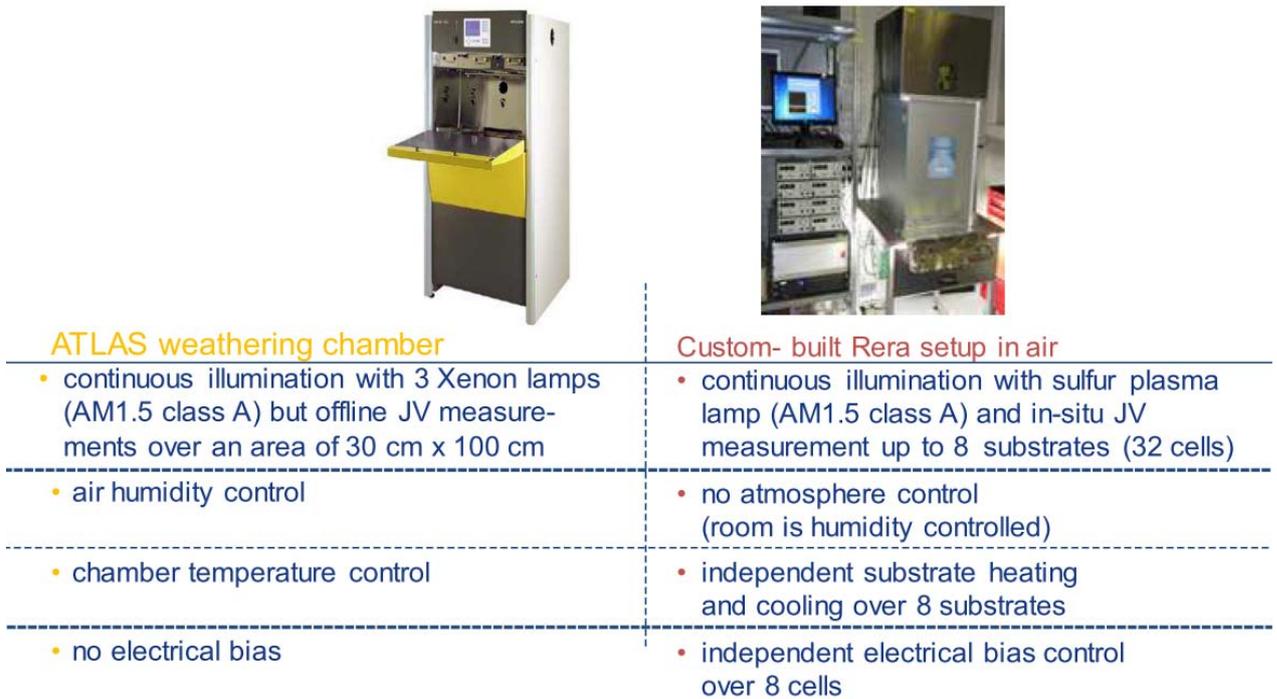


圖 3.2.19 Solliance 進行元件壽命量測所使用的機台設備與功能。

爲了進一步釐清濕度對於太陽電池元件的影響，他們對於反式太陽電池中選用不同之電洞傳導層，觀察其壽命如何受到濕度影響。近幾年來，反式太陽電池由於其元件壽命較傳統順式太陽電池佳，因此在要求較佳的元件壽命表現上，反式太陽電池是目前較常研究的結構，

其中電洞傳導層是影響其壽命的關鍵因素，而一般習用之電洞傳導層是 PEDOT:PSS 與  $\text{MoO}_3$ ，他們也研究了在反式太陽電池中，這兩種電洞傳導層在反式太陽電池中，不同濕度下對於元件壽命的影響。其結果如圖 3.2.20. 所示。

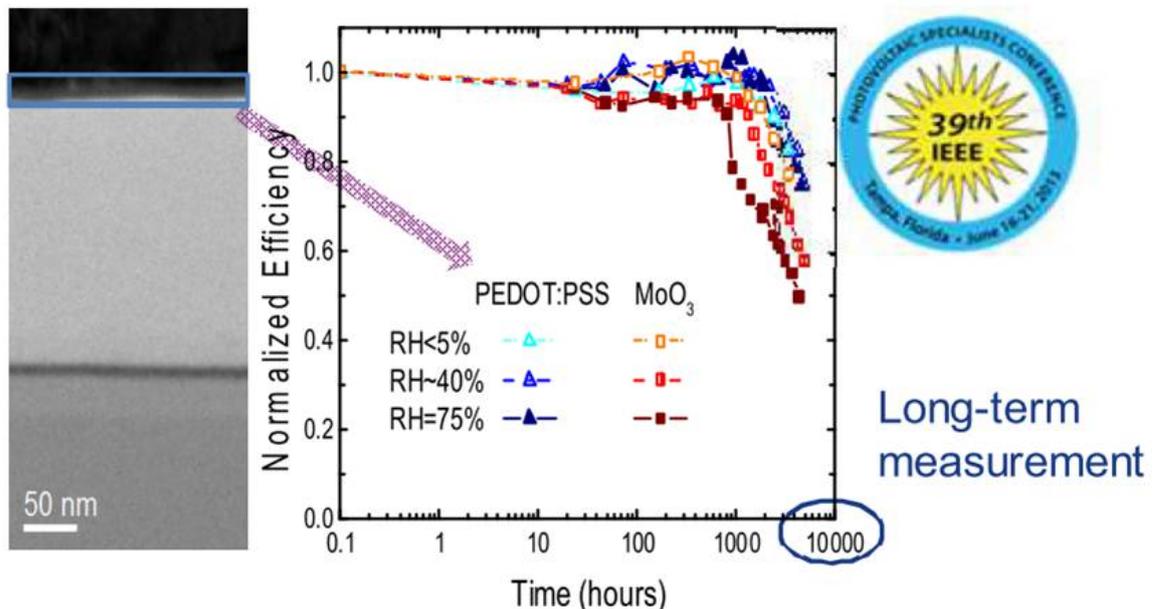


圖 3.2.20 不同濕度下，電洞傳導層對於反式太陽電池壽命的影響。

他們所研發出來的結果顯示，當使用  $\text{MoO}_3$  作為電洞傳導層時，其元件壽命在將近一萬小時的測試表現，要比以 PEDOT:PSS 作為電洞傳導層時要來的差，這顛覆了我們一般的認知，認為使用氧化物作為電洞傳導層的元件，其壽命表現應會比以導電高分子作為電洞傳導層要來得好。另外，PEDOT:PSS 對於濕度並不敏感，無論在高濕度或低濕度的條件下，其壽命表現仍然一致；而  $\text{MoO}_3$  卻在高濕度環境中，有較差的元件穩定度。此項結果，提供了我們在後續元件穩定度測試上，有一個很好的參考基礎。

而在戶外測試方面，他們將元件模組建置在屋頂上與大門口(如圖 3.2.21)，來測試其在不同照射角度下的壽命差異。



Tilted roof



Facade

圖 3.2.21 Solliance 進行 OPV 元件模組戶外測試環境。

除此之外，他們也測試了四種不同的 PV 模組，在一般戶外日照下長時間的量測，其結果如圖 3.2.22 所示。雖然他們並沒有揭示此四種模組的細節條件，但由其測試結果仍然可以得知，若是選用適當的結構與封裝條件，OPV 模組仍然可以在戶外長時間下有很好的壽命表現。

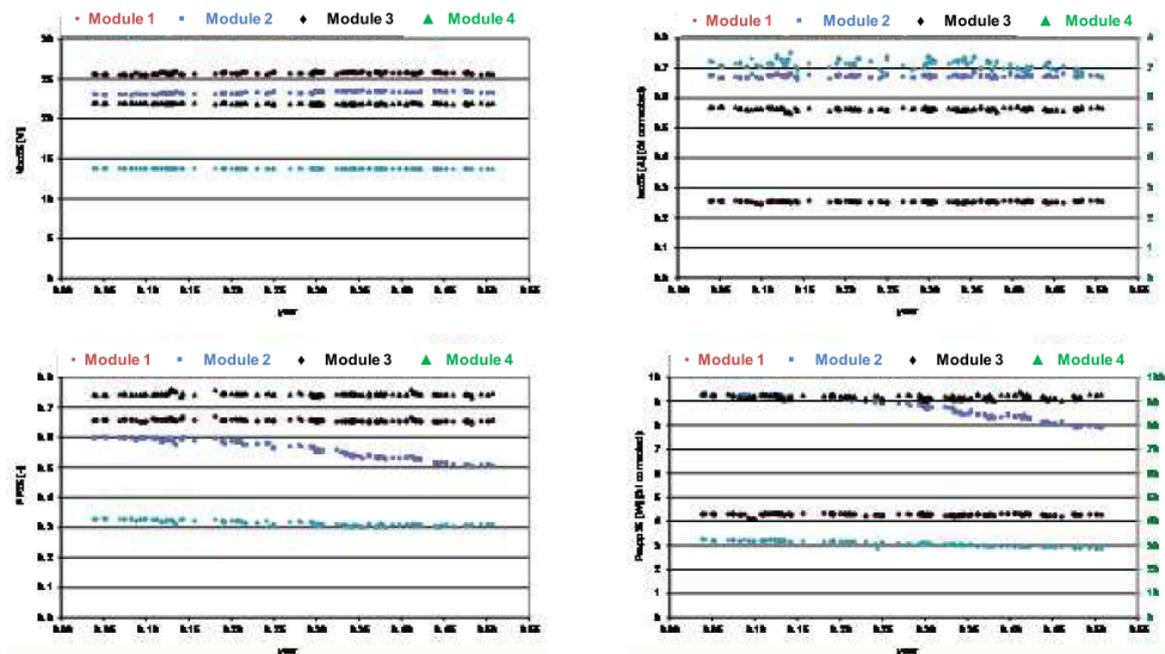


圖 3.2.22 四種不同 OPV 模組戶外下測試結果。

另外 ECN 也有一組相關的測試數據，其利用全溶液製程製作之 OPV 模組，僅以一般的阻水阻氣膜( $\sim 10^{-3}$  g/d.m<sup>2</sup> WVTR)封裝，在戶外置放超過六個月，仍然能夠保持九成以上的輸出功率，其結果如圖 3.2.23 所示。

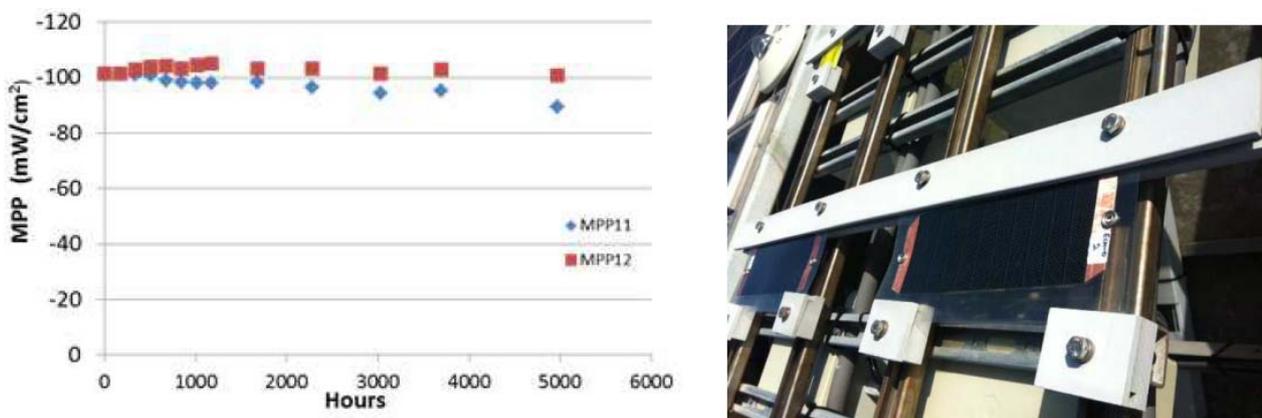


圖 3.2.23 ECN 以全溶液 OPV 模組進行之戶外測試結果。

由以上之結果可以推估，OPV 模組在實際應用上並非如同一般所認為的非常容易劣化，使用壽命短等缺點，在初期若以消費性電子為目標市場的話，這些壽命表現已可符合其需求，若在封裝技術上更加精進的話，未來可望能夠有更廣泛的應用。

有鑑於此，Solliance 在封裝技術上，也花了很大的精力進行研發。他們主要在阻水阻

氣膜、封裝膠、匯流線的優化以及將整個封裝技術運用到片對片與卷對卷製程機台上。在阻水阻氣膜的研發上，Holst Centre 開發出 WVTR 約為  $10^{-6}$  g/day.m<sup>2</sup> 的 barrier film，並以此作為封裝膜，其結果幾乎與以玻璃封裝相同，測試結果如圖 3.2.24。此外，他們也將開發量產型封裝技術，圖 3.2.25 是他們目前開發將封裝技術結構至卷對卷機台設備中，以期未來能夠真正與前端元件量產製程結合，完成連續式的量產線建置。

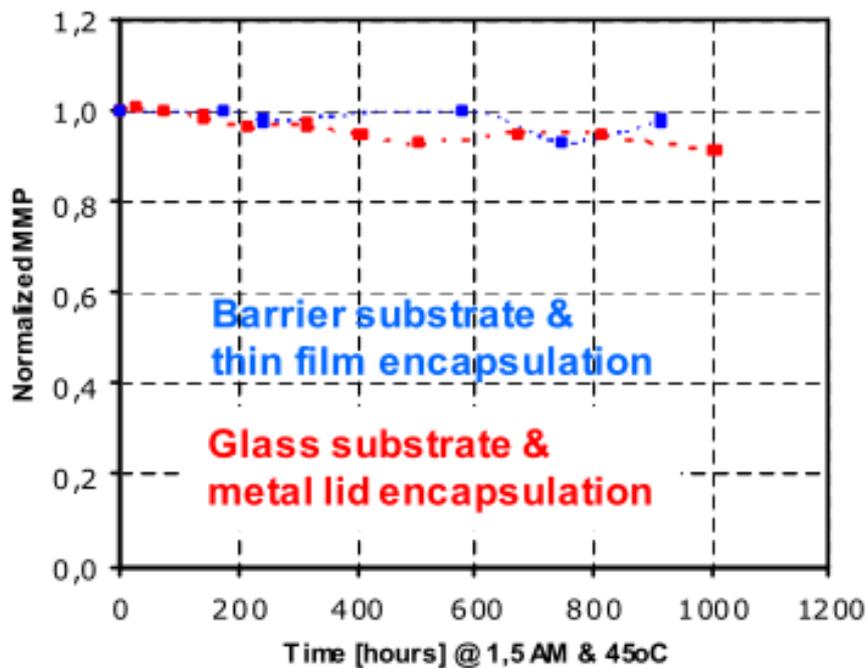


圖 3.2.24 以自行研發之高阻水阻氣膜封裝後之壽命檢測圖。



圖 3.2.25 以卷對卷製程技術進行 OPV 封裝。

## 產品開發應用：

在初期產品開發應用方面，Solliance 將 OPV 分為四項應用平台，各別以硬式或軟式基板，以及透光與否來分類，也就是(1) 硬式非透明應用，(2) 硬式半透明應用，(3) 軟性非透明應用與(4) 軟性半透明應用等等。利用共通的可調色優點與個別具有的透光、軟性與形塑度，提出不同的應用市場。初步提出之應用市場規劃如圖 3.2.26 所示。

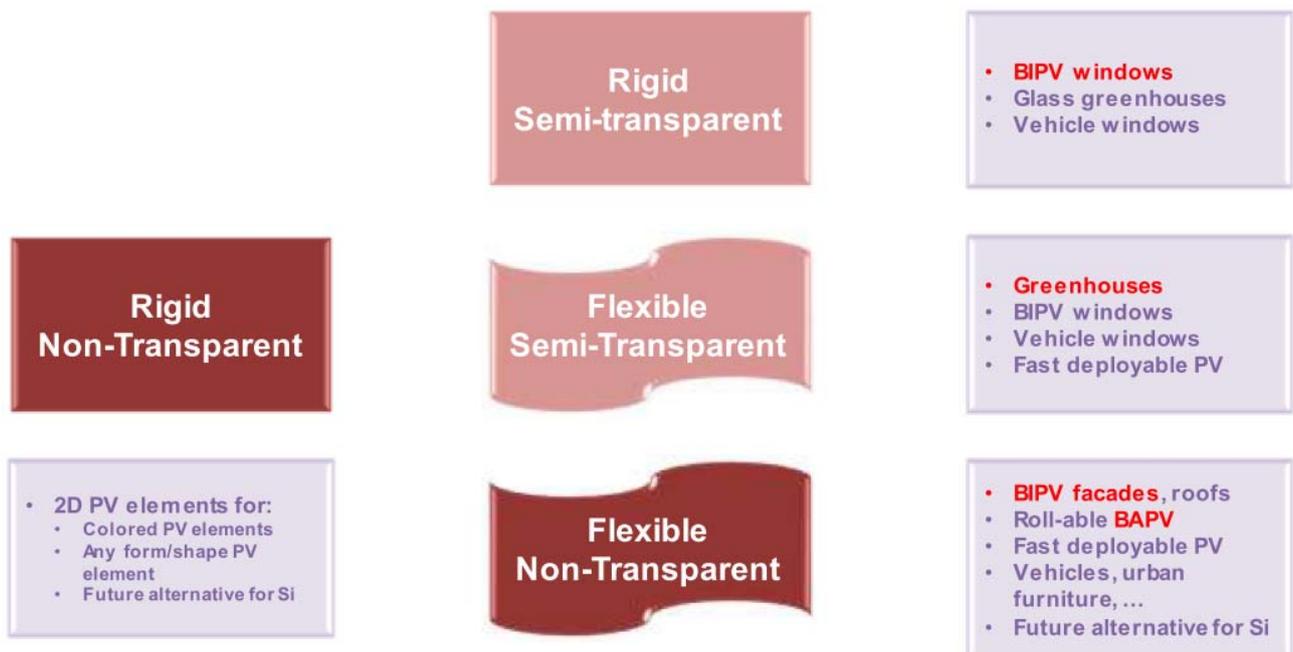


圖 3.2.26 OPV 模組的各式應用目標市場。

在硬性非透明方面，能夠利用其可調色與形塑度高的特色來發想應用市場，並藉由未來效率的提升，目標能夠取代矽晶太陽電池。但此應用市場的競爭者眾，且無法顯示出 OPV 獨有之輕薄柔軟可透光特點，因此在應用市場上仍需待效率與壽命提升後才有競爭力。

而在硬性透明應用方面，Solliance 主打與建物結合(BIPV)相關應用，利用 OPV 的可透光特性來製作節能窗，其產品原型如圖 3.2.27 所示。他們所利用的元件結構，與其串並聯效率與輸出功率如圖 3.2.28 所示。由此結果可以得知，Solliance 所製作之節能發電窗原型，可選擇高電壓或是高電流輸出，以符合各式不同之需求。

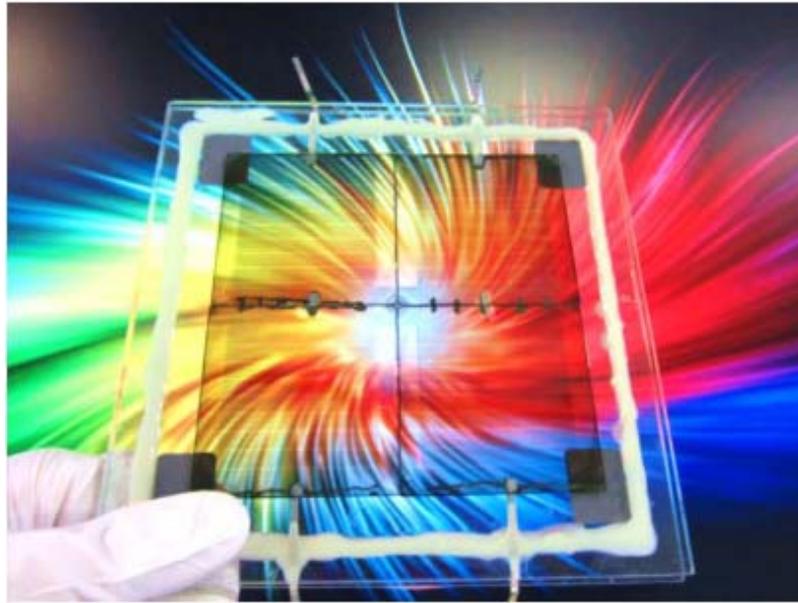


圖 3.2.27 利用 OPV 製作 BIPV 節能窗原型產品。

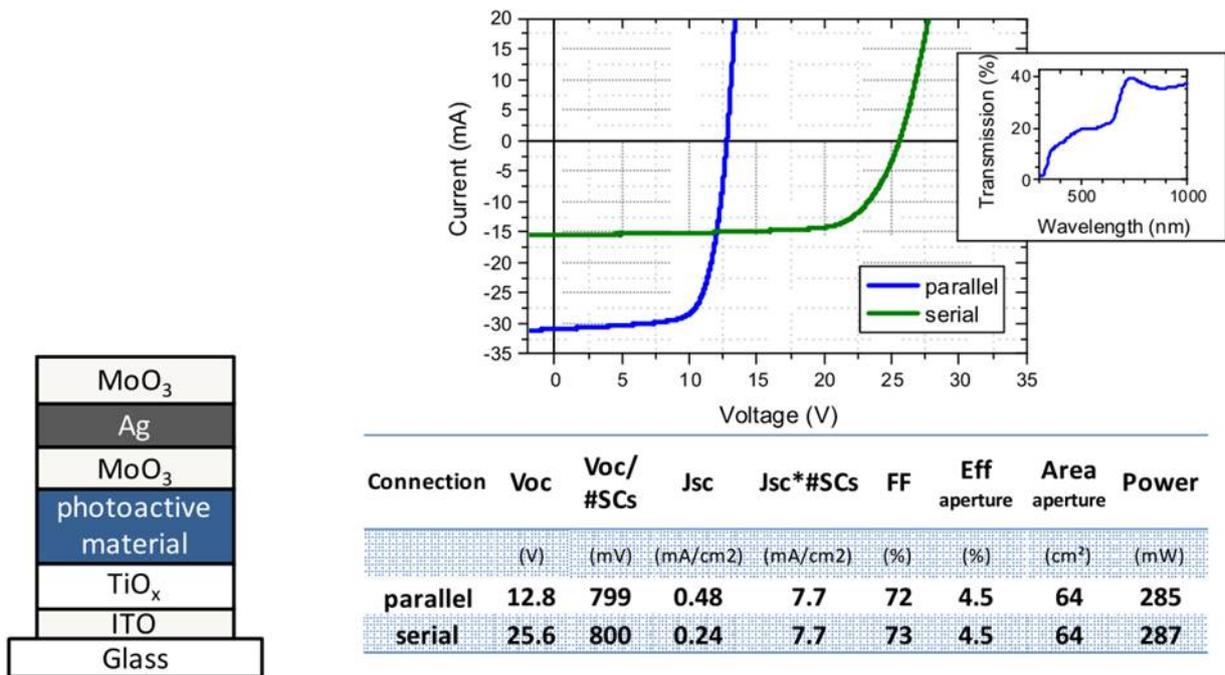


圖 3.2.28 BIPV 節能發電窗結構與串並聯效率及輸出功率。

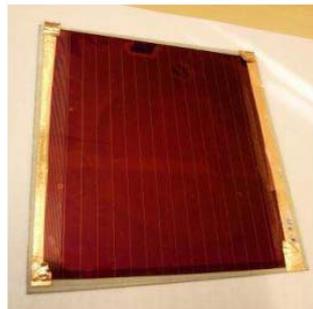
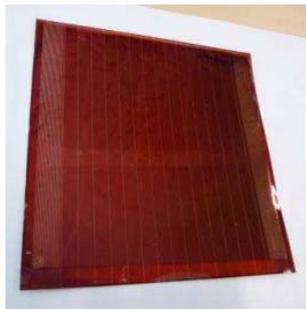
而在軟性非透明的部分，Solliance 與歐洲最大的鋼鐵製造商合作，將 OPV 製作於鋼板上，建置於屋頂或是門板上，其原型產品和預計結合廠商如圖 3.2.29 所示。此一產品的應用將與現行之矽晶太陽電池相互競爭，雖然目前 OPV 發電效率不及矽晶太陽電池，但 OPV 模組的輕薄柔軟特質可降低安裝成本與危險，在未來仍然被認為有其競爭力。



圖 3.2.29 Solliance 軟性非透明應用例。

而現在將 OPV 模組製作於鋼板上，經過層壓後，其效率並沒有太大的變化，其結果如圖 3.2.30 所示。此項結果也顯示出將 OPV 與鋼板做積層結合的可行性，將大大拓展 OPV 模組未來在市場上的應用廣度。

- **Lamination of OPV Modules on Steel**



**Module performance**

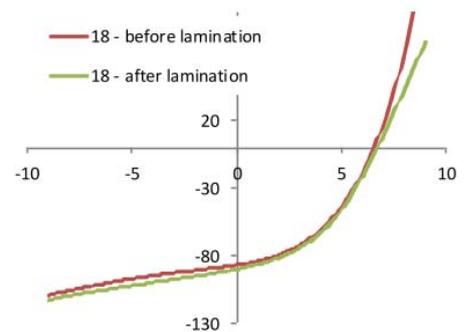
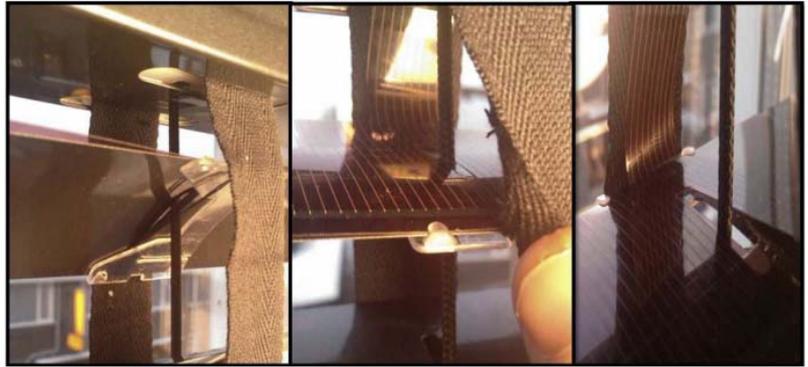


圖 3.2.30 OPV 模組製作於鋼板上的效率變化。

除了應用於鋼板作為建材之外，Solliance 也試圖將 OPV 與窗簾做結合，圖 3.2.31 為其原型產品以及應用在窗簾上的產品示範。



Prototype version 1



Prototype version 2 icw HOWEST

圖 3.2.31 OPV 軟性非透明 OPV 模組應用於窗簾上。

最後在軟性透明的應用上，Solliance 提出了綠化屋(Greenhouse)的概念，如圖 3.2.32 所示，以軟性透明的 OPV 模組作為屋頂，一方面可以發電，另一方面可以利用 OPV 本身的半透明特性，降低室內溫度與調節光線，達到節能環保的效果。

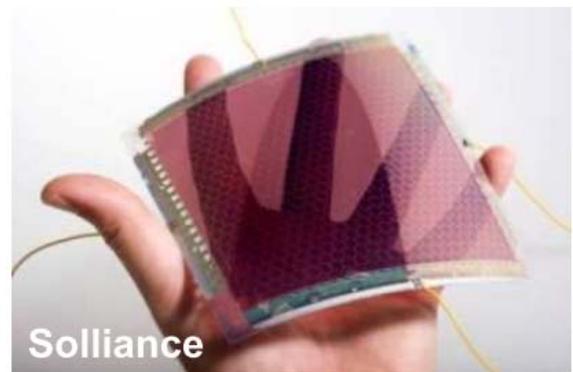


圖 3.2.32 軟性透明 OPV 模組於綠化屋應用範例。

由 Solliance 所提出的所有可能之應用，顯見 OPV 於未來的市場有很大的潛力與競爭力，未來若能在模組效率與壽命更加精進，將可與現有矽晶太陽能電池匹敵。未來除了將在太陽能電池產業中佔有一席之地之外，更能將太陽電池的應用拓展到以往傳統太陽電池難以觸及的市場，這些結果讓本所對於發展 OPV 技術更具信心與動力。

### 3.3 國際發展現況及最新技術進展趨勢-無機半導體太陽電池方面會議報告彙整

荷蘭 ECN 機構發佈 9 月 1GW 矽晶 PV 系統之運作，其對系統成本分析，提出增加模組效率由 18%至 20%可降低 BOS (balance of system) 11%，一般 BOS 佔安裝成本一半，該機構提出降低每 kWh 之歐元成本關鍵為降低模組成本及同時增加模組效率，如圖 3.3.1 所示，其利用新型整合型模組、設計來達成，即利用多重線(multiwire 或 smartwire ) 佈局取代匯排流(busbar)，此 MWT 元件至模組化成一薄片之示意圖，如圖 3.3.2 所示，利用導電膠在層化封裝(lamination)過程形成交互連結式薄片，此效果不但提升模組效率至~20%，且降低銀膠成本(銀含量由~20%，至<8%)及消耗量(銀膠體積降低>7%)。

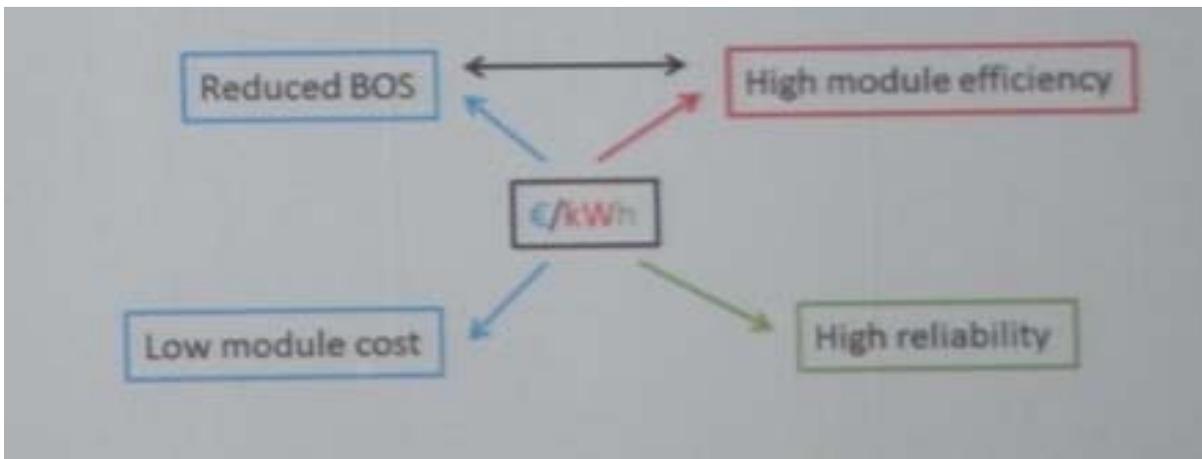


圖 3.3.1 降低每 kWh 之歐元成本策略圖。

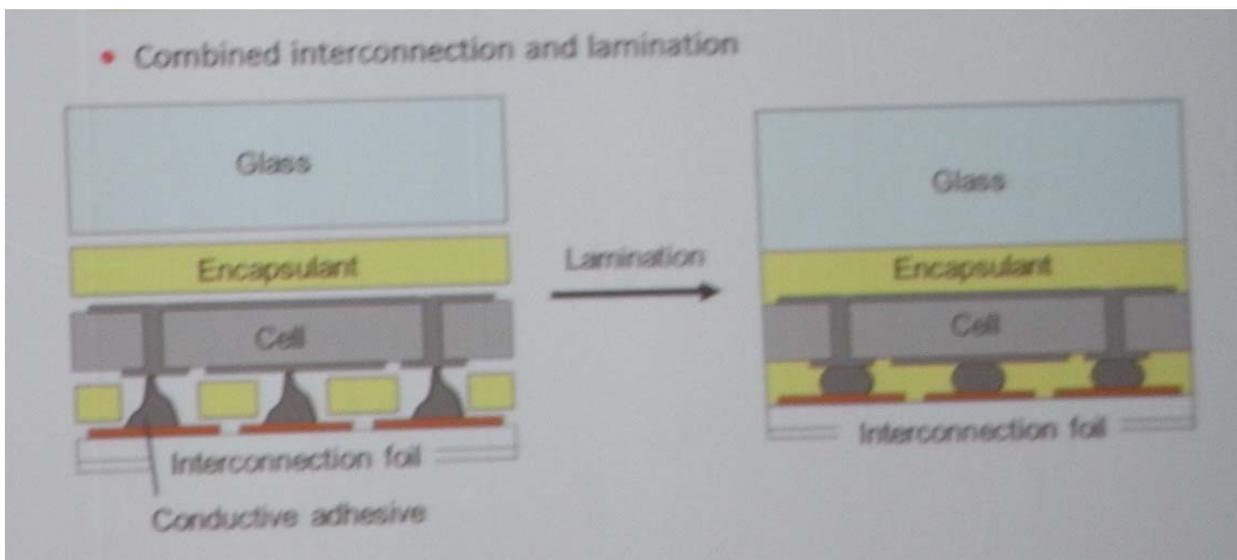


圖 3.3.2 MWT 元件至模組發展結構示意圖。

日本之National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) 及 NEDO 等機構，對於效率超過 40%之 III - V 族多接面太陽電池(於 Ge 晶上)，之製作方式提出異於傳統之新概念製程，傳統製程是利用磊晶成長作整合堆疊(稱 monolithic stacking)，而新概念為利用不昂貴軟性材料作機械性堆疊(mechanical stacking)，簡單過程如示意圖 3.3.3，該機構亦預測未來朝更高效率發展之結構及對應之製程方式(如圖 3.3.4 所示)，該機構針對未來發展提出一種新的機械性堆疊製程的概念，如圖 3.3.5 所示，其整合導電性奈米粒子排列於鍵結接合界面上，結果可使得電性上歐姆接觸 ( $<1 \Omega \text{ cm}^2$ )和光學上吸收耗損降低( $<2\%$ )，製程步驟為(1)利用塊材共聚高分子為溶液製程模板平台(template)形成金屬奈米粒子( $\sim 50\text{nm}$ )排列，如圖 3.3.6 所示，鍵結(凡得瓦爾力)接合二不同之電池。

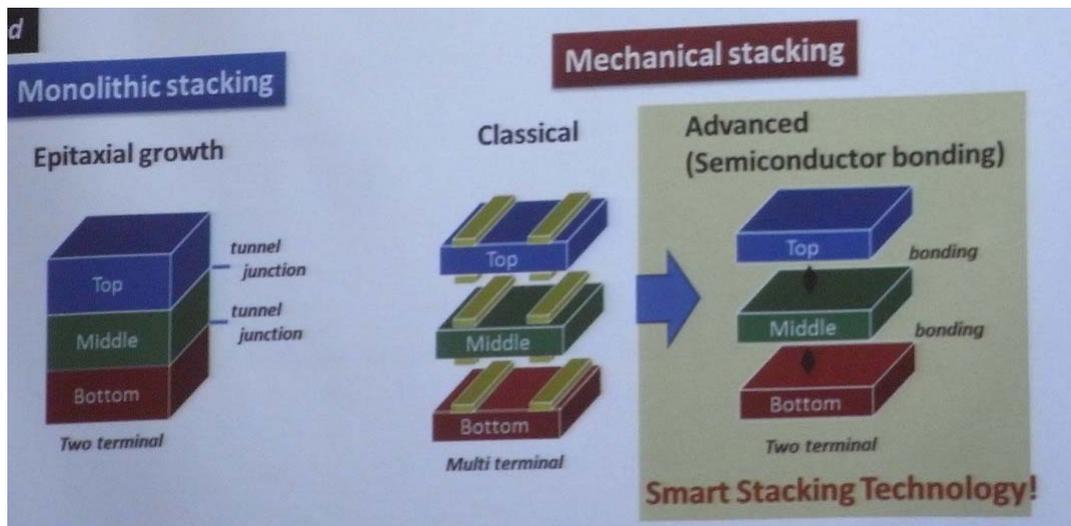


圖 3.3.3 機械堆疊元件示意圖及與傳統方式比較。

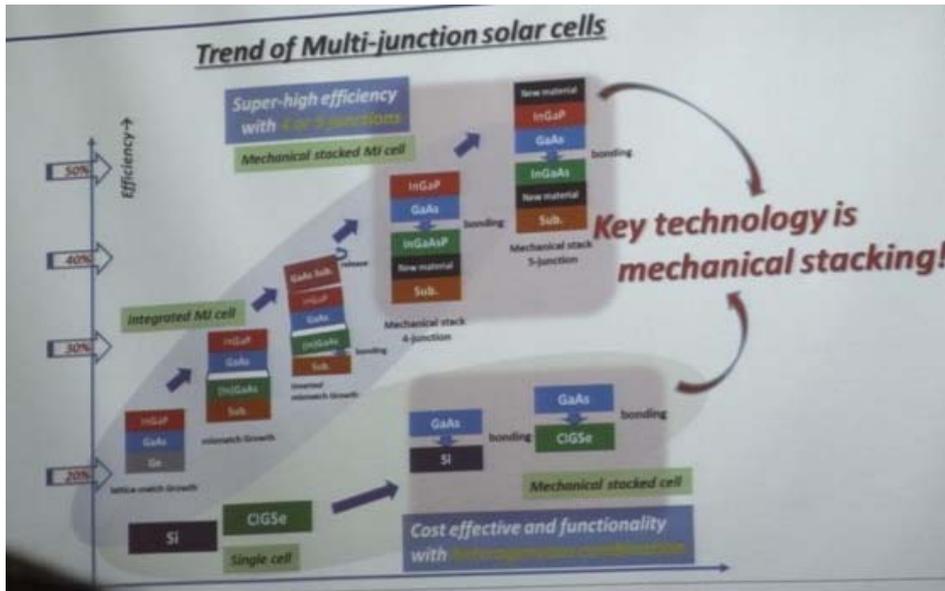


圖 3.3.4 效率發展與多接面元件設計之趨勢圖。

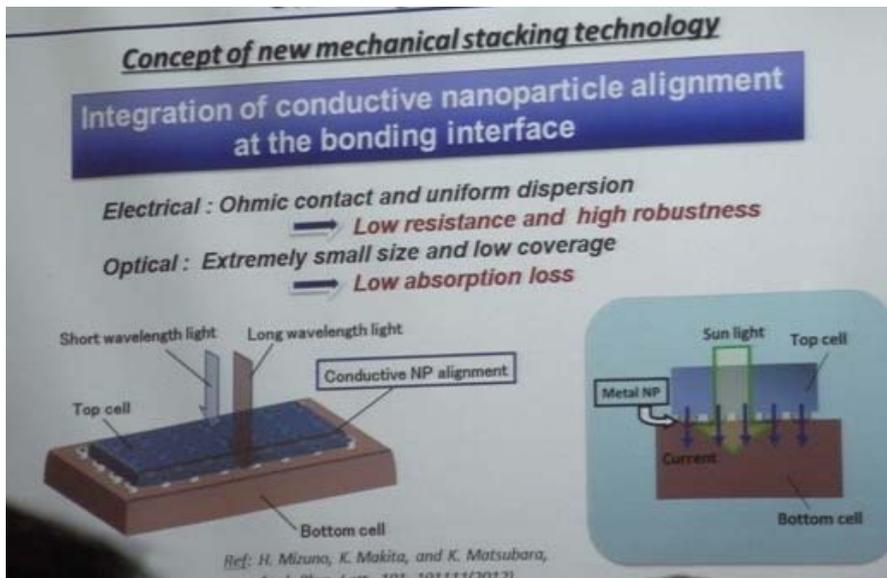


圖 3.3.5 導電性奈米粒子於接合界面之整合技術

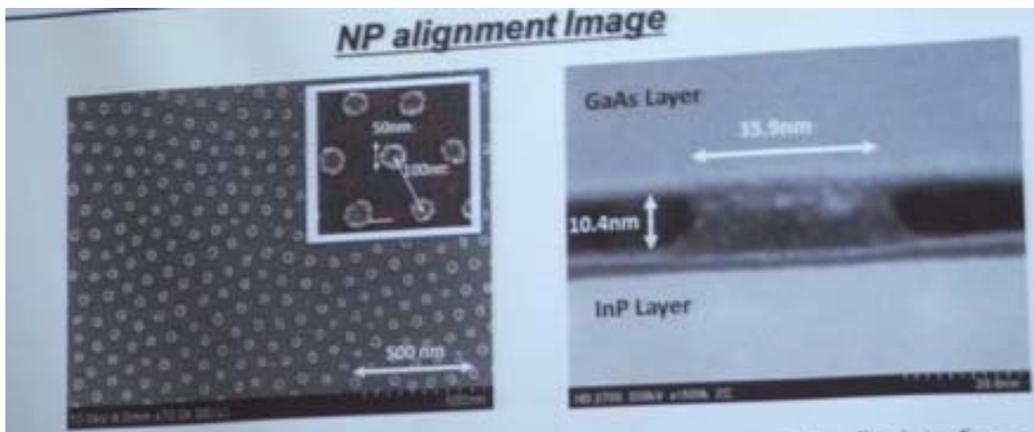


圖 3.3.6 導電性奈米粒子有序排列之照片

瑞士 ZSW 研究機構對於其 CIGS(CuClIn, Ga Se<sub>2</sub>)太陽電池提出從研究至量產的歷史進展，該機構從元件至模組製程定位在非真空及軟性基板走向，目前在量產方面已至在玻璃基板階段，其利用 KF-PDT (post deposition treatment)技術來增加效率，其 CIGS 太陽電池效率已刷新世界同型電池記錄為 21.7%(元件面積 = 0.5 cm<sup>2</sup>)。而另一家研究機構 Solibro 亦提出 CIGS 電池之刷新記錄，其元件效率 21%，該公司也利用共蒸鍍及 KF-PDT 技術，在歷史進展上，Solibro 機構走快些，如圖 3.3.7，該機構在 CIGS 量產也具世界冠軍之成就，模組效率 18.7%為世界紀錄，該公司規畫出量產模組之效率及未來 roadmap 如圖 3.3.8 所示。

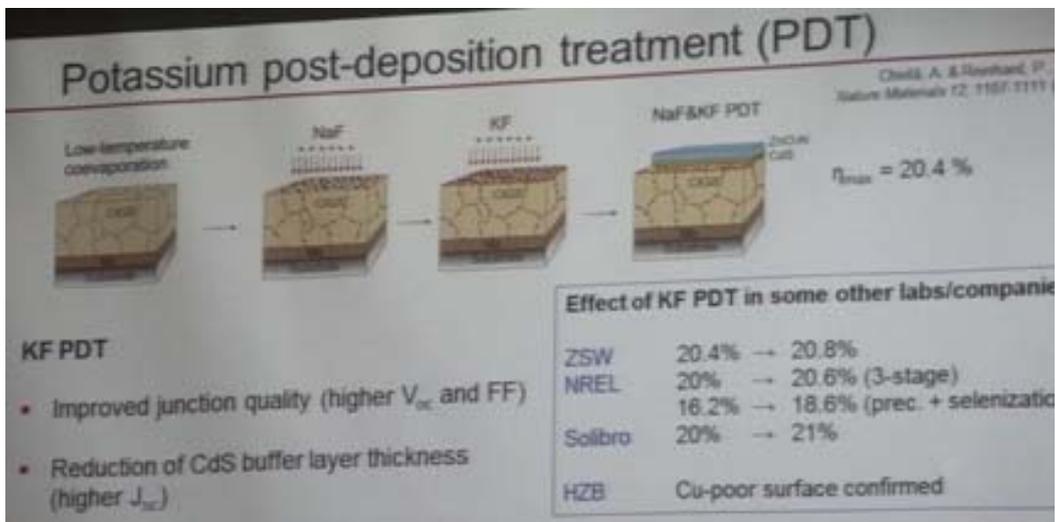


圖 3.3.7 PDT 技術流程圖與各實驗室之結果比較

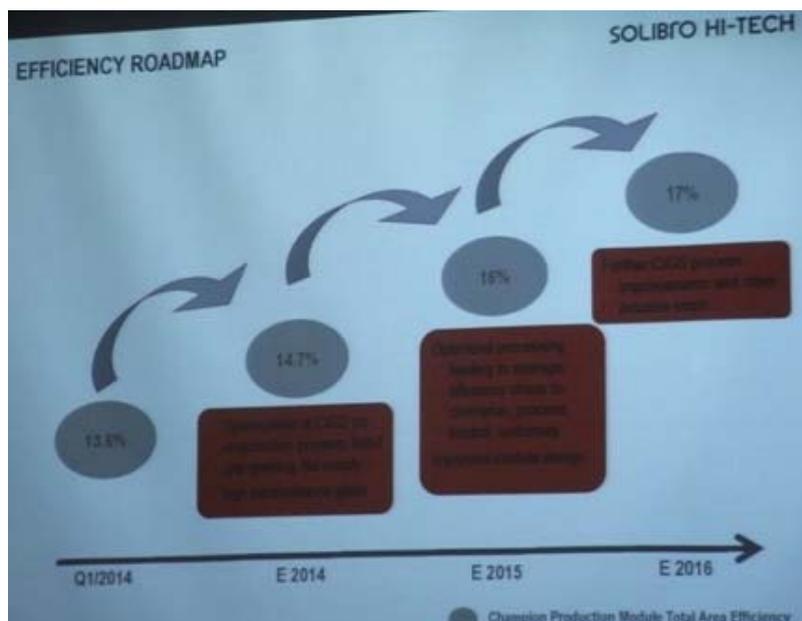


圖 3.3.8 Solibro 公司之模組效率發展時間表

在薄膜矽太陽電池方面，目前之技術走向為前表面奈米結構(front surface nanostructure)，如圖 3.3.9 利用週期性奈米結構置於前表面，是由於抗反射層(antireflection)為主要效應，而此類似結構亦可利用作為後表面結構(rear surface nanostructure)

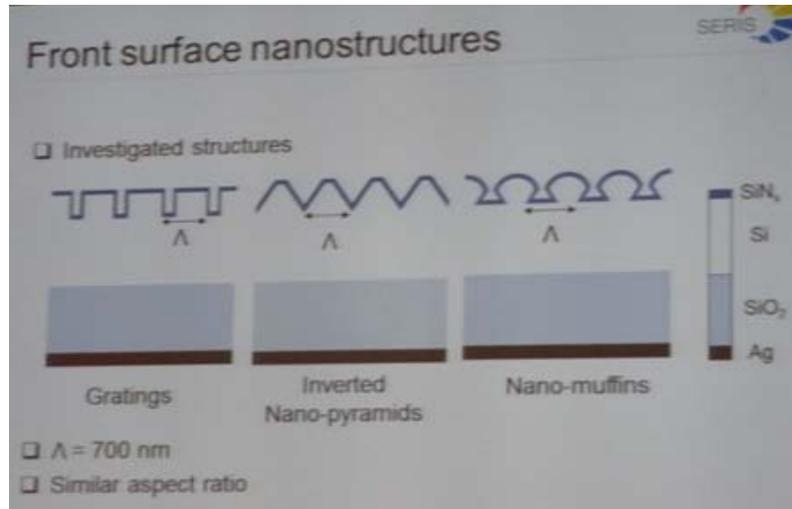


圖 3.3.9 薄膜矽太陽電池前表面之週期性奈米結構。

另一方面薄膜太陽電池在朝向下世代發展，會面臨機械應力之問題，薄膜矽太陽電池之巨觀與微觀裂縫(crack)必遭遇問題，許多研究聚焦於微裂縫偵測，但卻非在應力分析上，常用 Raman 譜計可量測出 Si 元件之應力，但當元件整合在模組上，此譜計就無法量測，許多公司與美國柏克萊實驗室發展出利用同步輻射 X 光次微米繞射技術臨場(In-situ)量測被封裝在模組內元件之應力分佈，如圖 3.3.10，該技術不但可以在機械負載及熱循環(thermal cycle)臨場量測，並且可以量測接合劑造成的效應，如圖 3.3.11 所示。

在大面積軟性基材 CZTS 太陽電池模組之印刷發展方面，奧地利 Crystalsot 公司發展出獨特技術可以作卷對卷(roll to roll; R2R)低成本量產技術，CZTS 從十年內至今效率不斷提升(朝 20%)，如圖 3.3.12 所示

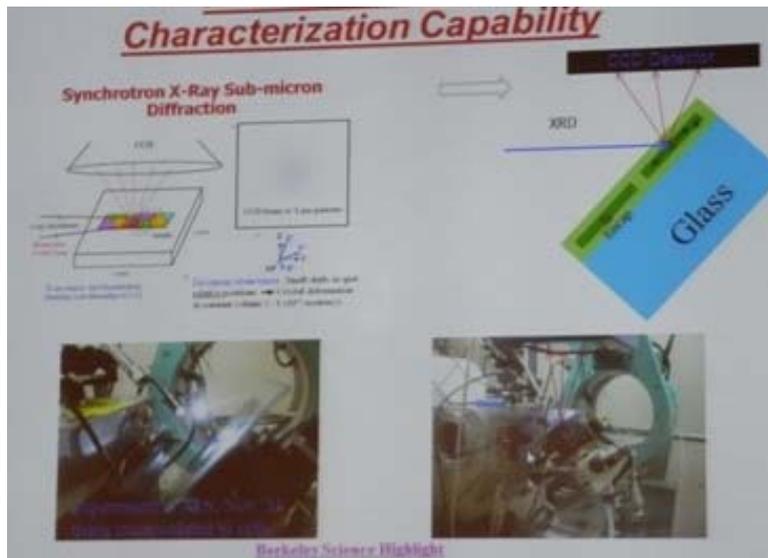


圖 3.3.10 同步輻射 X 光繞射技術臨場量測模組內元件之儀器及實驗組合圖。

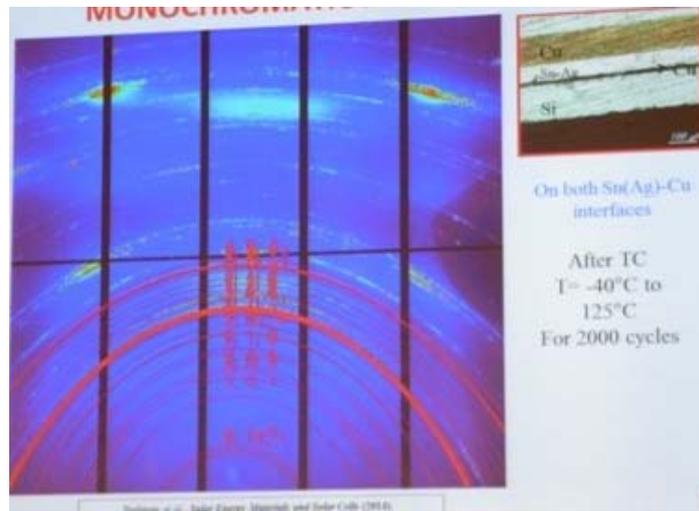


圖 3.3.11 同步輻射繞射技術臨場量測元件之二維應力分佈。

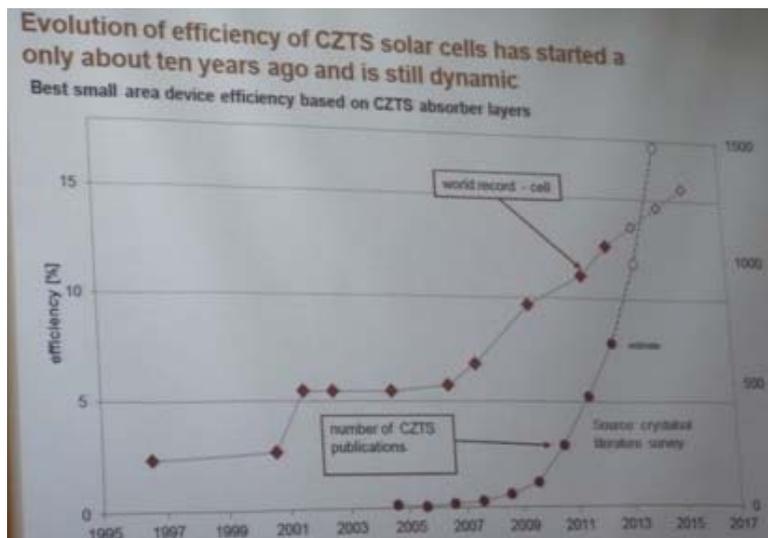


圖 3.3.12 CZTS 太陽電池效率演變歷程圖。

該公司之軟性光電膜製造技術是利用約  $40\ \mu\text{m}$  至  $60\ \mu\text{m}$  之半導體晶粒粉末排置於單層，其中利用高分子膜包覆作為固定，結構如圖 3.3.13 所示，此種結構易於大面積量產，整合並聯連接及封裝等，目前公司於元件之效率已達 8.4%，而模組效率已達 5.8%，大面積模組外觀如圖 3.3.14 所示，其初步完成之卷對卷量產線設計與照片如圖 3.3.15 所示，產能為  $4\text{m}/\text{min}$ ，(對 10% 模組效率，相當  $\sim 100\text{MW}$ )。元件封裝後之濕氣熱儲存下測試 ( $85^\circ\text{C}$ ，85% Rel. 下) 在 1,000 小時後，效率值降為原先 85%，如圖 3.3.16 所示。

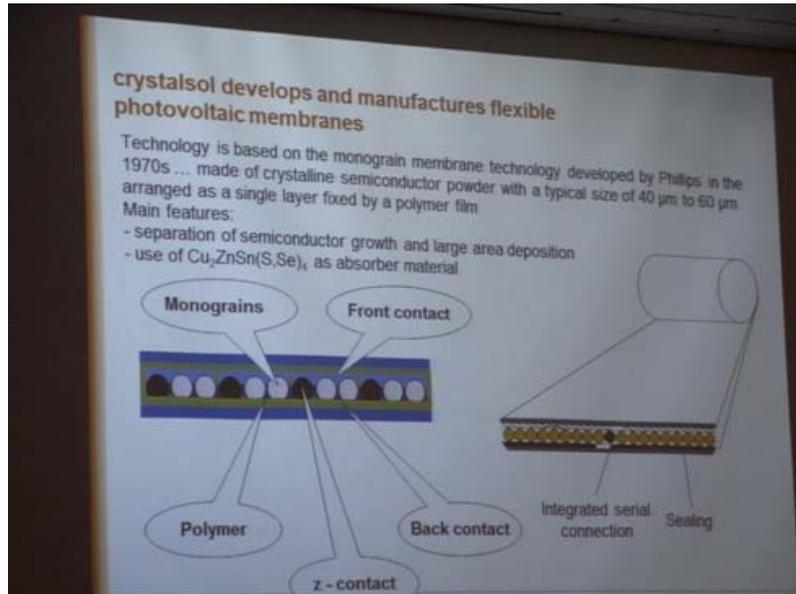


圖 3.3.13 高分子膜包覆單層 CZTS 半導體晶粒。



圖 3.3.14 奧地利 Crystalsot 公司軟性 CZTS 模組外觀。



圖 3.3.15 卷對卷量產線設計與照片。

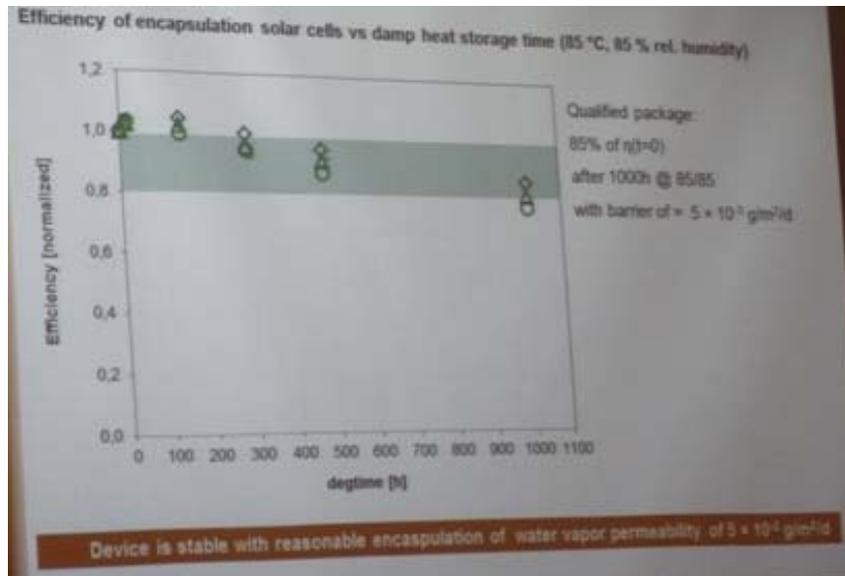


圖 3.3.16 濕氣熱儲存下測試(85°C，85% Rel.下) 元件效率隨時間變化。

在 III-V 族多接面太陽電池依其不同接面數量及其能隙，可設計出理論上效率接近 60%，如圖 3.3.17 所示，而多接面太陽電池目前仍普遍用於太空及高聚光太陽電池(HCPV) 範圍，至於後者之市場，最近之 HCPV 安裝地點在全球分佈如圖 3.3.18 所示。

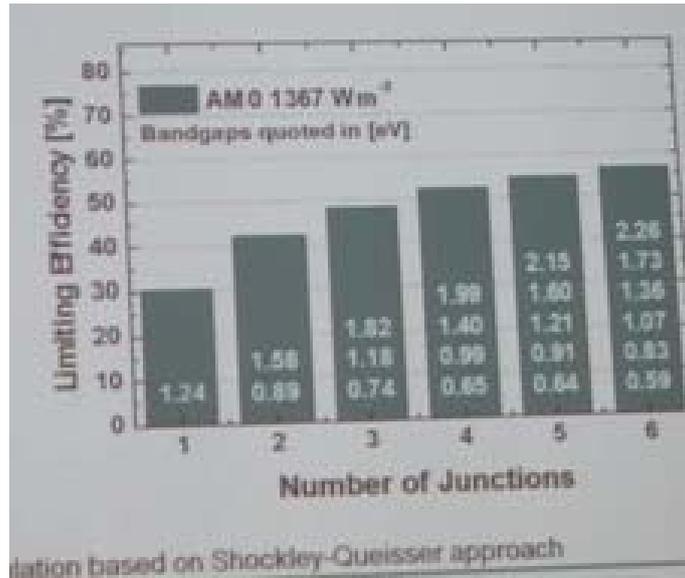


圖 3.3.17 III-V 族多接面太陽電池接面數量及能隙與效率設計之關係。

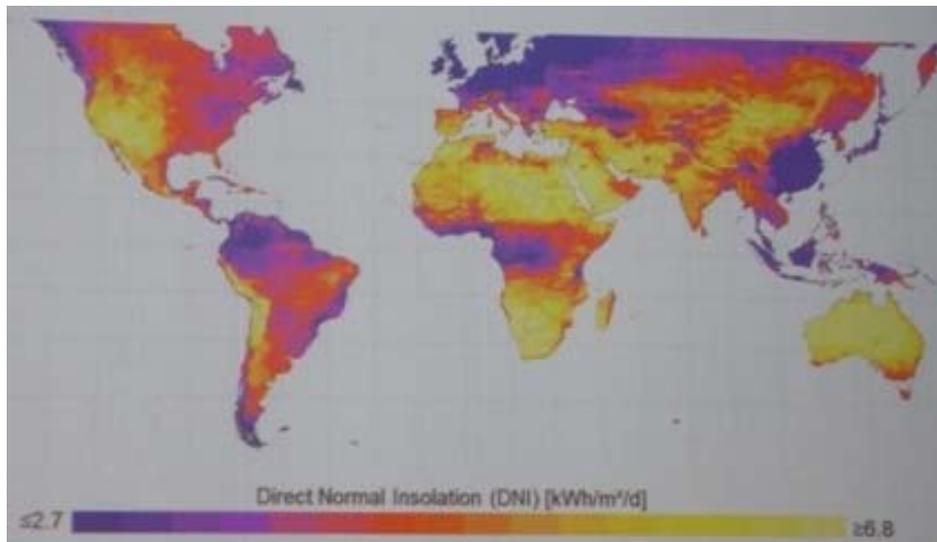


圖 3.3.18 高聚光太陽電池之市場(安裝地點在全球之分佈)。

### 3.4 國際發展現況及最新技術進展趨勢-高分子或有機太陽電池(簡稱 OPV 或 PSC)會議報告彙整

Solliance 跨國型計畫在 OPV program 方面為利用整合其現有之第一代型量產線(原為生產薄膜矽及 CIGS 薄膜太陽電池之建製產線)成為三者兼具之產線，日後可因需求或提高利用率變換不同型式太陽電池之量產，而其他 OPV 之技術細節(效率及壽命)及應用範圍則詳見前述。有一值得強調 Solliance 提出綠色生產過程，其 OPV 碳足跡分析如圖 3.4.1 所示，若效率為 6%，壽命為 10 年，則其碳足跡計算結果為 60g CO<sub>2</sub>/kWh，若效率為 10%，壽命為 20 年，則其碳足跡為 12g CO<sub>2</sub>/kWh，歐洲目前平均電力計算排碳量為 53g

CO<sub>2</sub>/kWh，在大面積化(up scaling)製程上，其薄膜均勻度可達 100~200 nm ±5%，使用不具毒性之溶劑，而其在機台製造上的選擇發展則使用(1)噴墨印刷(ink jet)、(2)狹縫塗佈(slot-die coating)方式、及(3)噴塗(spray)方式，主要考量為兼顧模組能夠客製化成各種圖案形狀及商用量產兩者，該計畫之目標是從下電極至上電極各層均為溶液製程，這些都與本所 OPV 計畫之方向一致，說明本所研發方向合乎國際未來趨勢，以片對片狹縫塗佈 (S2S slot-die)為例，其P3HT/PCBM全溶液製程之(1 cm<sup>2</sup>元件效率為 2.6%; 相當於其 ITO 參考元件效率的 93%)，其 1 cm<sup>2</sup>元件之最高效率可達 4.4%(全溶液製程) 如圖 3.4.2 所示。

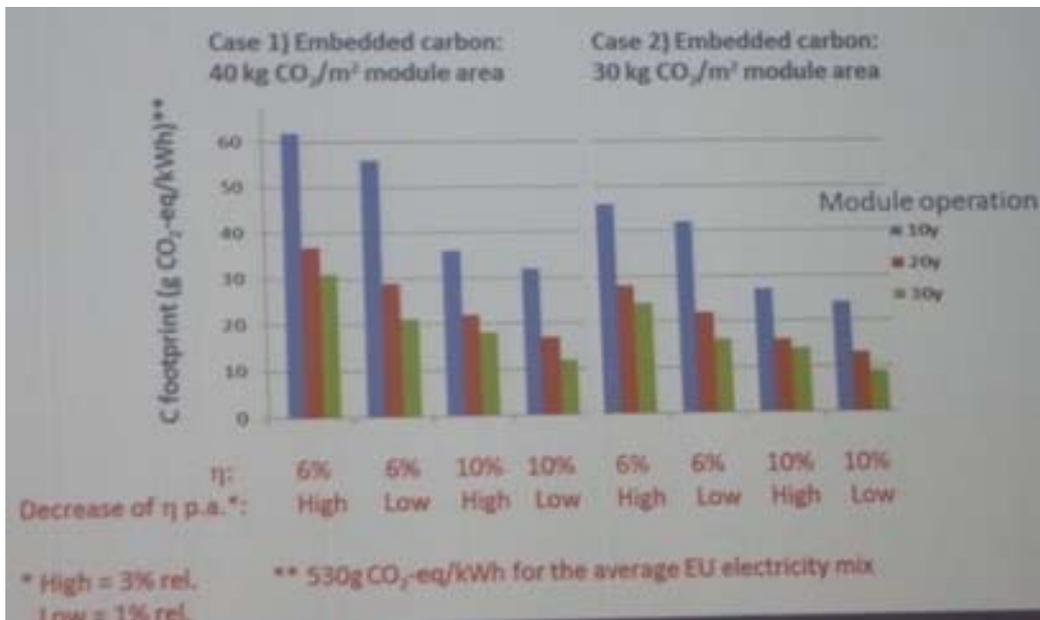


圖 3.4.1 OPV 製程碳足跡分析。

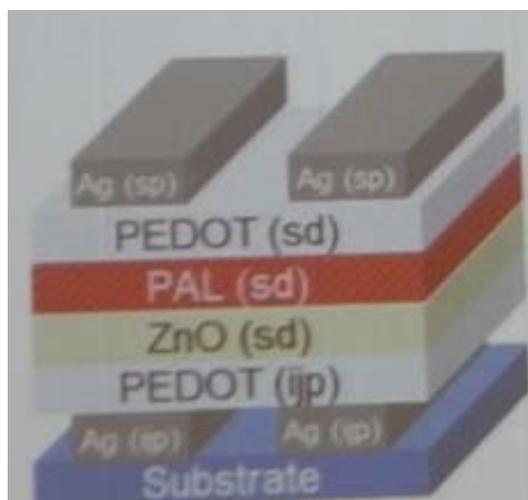


圖 3.4.2 全溶液製程之 OPV 結構。

Solliance 計畫在此次會議中花相當多的時間談論鈣鈦礦(perovskite)結構太陽電池，其被公認為未來世代太陽電池之星，兩年前鈣鈦礦結構太陽電池初步被提出之結構是以染料敏化(DSSC)電池結構作為基礎加以改進，稱為鈣鈦礦 meso-structured 太陽電池(MSSC)，但因其製程仍須高溫且繁複，近年最新趨勢為將其結構改為平面異質接合(planar heterojunction)，具有低溫及簡單可大量印製製程之優點，如圖 3.4.3 所示，從各種角度來看，此種新結構鈣鈦礦太陽電池可被稱為 OPV 之另一型式，ITO/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>2</sub>Cl/P3HT/Ag 平面接合結構為代表，其具有 10.8%效率，而今年 8 月美國 UCLA 大學材料系楊陽教授團隊發表於 Science 期刊等，最新效率可高達 19.3%，而鈣鈦礦太陽電池尚無法商業化的主要因素在於量產製程未成熟，及穩定度尚需大幅改進。該篇報告演講完畢後，聽眾向 Solliance 計畫之講員提出二個問題，即：(1)OPV 目前之壽命尚無法達到其他普遍化太陽電池之標準，該講員回覆，OPV 之結構及材料與目前商用 OLED 類似，這代表 OPV 之壽命具與商用 OLED 有同樣壽命之潛力，且目前測試數據也支持此點，壽命問題之克服指日可待；(2)是否考慮會修正由 OPV 轉向研發鈣鈦礦結構太陽電池，該講員回覆他們仍繼續主力放在 OPV 商業化量產發展，由於 OPV 與鈣鈦礦太陽電池結構與製程極相似，等鈣鈦礦太陽電池技術成熟至可以產業化時，可立即應用已建立之 OPV 技術及能量延伸至鈣鈦礦太陽電池，資源及時間不會浪費。

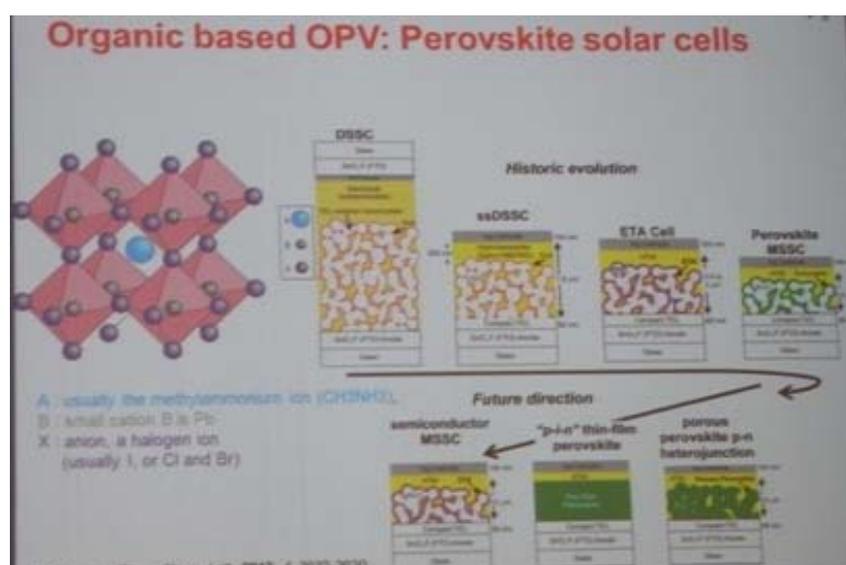


圖 3.4.3 鈣鈦礦 meso-structured 太陽電池結構演化進展為平面異質接合結構。

義大利羅馬大學在鈣鈦礦太陽電池有相當不錯成就，其發展反式中介孔隙結構鈣鈦礦太陽電池(MSSC)，如圖 3.4.4 所示，其使用之電洞傳輸層(HTM)為 SPIRO-OMeTAD，該材料為同等重量黃金的十倍價格，該大學使用極便宜之高分子 P3HT 取代之，並且效率還是可以從取代前之效率 8.6% ( $0.1\text{cm}^2$  小面積元件)提升為 9.3%，該大學開發從小面積發展至大面積模組之技術，如圖 3.4.5 所示，其第一代模組(面積為  $16.8\text{cm}^2$ ；如圖 3.4.6 所示)，效率為 5.1%，該團隊製作模組時利用雷射圖案化(Laser patterning)程序，如圖 3.4.7 所示，使用之雷射有 2 種，一為  $\text{CO}_2$  氣體雷射( $\lambda=10\text{nm}$ )，另一為 Nd- $\text{YNO}_4$  雷射( $\lambda=54\text{nm}$ )，結果顯示在鈣鈦礦層被  $\text{CO}_2$  雷射切割圖案化下，以化學蝕刻其上層之 P3HT 作為圖案化所得之模組效率為 5.3%，而換成  $\text{CO}_2$  雷射的圖案化上層之 P3HT 層則效率會提升為 6.7%；當鈣鈦礦及 P3HT 兩層均採用 Nd- $\text{YNO}_4$  雷射切割時，模組效率則會提升為 8.2%；模組如圖 3.4.8 所示，對於以 Spiro-OMeTAD 為 HTL 層結構，若鈣鈦礦層之製程從皆用之單一步驟(one step)改成採用雙步驟(two step)，則模組效率( $10.10\text{cm}^2$ )將從 7.7%提升為 13%，如圖 3.4.9 所示。

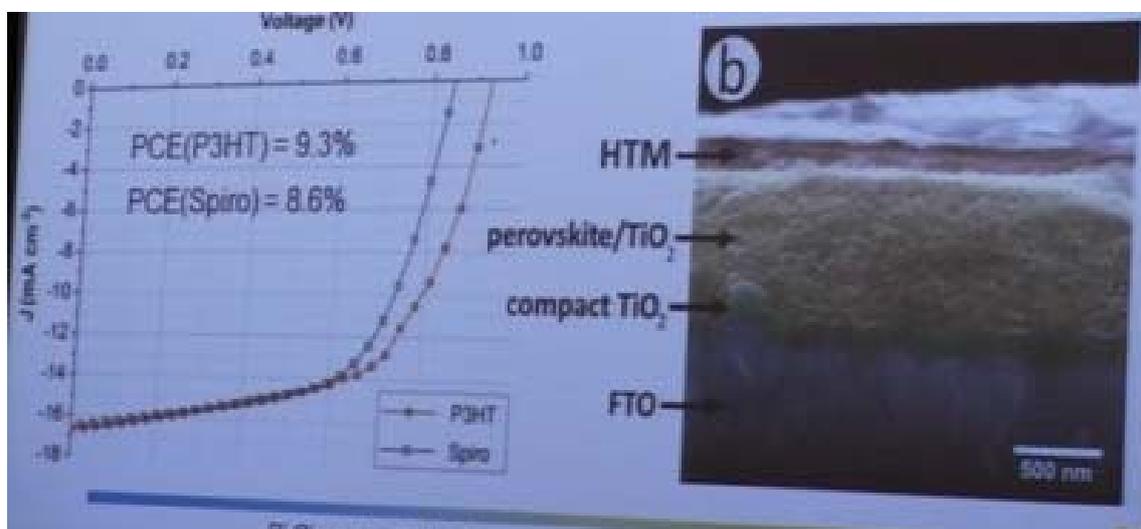


圖 3.4.4 反式中介孔隙結構鈣鈦礦太陽電池剖視圖。



圖 3.4.5 從小面積元件發展至大面積模組之製程技術。



圖 3.4.6 第一代模組照片。

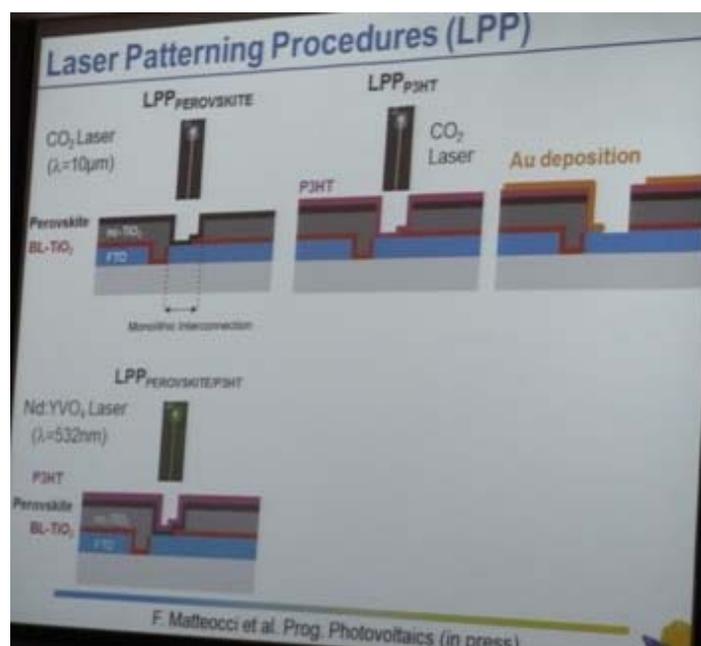


圖 3.4.7 鈣鈦礦太陽電池雷射圖案化製程程序。

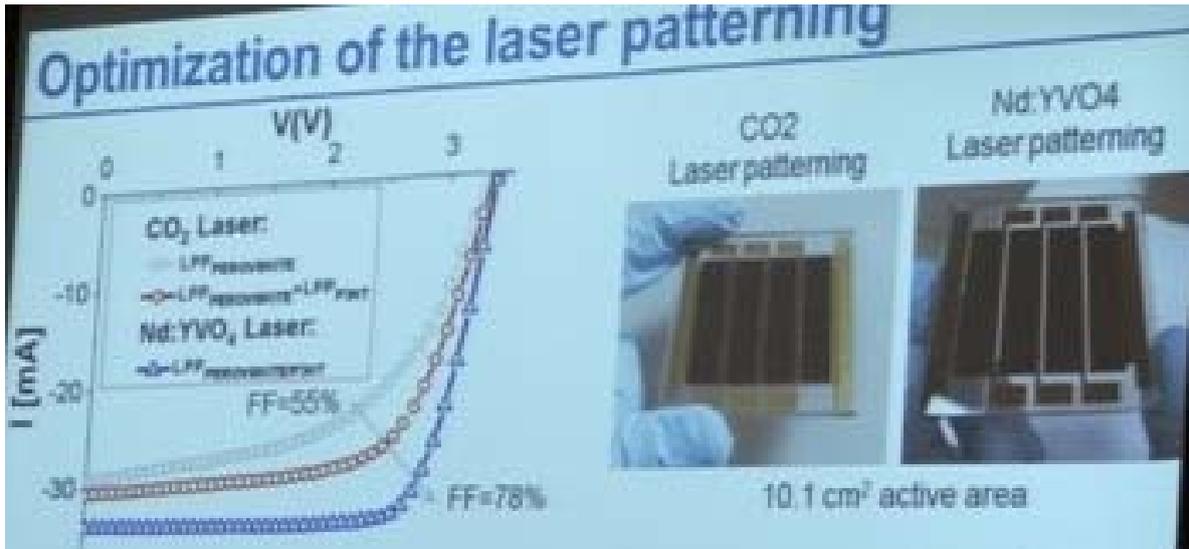


圖 3.4.8 不同之雷射切割圖案化後鈣鈦礦太陽電池模組。

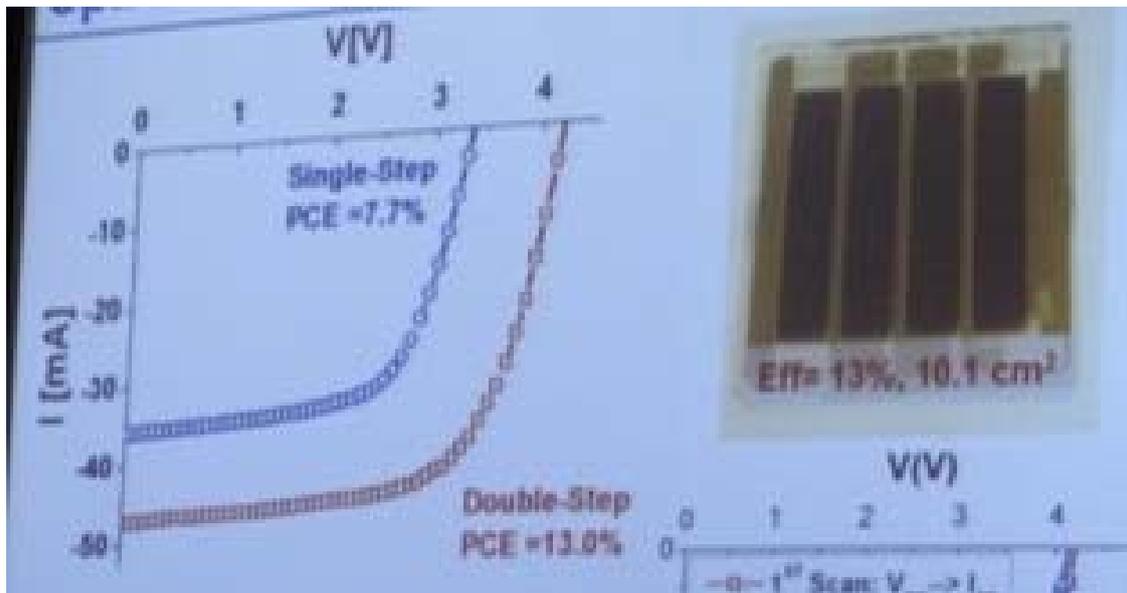


圖 3.4.9 不同鈣鈦礦層製程之模組效率 I-V 量測曲線及模組照片。

在鈣鈦礦太陽電池模組穩定度方面，模組在用第二層玻璃及熱熔塑膠夾層封裝處理，在太陽光模擬器 0.8 Sun 及 65°C 連續照射下，對於利用單一步驟合成之鈣鈦礦層太陽電池模組，其在夾層封裝前之效率為 7.7%，封裝後則降至 5%，但在連續照光 1,200 小時後，其效率仍可維持極高之穩定，幾乎沒有變化而維持在 5% 左右，如圖 3.4.10 所示。對於利用雙步驟合成之鈣鈦礦層，其模組效率夾層封裝前為 13%，夾層化後其效率則降為 10%，但一旦照光後又立即降至 5% 左右，之後則維持穩定不變(至 800 小時，如圖 3.4.11

所示),如此劇烈惡化之原因可能是雙步驟合成中  $\text{PbI}_2$ (第一步驟所形成)之不完全轉化成鈣鈦礦結構所致。其使用刮刀塗佈(blade coating)方式印製鈣鈦礦太陽電池,使用之機台如圖 3.4.12 所示,在大面積元件時,兩者所得之效率值主要分佈在 10~13%,如圖 3.4.13 所示,當被大面積化成  $100 \text{ cm}^2$  之模組時,如圖 3.4.14 所示,其電流-電壓特性曲線從  $10 \text{ cm}^2$  至  $100 \text{ cm}^2$  模組面積時,逐漸轉成 S 型,模組效率則是由 10.3% ( $10 \text{ cm}^2$ ) 降至 4.3% ( $100 \text{ cm}^2$ )。該團隊解釋效率降低和 S 型特性曲線是由於鈣鈦礦太陽電池層厚度分佈不均,可採用雷射光檢測儀進一步作非破壞性雷射光電流 2D 檢測模組平面(如圖 3.4.15),以優化塗佈平整度技術,該團隊亦展示出第一個軟性的中介結構鈣鈦礦太陽電池,其模組面積  $10 \text{ cm}^2$  時,效率可達 3.1%,如圖 3.4.16 所示,其模組截面結構如圖 3.4.17 所示,對應下,該團隊之玻璃基板模組( $10 \text{ cm}^2$ )之效率 13%,為目前新的國際紀錄(相同條件下),此點顯示對於軟性基材鈣鈦礦太陽電池,模組之效率提升仍屬一個挑戰及障礙,會議中對於小分子 OPV 之電子( $\text{TiO}_2$ )或電子( $\text{MoO}_3$ )傳輸層間交界面之激子分離效應的量測探討有充分資料發表,如圖 3.4.18,利用 Kelvin probe 探討奈米表面分析電荷分佈。

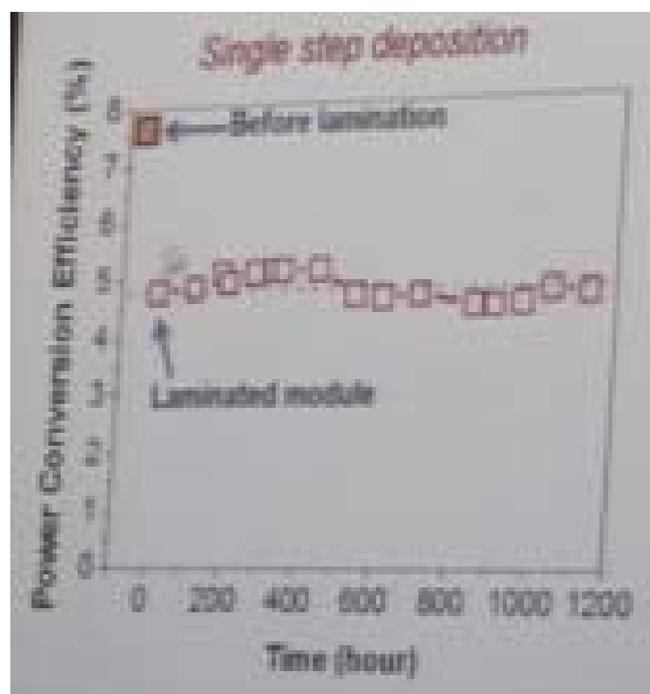


圖 3.4.10 單一步驟合成之鈣鈦礦層太陽電池模組,陽光模擬器 0.8 Sun 及  $65^\circ\text{C}$  連續照射下之穩定度測試。

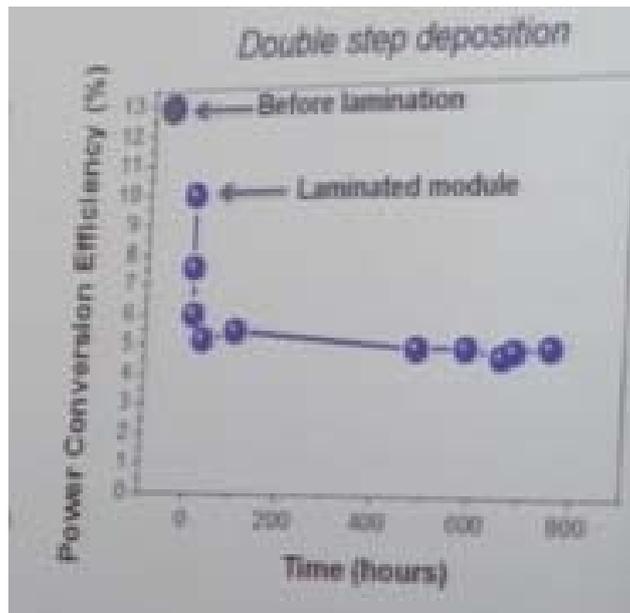


圖 3.4.11 雙步驟合成之鈣鈦礦層太陽電池模組 0.8 Sun 及 65°C 連續照射下之穩定度測試。



圖 3.4.12 刮刀塗佈印製鈣鈦礦太陽電池之機台。

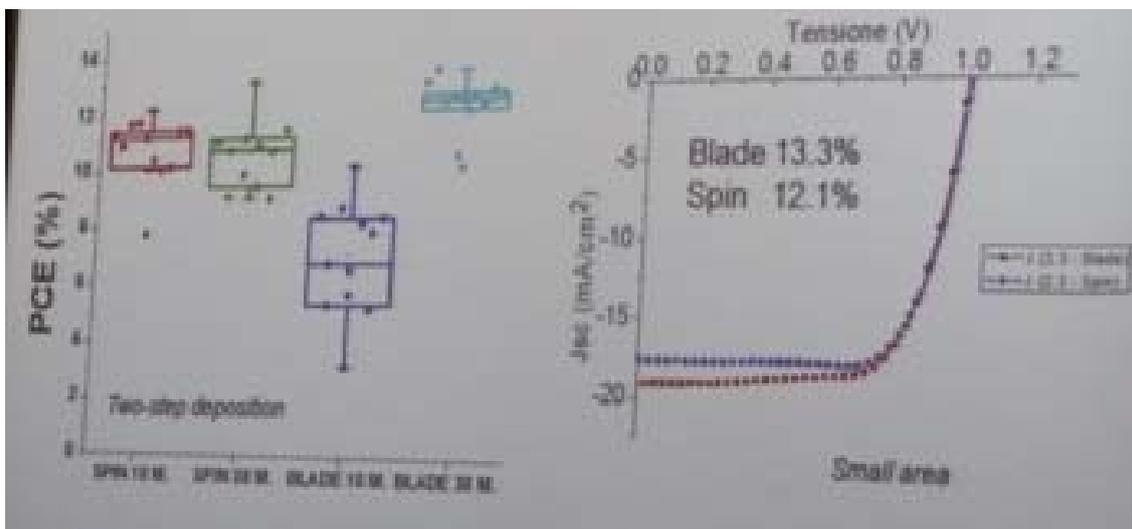


圖 3.4.13 兩種製程所得大面積元件之效率值主要分佈在 10~13%。

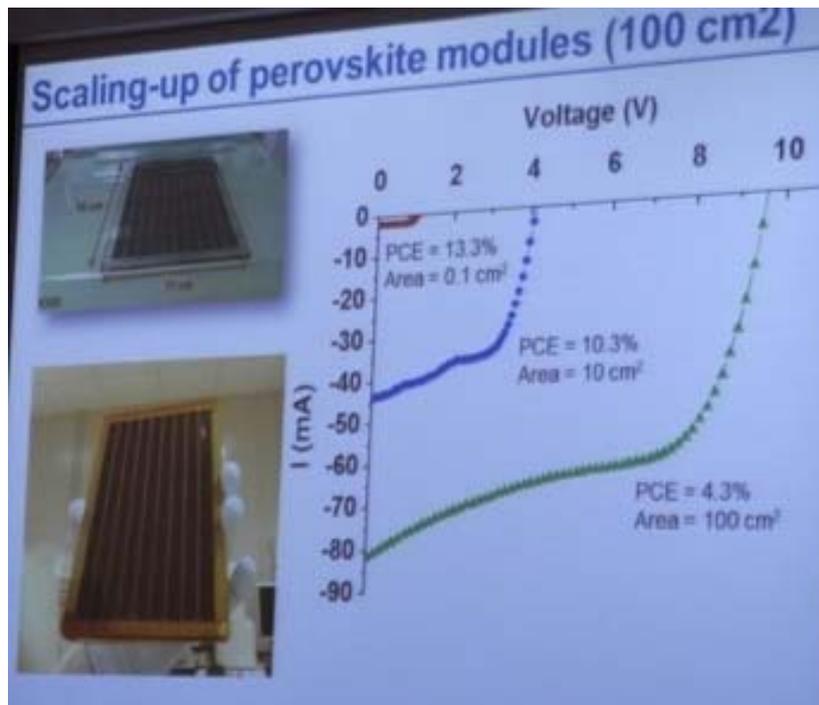


圖 3.4.14 不同模組面積(從 10 cm<sup>2</sup>至 100 cm<sup>2</sup>)之電流-電壓特性曲線。

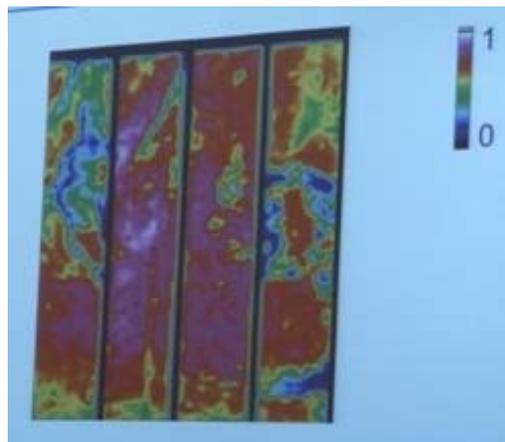


圖 3.4.15 模組之非破壞性雷射光電流 2D 檢測。



圖 3.4.16 軟性的中介結構鈣鈦礦太陽電池。

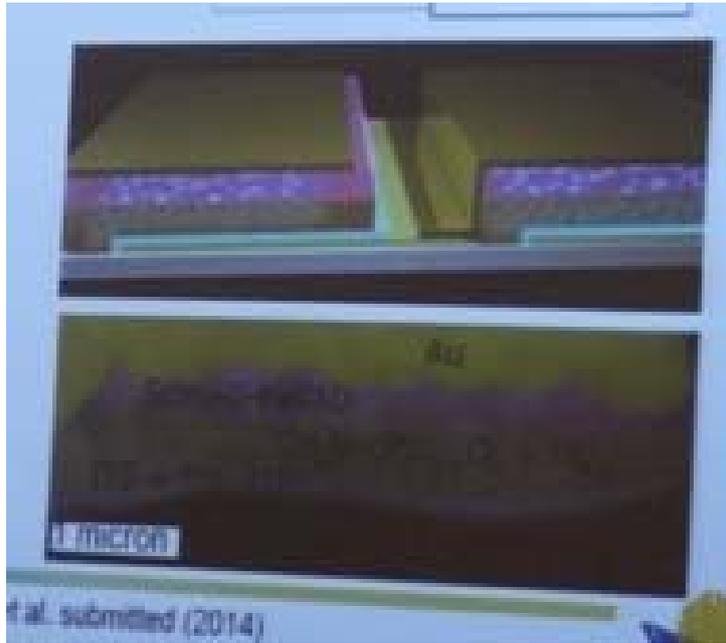


圖 3.4.17 模組截面結構。

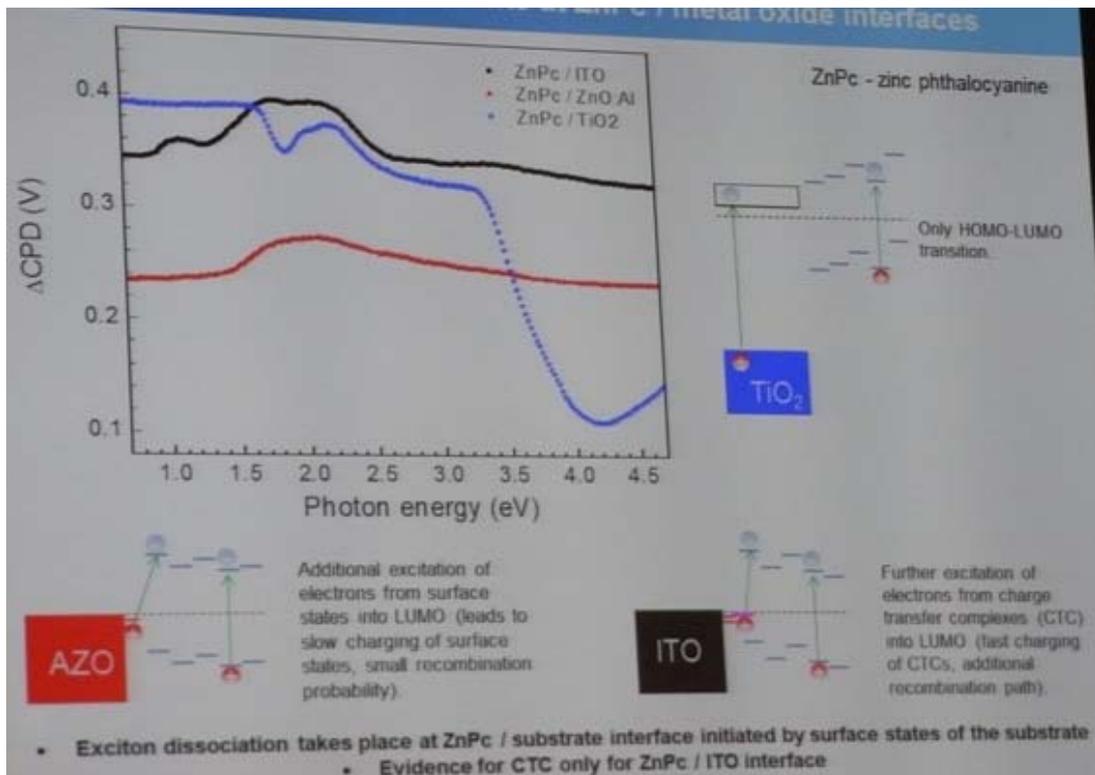


圖 3.4.18 Kelvin probe 探討傳輸層間交界面電荷分佈。

本次會議中在改進 OPV 結構設計以提升入射光的補捉(light harvesting)方面有新的進展發表，Betancur 等提行對透光性 OPV 之另一邊加入 MoO<sub>3</sub> 及 LiF 等層作為反射層作用可增加某些波長之吸收量子效率，如圖 3.4.19(發表於 2013 Nature photonics)，而 Pastorelli 等利用相似概念於另一邊加入類似層形成腔體效應以增加更多波長之量子轉換效率。這些改進

設計均是入射光與反射光在垂直於 OPV 元件為基礎下，如圖 3.4.20 所示，圖中利用此種光學控制設計可提升原先效率 17% 以上。

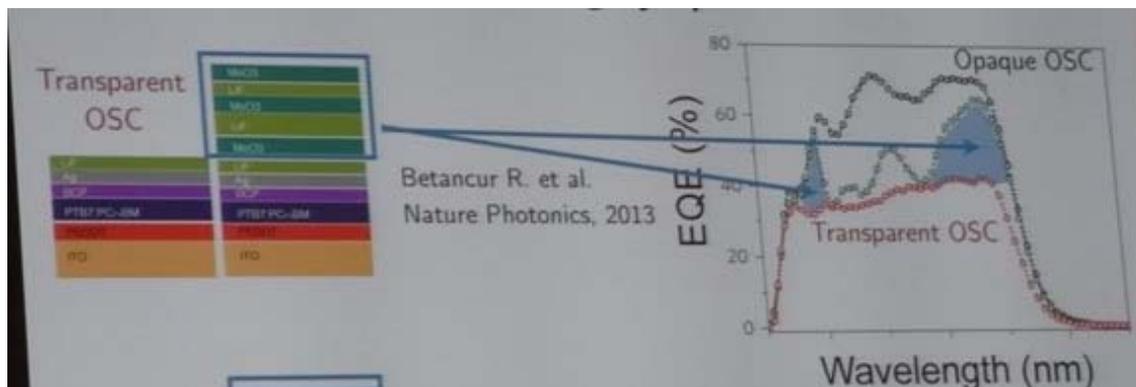


圖 3.4.19 加入  $\text{MoO}_3$  及  $\text{LiF}$  等層作為反射層作用可增加某些波長之吸收量子效率。

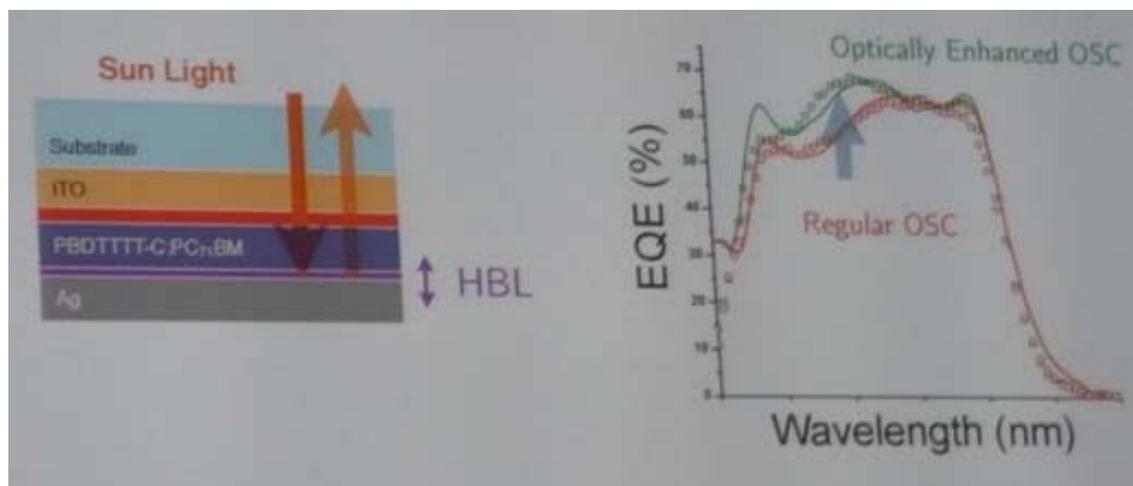


圖 3.4.20 一般 OPV 光學結構設計(光的補捉)。

本次會議對光學控制之設計提出新的概念，即入射光平行於 OPV 膜方向進入主動層，如此可增加光在主動層內的路徑行程(不需利用反射光方式)，而其能保持低激子再結合率及高電荷載子傳遞率(其傳遞方向與入射光垂直)，如圖 3.4.21 所示，而入射光引導進入的工作方式可利用光纖方式執行，如該圖所示，進而利用多根光纖排列成一單層陣列於 OPV 上方，可製造入射光以  $55^\circ$  角進入 OPV 內部，如圖 3.4.22 所示，此種方式可使得許多波長的吸收量子效率增加，如圖 3.4.23 所示，不同直徑的光纖所構成陣列造成的短路電流提升程度亦不同，如圖 3.4.24 所示， $2\ \mu\text{m}$  直徑光纖可提升電流近原先的 30%，而光纖陣列如果作光纖間距的調整，亦發現不需緊密排列，反而疏散排列會有較好的結果，如圖 3.4.25 所示。

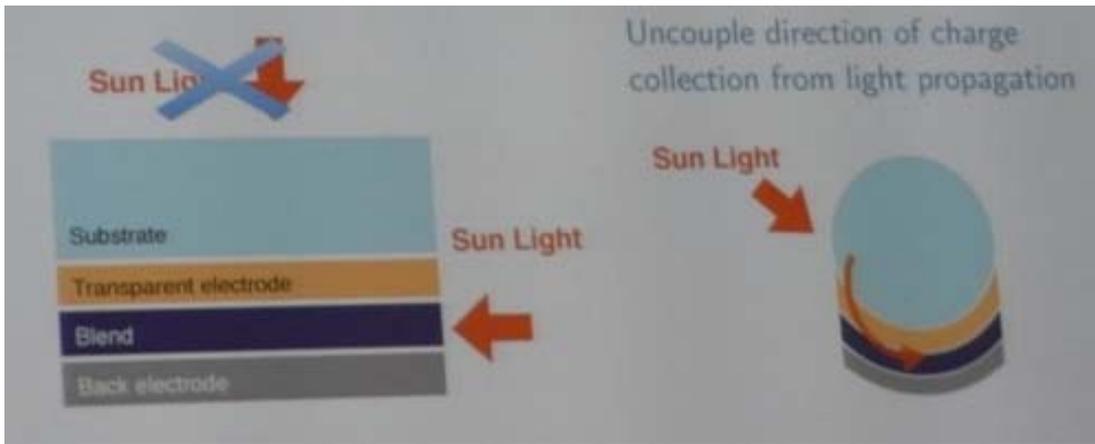


圖 3.4.21 光學控制之新的概念設計。

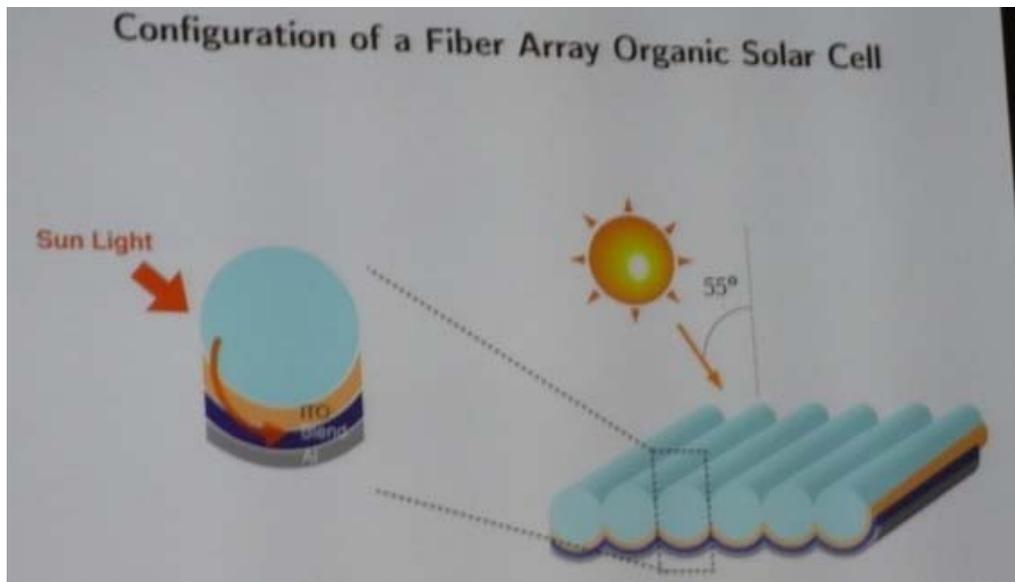


圖 3.4.22 單層陣列光纖排列於 OPV 上方之光學控制。

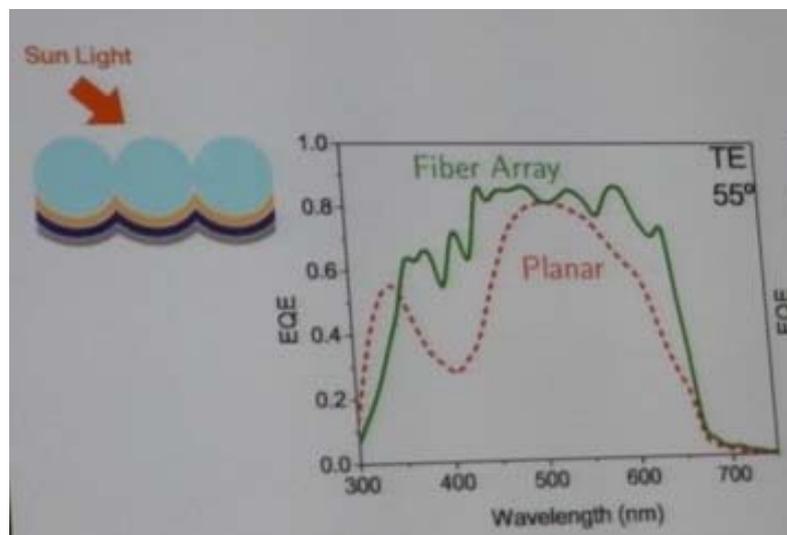


圖 3.4.23 具單層陣列光纖排列之 OPV 結構的量子轉換效率與平面式 OPV 之比較。

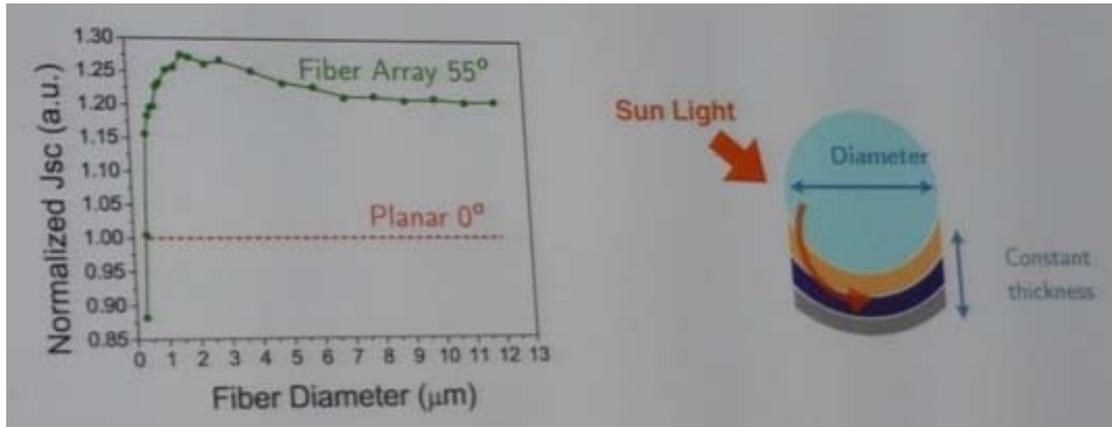


圖 3.4.24 不同直徑的光纖所構成陣列造成的短路電流變化。

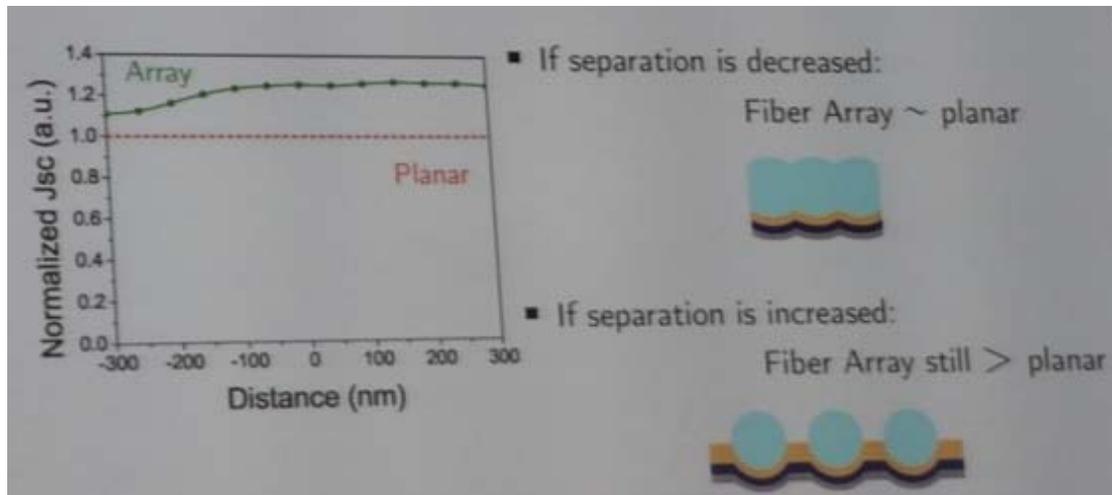


圖 3.4.25 由於光纖間距的調整造成的短路電流變化。

德國 Fraunhofer 研究機關研發一種不含 ITO (LTO-free) 之 OPV，其結構堆疊如圖 3.4.26 所示，其利用金屬網線(metal grid)佈局結合毫米級之 PEDOT:PSS (兼電洞傳輸層) 作為 ITO 之取代，在(1)上層與下層均為玻璃，(2)上層與下層為玻璃與軟性封裝材質，(3)上層與下層為玻璃與壓力敏感膠膜(PSA)封裝材料等三種形式之封裝下，在標準照度  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ， $50^\circ\text{C}$  之空氣中作長期連續照光穩定度測試，但光源為硫電漿燈(其含極少量 UV 光)，圖 3.4.27 顯示初始效率( $\sim 2.7\%$ )在連續照光 12000 小時後，效率劣化低於兩成以內，此連續照光之光劑量約相當於中歐地區戶外曝露 12 年。

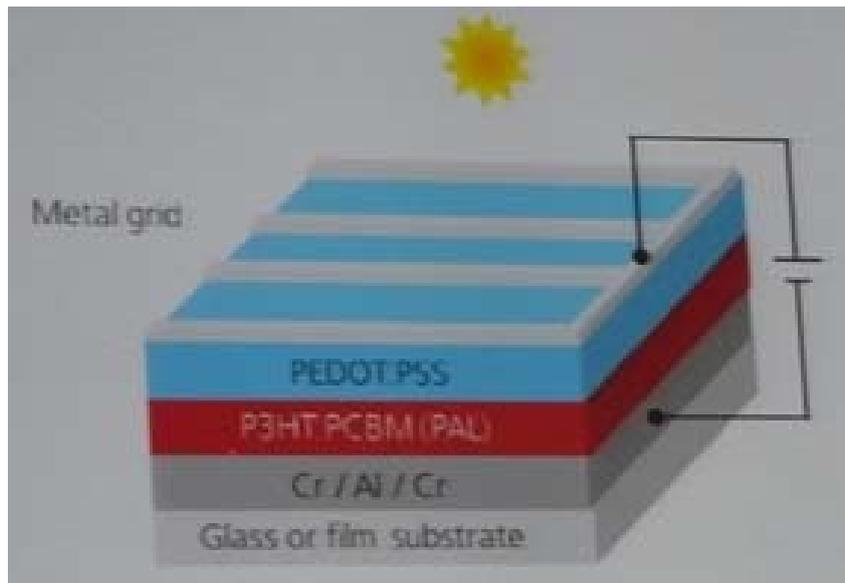


圖 3.4.26 金屬網線佈局作為 ITO 取代之 OPV 結構。

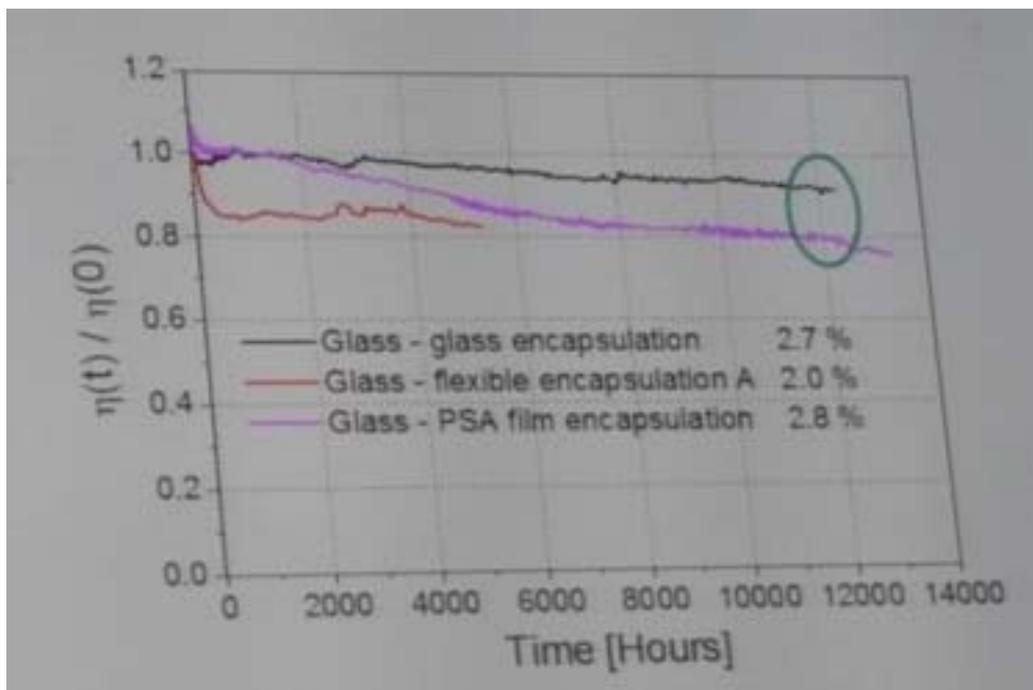


圖 3.4.27 三種封裝形式下長期連續照光穩定度測試（標準照度  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ， $50^\circ\text{C}$  之空氣中）。

接著展開含有 UV 光成份的照光測試，該機構使用 UV 光接近 AM1.5G(金屬鹵素燈光譜)之測試，發現效率降低極快，如圖 3.4.28 所示，在 2000 小時後效率掉至原先值的 40%，主要是短路電流降低所致，其次為填充因子所致，如果使用 UV 濾片，則效率就不受影響，兩種測試對比得到 UV 光的連續照射是加速 OPV 劣化的主因。

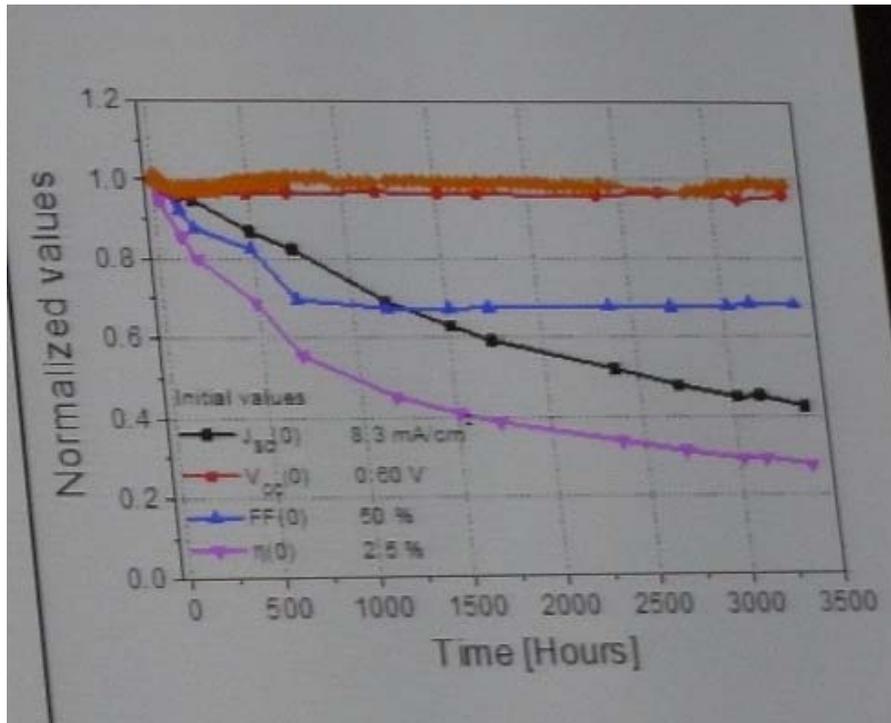


圖 3.4.28 長期連續照光穩定度測試（含有 UV 光之標準照度 AM1.5G, 50°C 之空氣中）。

Fraunhofer 機構利用封裝過之 PEPOT:PSS 裝置，另一為 PEPOT:PSS 裝置但多一光主動層在 PEPOT:PSS 底下，如圖 3.4.29 所示，隨著 UV 光的照射(UV stress)下兩種裝置之片電阻 (sheet resistance) 急劇劣化，在 500 小時後有一級數以上變化，單獨存在之 PEPOT:PSS 層其吸收之光子數目比有主動層存在時多了 40%。該機構亦同步使用模擬方式一致證明 PEPOT:PSS 層之導電度下降是 UV 光下的劣化主要原因。

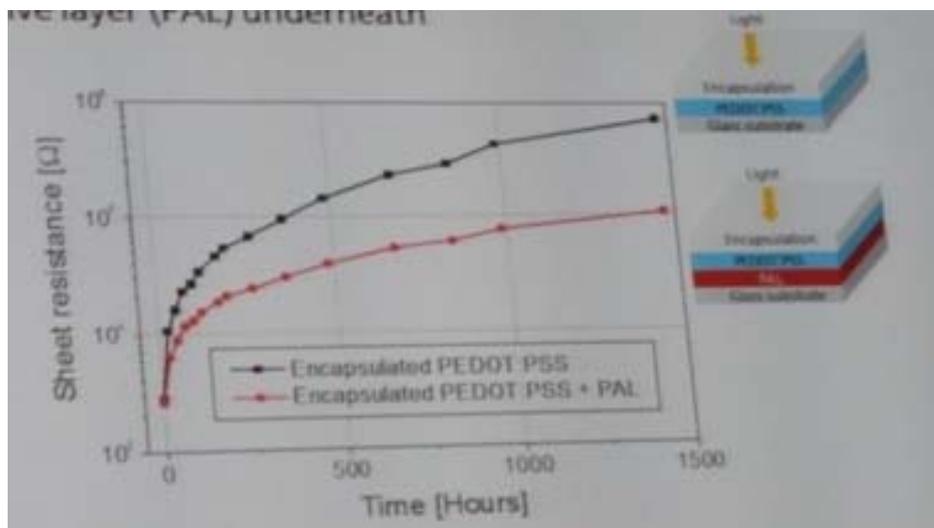


圖 3.4.29 UV 光的照射(UV stress)下兩種裝置之片電阻急劇劣化。

在熱穩定性測試方面(thermal stress)，測試在 85°C，幽暗及一般空氣儲存環境下進行，發現 10000 小時後其效率可維持不變，如圖 3.4.30 所示，證明熱對 OPV 劣化不是問題，於是更進一步進行濕熱測試(damp heat stress)，在 85°C，85%相對濕度及幽暗環境下進行測試，結果軟性元件在 1000 小時，仍維持原先效率的 95%，如圖 3.4.31 所示，此結果成功符合了 IEC61646 法規測試標準。Fraunhofer 機構是德國太陽電池的主力研究機構，其亦協助該國之國家實驗室進行 PV 的研究，以上研究之總結為 OPV 具有潛力穩定性，在熱環境及連續照射光下可達相當於數年的壽命，而 PEPOT:PSS 之 UV 光劣化為主宰 OPV 穩定性機制的主因。

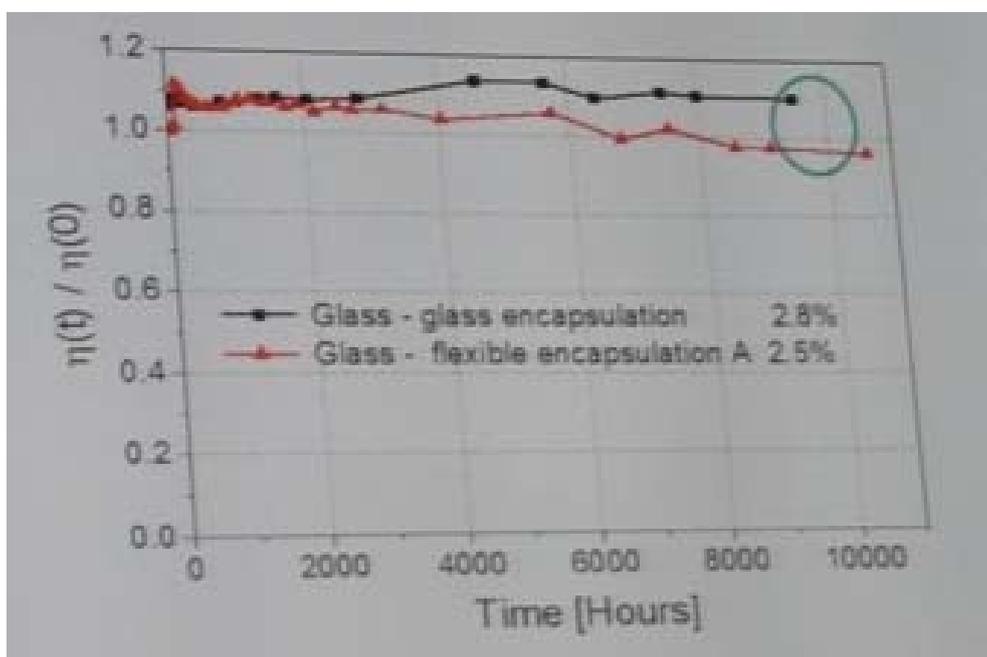


圖 3.4.30 熱穩定性測試(85°C，幽暗及一般空氣儲存環境下進行)。

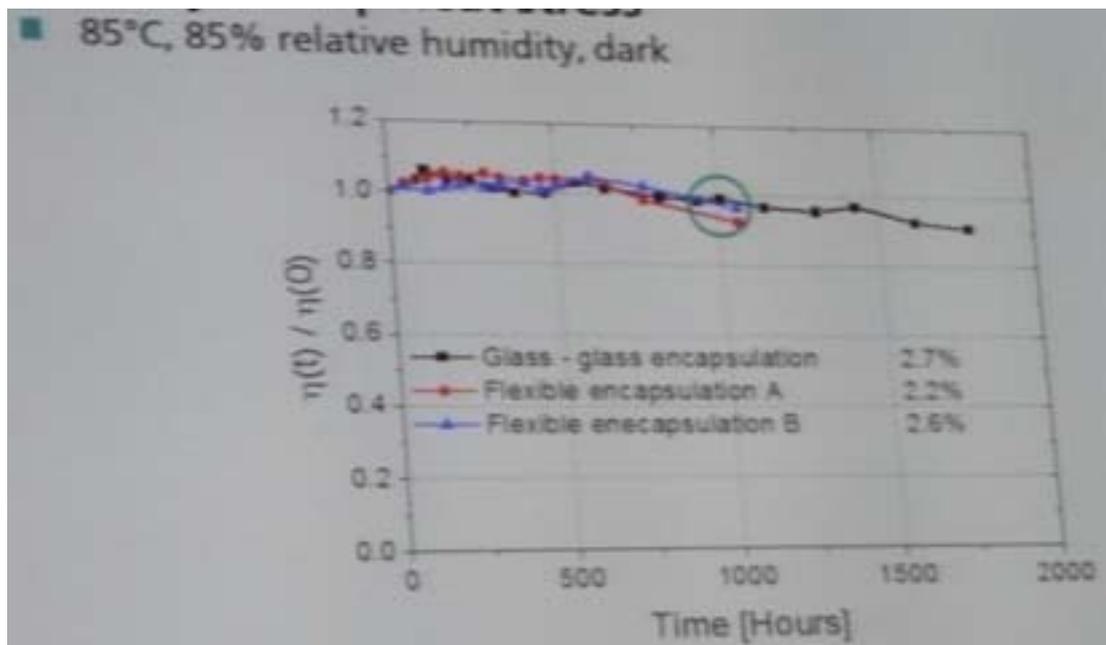


圖 3.4.31 濕熱穩定性測試(在 85°C，85%相對濕度及幽暗環境下進行測試)。

Fraunhofer 機構也展示出其 ITO-free OPV 的卷對卷塗佈製程，其 Cr/Al/Cr 電極為濺鍍於卷上，主動層為 P3HT:PCBM，使用非毒性溶劑(o-xylene)，R2R 塗佈如圖 3.4.32 所示，其上電極為 Ag grid，使用蒸鍍和溶液網版印刷兩種方式製作 Ag grid，蒸鍍銀電極的 OPV 元件效率~3.5%，但其網印銀電極的 OPV 元件效率仍僅 1.5%，可能是銀墨水在低溫烘烤所致。而 R2R 塗佈 OPV 各層加上網印銀線製程所得到的第一批 OPV 模組(由 8 條帶狀元件串聯)之效率仍僅 0.6%(圖 3.4.33)。



圖 3.4.32 Fraunhofer 機構的卷對卷塗佈 OPV 製程

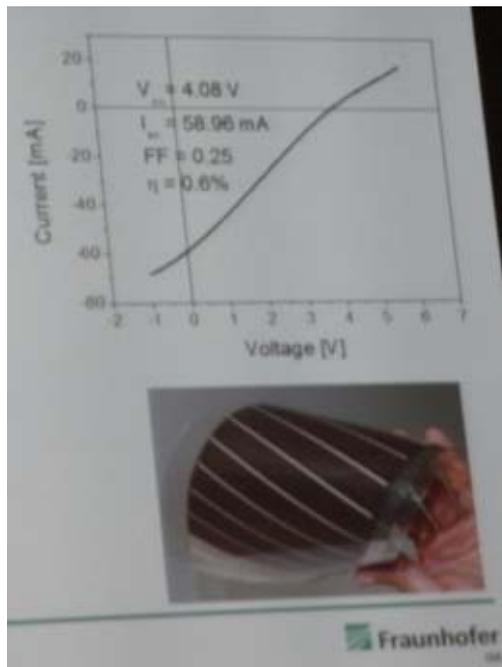


圖 3.4.33 第一批 R2R 產製 OPV 模組(由 8 條帶狀元件串聯)之效率

歐洲著名微機電研究所 Imec 發表利用一種小分子 Subphthalocyanins 取代一般 OPV 常用之富勒烯 C60 作為電子受體材料，及同類材料作為電子予體，兩者分別簡稱為 SubNc 及 Sub Pc，結果發現短路電流及開路電壓很高(圖 3.4.34)，效率經驗證為 7%，特別值得一提的是其

吸收光波長相當廣，幾乎涵蓋常用室內光源之波長範圍，如圖 3.4.35 所示。圖 3.4.36 顯示其在各種室內光源(LED 及陽光模擬器等)之不同光譜條件下從極低照度  $0.01\text{mW}/\text{cm}^2$  到標準陽光測試照度  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ，展現出不同的效率值。基本上其具有 OPV 之基本特性，即照度愈低效率會提升，在 LED 照度  $0.6\text{ mW}/\text{cm}^2$ 時效率會提升至 24%，該機構亦展現半透明之 OPV 模組，如圖 3.4.37，該模組之元件效率為 6.1%，但模組化後效率降為 5.0%，代表模組化技術相當好。

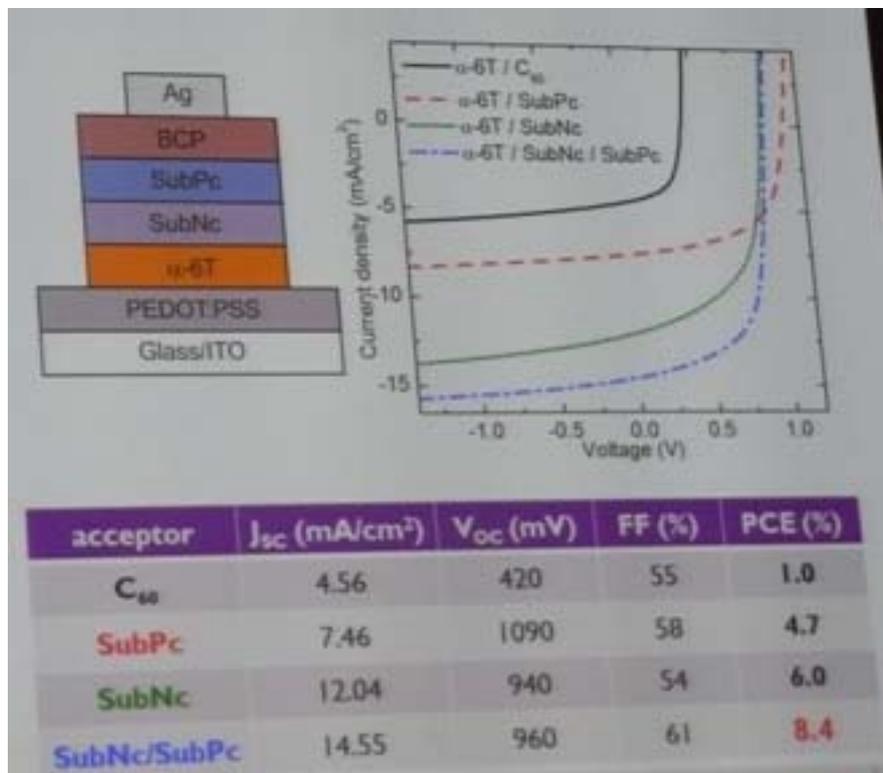


圖 3.4.34 C60-free OPV 之結構與對應之效率。

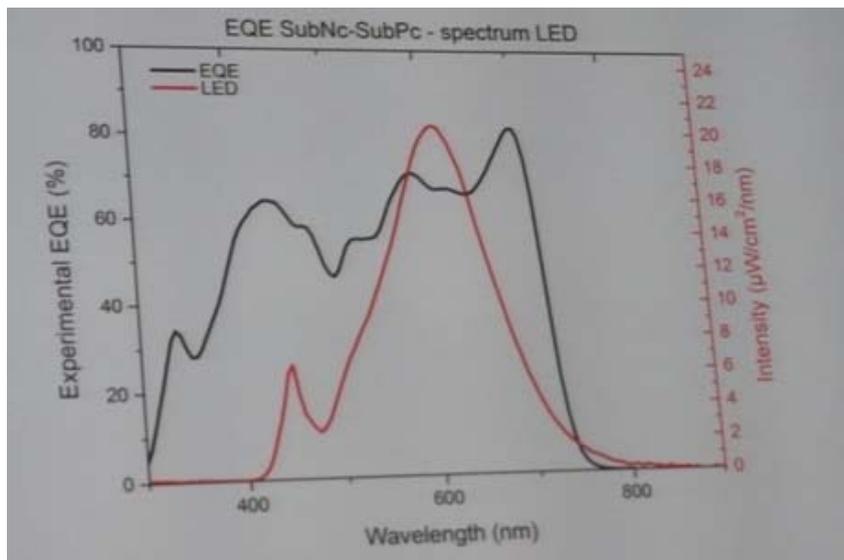


圖 3.4.35 量子效率顯示吸收光波長涵蓋常用室內光源之波長範圍。

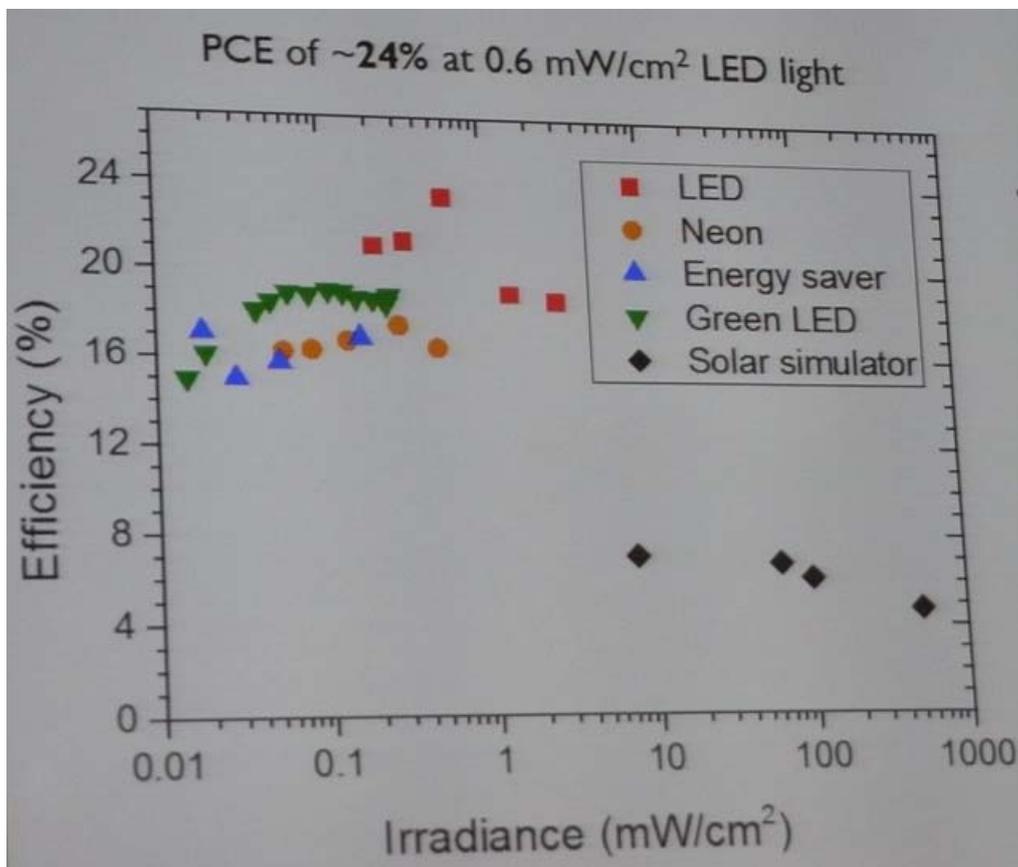


圖 3.4.36 在各種室內光源光譜條件下從極低照度到標準陽光測試照度之效率值變化。

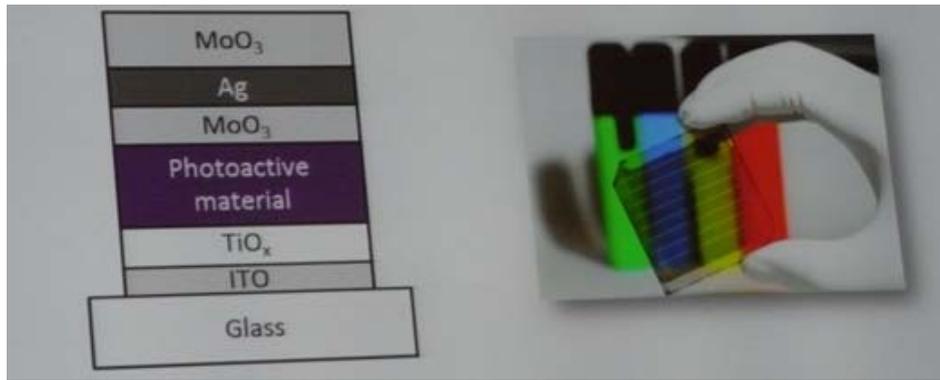


圖 3.4.37 Imec 機構展現之半透明 OPV 模組。

歐盟研究小組 EERA/SOPHIA(由 7 個 Lab 組成)對 R2R 印刷製程之 OPV 模組進行穩定度測試，其選用軟性基材、封裝材料及 P3HT/PCBM 主動層，模組由 8 條帶狀元件串聯而成，模組如圖 3.4.38，其量測 I-V 曲線之狀況為 25°C 及 AM1.5, 以 1000W/m<sup>2</sup>下連續照光 5 分鐘為前處理下，取 3 次平均值。穩定度測試狀況分為三種(1) ISOS(International Symposium on OPV stability)D-1，(2) ISOS-D-2(dry heat)及(3) ISOS-D-3(damp heat)，如圖 3.4.39，在 ISOS-D-2 測試條件下，模組在 113 天後仍能保有原先的效率特性，顯示良好的穩定度性如圖 3.4.40 所示，但在 ISOS-D-3 條件下，模組在第 23 天後效率掉為原先之 6 成。

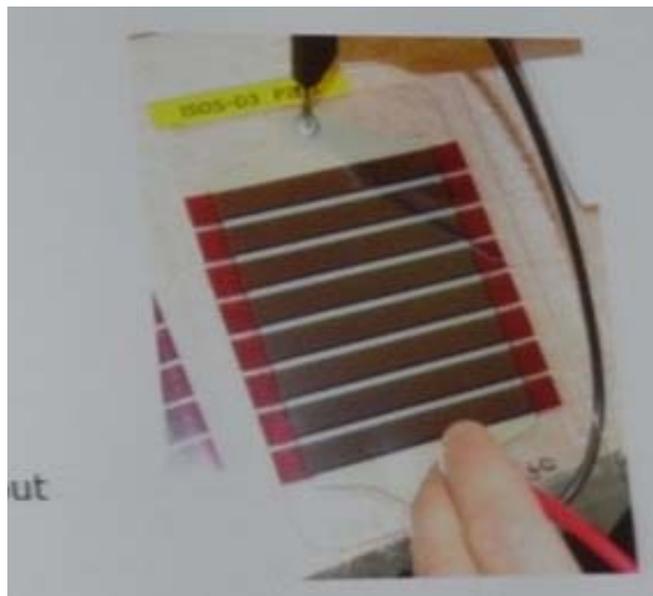


圖 3.4.38 由 8 條帶狀元件串聯而成模組。

ISOS (International Symposium on OPV Stability)		
ISOS conditions	Temp (°C)	Humidity (% RH)
ISOS-D-1 (laboratory)	ambient	ambient
ISOS-D-2 (dry heat chamber)	65	low
ISOS-D-3 (damp-heat chamber)	65	85

圖 3.4.39 穩定度測試狀況之標準。

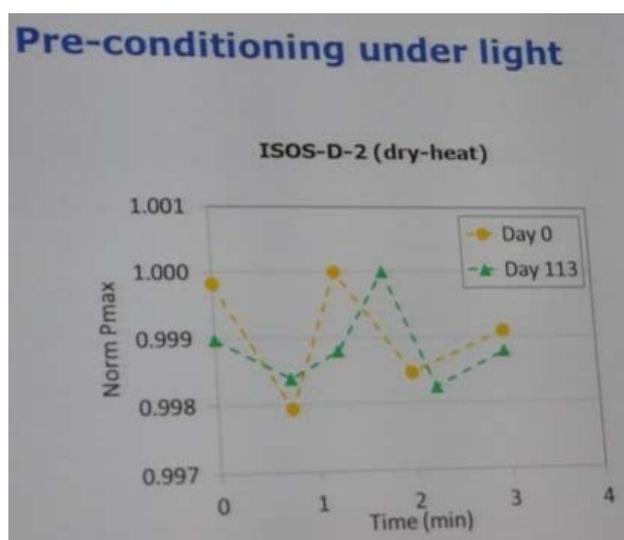


圖 3.4.40 在 ISOS-D-2 穩定度測試條件下的模組效率。

### 3.5 展覽會參觀及廠商交流

歐洲大型光電展覽會與國內光電週展覽會最大不同的地方為國內展場偏向成熟之商品推銷，而歐洲展場則有(1)許多創新及具有未來投入市場潛力之新型材料的展示，(2)或是未成熟試驗型階段之機台量產線尋求其他公司研發機關共同投入，(3)亦或為雖有機台展示，但尋求其他不同應用範圍之廠商興趣，並配合其意願而修改或客製化機台而達更高階產製，(4)光電應用產品在設計及客製化需求上呈現更多樣性空間，及訴求滿足消費者之想法。相對上國內產業商家則僅訴求低成本及現有技術規格之提升而非創新及設計，故國外之大格局展覽場總是帶領世界未來潮流及領先商機。

本次展覽會上，值得一提的是德國 micro FLEX™ 公司為軟性薄膜卷對卷印刷製程科技推出一先導型量產線，具不同需求功能階段之客製化調整，在工業應用及研究發展上兩者可兼顧，其除了已可以溶液製程印製軟式 CTGS、CIS 太陽電池模組、LED 及 OLED 顯

示器外，正開發應用在 OPV 及 3D 電池之量產印製技術，由於該公司是提供機台硬體及改裝，故其客戶(公司及研發機構)是量產技術之主要開發者，該公司亦於現場展示由客戶研發之 OPV 一卷，如圖 3.5.1 及圖 3.5.2 所示。



圖 3.5.1 利用德國 micro FLEX™ 公司先導型量產線印製之 OPV 太陽電池模組。



圖 3.5.2 軟性薄膜 Si 太陽電池模組。

micro FLEX™ 客製化之先導型卷對卷量產線針對非真空的 OPV 製造，從軟性基材之各式清潔手續開始，中間經雷射蝕刻作透明電極圖案化，各種奈米級厚度功能層塗佈(利用各種適合之塗佈刮頭及烘乾、熱退火等處理)，上電極印製、雷射光蝕刻模組化至最後封裝，由各種不同功能腔體組合起來，約需 20 米長，造價約新台幣一億元左右，如果考

量 Holst center 之原型生產線需有很長之腔體(組合式)來執行烘乾功能以提昇膜品質，可再要求 micro FLEX™ 客製化調整加長，其中值得一提的是有些腔體是可調整成空氣或惰性氣體環境，基本上產線之設計對製程環境之乾淨、粉塵及溫濕度控制極為嚴格，可能這些都是日後影響 OPV 可靠度之因素。

除了 micro FLEX™ 公司展示卷對卷印製生產線外，尚有一家 OET(organic electronic technology)公司展示卷對卷有機印刷電子量產線，除了 OLED 外 OET 公司亦宣稱其亦可高品質生產戶外及室內型有機太陽電池，但是該公司之製程全須利用真空及氣相鍍膜製程。本展場可發現 OPV 的量產線規畫，或者利用現有之其他軟性電子量產線修改調整成 OPV 製造流程是展場共通的賣點。另一方面薄膜無機太陽電池之量產線目前則多朝向 CZTS 材料開發，或是非真空溶液製程發展。

此次台灣有一家 CIZS 薄膜太陽電池製造廠商來參展(豪客能源科技公司)，該公司自行研發產線及擁有多項製程之專利，該公司看好未來之市場，台灣亦有一家矽晶太陽電池製造廠商來參展，該公司表示，由於其主要市場在國內及歐洲，故在最近太陽能產業之風波衝擊中尚可倖存，國內另有一家與其相同規模之公司，因其主要市場在美國，故在美國雙反政策中就面臨倒閉的命運。

## 四、建議事項

- (一)低耗能、低成本、非真空、軟性基板之溶液印刷製程(綠色製造程序)為國際科研產業未來發展趨勢，其所需之相關配合應用科技的拓展應儘早建立，以發展專利佈局之先機。
- (二)低照度(辦公室照明)及非日間環境之相關 PV 效能及可靠度測試是未來國際太陽光電須補強及重點開發項目，本所亦須同步發展進行這些測試工作以與國際接軌。
- (三)荷蘭 Solliance 計畫中之軟性有機光電元件封裝技術相當成熟，是產品可靠度的主要關鍵，本所 OPV 計畫可考量在節省成本及時間下與其建立封裝技術之資訊交流平台，作為初步合作的開始。
- (四)從素材至成品封裝卷對卷量產一貫作業之 OPV 量產線開發是本屆會議熱點之一，顯示 OPV 產業化成熟度不斷推進，本所 OPV 計畫應加速規畫整合卷對卷 OPV 一貫量產線之技術開發。
- (五)鈣鈦礦結構太陽電池不但是最有潛力之太陽電池，而且是本所現有之 OPV 核心製程技術的延續及最佳應用，建議本所及早佈局鈣鈦礦結構太陽電池前瞻性研究及量產與高穩定性研發。

## 五、附 錄

本次研討會網址爲：<https://www.photovoltaic-conference.com/>，相關細節可直接上網查詢，利用本會議參與人員之帳號與密碼下載之資料，由於數量龐大，如有需要者請聯絡核能研究所黃裕清博士索取（03-4711400 ext. 6426；[huangyc@iner.gov.tw](mailto:huangyc@iner.gov.tw)）。本報告中所有之討論資料及相片，均爲本所參與人員直接於會場上拍攝取得及整理，相當寶貴，非屬研討會所公開提供之資料。