

出國報告（出國類別：其他）

## 赴德國參加第 27 屆歐洲光電太陽能電池會議暨展覽會

服務機關：核能研究所

姓名職稱：陳長盈 副研究員  
曹正熙 副研究員

派赴國家：德國法蘭克福

出國期間：101 年 9 月 22 日~101 年 9 月 30 日

報告日期：101 年 10 月 29 日



## 摘要

參加德國法蘭克福舉行之第二十七屆歐洲光電太陽能電池會議暨展覽會，蒐集各國大型廠商、國家實驗室、跨國型之整合計畫、學術界及投資公司目前之技術研發現況、成果、商品資訊、工作經驗及其未來之重點規劃，本所藉由此國際研討會及展覽會吸取新知研討交流以提升研究技術及了解國際現今太陽能電池之技術現況發展及趨勢，以有助於未來本所太陽能電池之技術發展及研究規劃。本報告分門別類有系統的整理太陽能電池，供專案計畫各分項計畫的同仁研究參考，並略作心得分析，對高分子太陽能電池各項新型技術、國際整合型計畫現況及未來商機成果發展作細節的分析整理及報告。資料來源分別來自 1.會議論文現場報告 2.海報論文展示 3.廠商展覽與交流。

# 目 次

## 摘 要

一、 目的.....	1
二、 過程.....	2
三、 心得.....	3
四、 建議事項 .....	14

# 圖目錄

圖 2.1 歐洲太陽能國際研討暨展覽會(27th EU PVSEC)，研討會會場情景	15
圖 2.2 歐洲太陽能國際研討暨展覽會(27th EU PVSEC)，展覽會場情景	15
圖 2.3 核研所與台大材料系共同發表之高分子太陽能電池壁報論文	16
圖 2.4 會議議程概要	17
圖 3.1 歐洲整合型計畫 X10D 組織成員	18
圖 3.2 X10D 計畫整合製程與科技之流程圖	18
圖 3.3 X10D 計畫驗證溶液製程之 tandem 元件	19
圖 3.4 X10D 計畫驗證真空鍍層製程之小分子 tandem 元件之交界面層厚度對效率關係	19
圖 3.5 針對(1)光(2)熱(3)空氣影響之三種基本測試條件	19
圖 3.6 X10D OPV 反式結構元件壽命之改進	20
圖 3.7 內部機制(不良空氣穩定度所造成)驗證	20
圖 3.8 最佳覆蓋面積的模組設計	21
圖 3.9 ZSW 研究團隊組成	21
圖 3.10 ZSW tandem 元件設計	21
圖 3.11 不同連接層造成效率影響之文獻整理	22
圖 3.12 ZSW 半透光元件之光管理	22
圖 3.13 主動層與 Al 層交界層厚度對效率及透光性影響	22
圖 3.14 不同主動層(第一元件)厚度對效率影響	23
圖 3.15 串聯之 tandem 元件	23
圖 3.16 Heliatek 四項核心能力	23
圖 3.17 Heliatek 小分子結構圖	24
圖 3.18 Heliatek p-i-n tandem 元件結構示意圖	24
圖 3.19 Heliatek 使用不同基板造成微小效率損失	24
圖 3.20 Heliatek tandem 元件效率之驗證	25
圖 3.21 Heliatek 元件壽命之正溫度效應	25

圖 3.22	Heliatek 元件在弱光照度下之效率影響效應	26
圖 3.23	Heliatek 模組之效率驗證	26
圖 3.24	Heliatek 元件之高溫照光壽命測試	27
圖 3.25	Heliatek 高效率元件之連續照光壽命測試	27
圖 3.26	Heliatek 模組之高溫高溼下壽命測試	28
圖 3.27	Heliatek 量產滾製生產線目標	28
圖 3.28	Solliance 計畫之組成成員及其分工結果	28
圖 3.29	Solliance 計畫 tandem 元件效率驗證	29
圖 3.30	Solliance 計畫 OPV 模組效率驗證及製造影響	29
圖 3.31	Solliance 計畫半透明 OPV 模組效率比較	30
圖 3.32	Solliance 計畫 R2R 設施廠房配置圖	30
圖 3.33	Solliance OPV 之效率、製程技術、成本發展哩程圖	31
圖 3.34	Solliance 計畫利用不同製程及 HTL 層提升元件壽命	31
圖 3.35	Holst center 在阻絕層開發技術方面之歷史發展	32
圖 3.36	Solliance 計畫 OPV 成本比重估計	32
圖 3.37	Solliance 計畫不同 OPV 結構設計及製程改進下之成本控制	33
圖 3.38	Solliance 計畫 P3HT/PCBM 元件之製程改進與成本降低	33
圖 3.39	Solliance 計畫金屬網線印刷設備與結果	34
圖 3.40	Solliance 計畫量產生產線	34
圖 3.41	Solliance 計畫圖案化 R2R 製程之 P3HT/PCBM OPV	35
圖 3.42	Solliance 計畫 spray coating 製造模組，效率與面積之關係	35
圖 3.43	Solliance 計畫雷射刮除程序( P1、P2、P3 最佳化)	36
圖 3.44	Solliance 計畫雷射刮除結果	36
圖 3.45	Solliance 計畫之分工與商業合作廠商之關係	37
圖 3.46	EOS 計畫下成員組成	37
圖 3.47	EOS 計畫之 OPV 模組之規劃應用方向	38
圖 3.48	EOS 計畫成員之分工及工作進度規劃	38

圖 3.49	EOS 計畫元件效率(已驗證者).....	39
圖 3.50	EOS 計畫元件效率(未驗證者).....	39
圖 3.51	EOS 計畫 tandem 元件效率.....	40
圖 3.52	EOS 計畫全印製之元件.....	40
圖 3.53	EOS 計畫可撓性 OPV 之驗證.....	41
圖 3.54	EOS 計畫可撓性 OPV 之測試.....	41
圖 3.55	EOS 計畫 OPV 應用商品-I.....	42
圖 3.56	EOS 計畫 OPV 應用商品-II.....	42
圖 3.57	Sunflower 計畫之組成成員及發展方向.....	43
圖 3.58	Sunflower 計畫多層結構大氣環境下 R2R 印刷滾製.....	43
圖 3.59	Sunflower 計畫目標.....	43
圖 3.60	Sunflower 計畫產品應用空間.....	43
圖 3.61	不同低能隙高分子材料及其可達成之元件效率.....	44
圖 3.62	UCLA tandem 元件之吸收光譜響應.....	45
圖 3.63	UCLA 高效率 tandem 元件之反式結構與能階匹配.....	45
圖 3.64	PBDTT-DPP 之分子結構圖.....	46
圖 3.65	PBDTT-DPP 吸收光譜特性.....	46
圖 3.66	UCLA 元件之量子效率量測結果及與染料敏化電池比較.....	47
圖 3.67	OPV 元件壽命分析與環境測試結果.....	47
圖 3.68	UCLA 團隊之 OPV 量產化結果評估.....	48
圖 3.69	電極層中，銀奈米線由於 TiO <sub>2</sub> 奈米粒子之助而接合良好.....	48
圖 3.70	UCLA 團隊之透明 OPV 透光性量測.....	49
圖 3.71	UCLA 團隊之透明 OPV 效率與傳統元件之比較.....	49
圖 3.72	UCLA 團隊全溶液製程之 CIGS 薄膜太陽能電池之效率發展.....	50
圖 3.73	UCLA 團隊全溶液製程之 CIGS 薄膜太陽能電池之結構(含銀奈米線層)及效率變化.....	50
圖 3.74	UCLA 研究團隊成員.....	51

圖 3.75	全球過去 PV 容量與未來預測	51
圖 3.76	(a)PV 模組價格變化趨勢圖	52
圖 3.76	(b)矽晶 PV 哩程圖(模組發電量與成本)	52
圖 3.76	(c)矽晶 PV 發電量與成本學習曲線	53
圖 3.77	半導體薄膜 PV 佔總體 PV 之比重趨勢變化	53
圖 3.78	各型薄膜 PV 之發展比重趨勢變化	54
圖 3.79	半導體薄膜 PV 之實驗室元件及模組效率發展與目標	54
圖 3.80	半導體薄膜 PV 之材料、製造與效率之比較	55
圖 3.81	manz 公司之 CIGS 模組效率	55
圖 3.82	半導體薄膜 PV 之挑戰	56
圖 3.83	PV 市場之競爭	56
圖 3.84	CIGS 模組成本分析	57
圖 3.85	超薄迷你模組與傳統晶片模組比較	57
圖 3.86	超薄迷你模組外觀	58
圖 3.87	超薄迷你模組設計(如同 IC 設計)	58
圖 3.88	超薄迷你模組之外觀變化(製程中)	59
圖 3.89	超薄迷你模組之可撓性展現	59
圖 3.90	工程師與建築師思維差異	60
圖 3.91	PV 相關之建物應用結合產品-I	60
圖 3.92	PV 相關之建物應用結合產品-II	60
圖 3.93	PV 產品與隔音牆之結合	61
圖 3.94	建物整合太陽能科技(PV+solar thermal)	62
圖 3.95	玻璃基板不透明 OPV	62
圖 3.96	玻璃基板半透明 OPV	63
圖 3.97	塑膠基板 OPV	63
圖 3.98	塑膠基板半透明 OPV	64
圖 3.99	塑膠基板半透明 OPV 之可撓性展現	64



圖 3.100 矽晶太陽電池製作成本預估(Schmid 公司資料).....	65
圖 3.101 Ag pastes & inks 佔整個 Si Solar cell 成本與發展 Cu pastes 需克服點.....	65
圖 3.102 使用 Cu pastes 之策略及挑戰.....	66
圖 3.103 製備 Cu-Ag Core-Shell particles 之特性分析.....	66
圖 3.104 Cu-Ag Core-Shell particles，在空氣中會有氧化現象發生.....	67
圖 3.105 Cu-Ag Core-Shell particles，在空氣中會有聚集現象.....	67
圖 3.106 傳統 Cu pastes 製備之薄膜，在氮氣中也會氧化.....	68
圖 3.107 日本 Tohoku University 宣稱已發展出易燒結、不易氧化與低電阻之新的 Cu pastes.....	68
圖 3.108 日本 Tohoku University 亦發展出 barrier 可以阻止 Cu 擴散至 Si 且有很好的 ohmic contact.....	69

## 一、 目的

本屆歐洲光電太陽能電池會議(27th European Photovoltaic Solar Energy Conference;簡稱 EU PVSEC)暨展覽會，屬全球最大之太陽能電池會議，參展之廠商數目達 656 家，共吸引 31,500 人到場參觀，參與會議之世界各國專家與會代表計有 4,024 員，成員包括來自產業界外、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，除積極探尋合作對象和擴大商機外，大家有一致的想法即找出技術上最可行的突破改進方向策略，未來合乎多變化市場的發展佈局及商機走向，掌握未來方向為日後成功的重要一步。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，涵蓋範圍從晶矽基太陽能電池，半導體型薄膜太陽能電池至有機太陽能電池，從元件模組之製程技術及成本效能改進、大型 PV 系統及相關零件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，相關國際現況趨勢及研發新知可作為太陽能專案同仁日後研發策略在知己知彼下作有利的修正規劃，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。

## 二、過程

9月22~23日:

桃園國際機場出發，於9月23日抵德國法蘭克福。

9月24日:

08:00 參加並辦理 27 屆 EU PVSEC 大會報到註冊手續，領取相關資料隨即於 08:30 開始參與各項有關之現場口頭論文報告，研討會會場情景如圖 2.1 所示，展覽會會場如圖 2.2 所示，當日並於海報論文展示區張貼展示本所與台大材料系共同發表之高分子太陽能電池壁報論文一篇如圖 2.3 所示。

9月25~28日:

有系統地攝錄蒐集與本所現行研發各種太陽能電池中相關之現場口頭報告論文投影片，內容均充實地反映各研發團隊的心血成果、寶貴經驗及極具價值之數據(從材料端及基礎層面，至實際製程技術，最後至前端未來層面，並剖析市場及應用端)，本報告依太陽能電池之種類及內容題目整理於光碟，細節內容可供相關背景專長同仁有需求興趣者至存放處查閱;在此期間，也同樣地攝取蒐集各海報論文，細節內容亦存放提供同仁查閱，在展覽會場蒐集各種有用廠商成果展示資訊，並作交流與討論。會議議程概要示於圖 2.4。

9月29~30日:

返程，從法蘭克福機場搭乘漢莎航空至荷蘭阿姆斯特丹，轉機華航後飛抵桃園國際機場。

### 三、心得

#### (一) 有機太陽能電池國際整合及技術現況與成果:

##### 1. 歐洲整合型計畫 X10D:

計畫時程從 2011 年十月至 2014 年九月，為國際型之聯合研究和資本家團隊(consortium; 由 17 個成員組成包括大學、國家型研究中心、各大小商業公司及終端用戶，較有名之成員有 Heliatek, ECN 及 Solar Press 等，如圖 3.1 所示)，其目標將有機太陽能電池(organic photovoltaic; 以下簡稱 OPV)領帶至薄膜 PV 市場，作法為提升效率及壽命並發展大面積製程技術並作成本、生命週期分析及導向正確的應用方向，該計畫從發展設計新材料及製造科技以作為具市場競爭性 OPV 模組，以高效率、低成本及穩定 tandem OPV 目標元件( $1\text{ cm}^2$ ; 效率為 12%)發展至模組( $100\text{cm}^2$ ; 效率為 9%)，並考量技術成本、耗能與生命週期，訂目標成本( $< 0.7\text{ €}/\text{Wp}$ )及外推壽命分別為 20 年(在玻璃上)及 10 年(軟板)。

該計畫整合①溶液製程 OPV(材料、製程元件、tandem 元件、模組、R2R (roll to roll) 滾製匹配、壽命)②能力化科技(enabling technology; interlays 交界層、透明電極、雷射結構化等)③真空基礎 OPV(元件、tandem 元件、模組、R2R)等，及執行準確之驗證(benchmark)，如圖 3.2 所示。該計畫目前驗證溶液製程之 tandem 元件 (PCDTBT:PC<sub>70</sub>BM 及 PDPPST:PC<sub>60</sub>BM 為主動層)效率為 7%(如圖 3.3 所示)，驗證真空鍍層製程之小分子 tandem 元件之交界面層(inter layers)厚度對效率之影響很大(如圖 3.4 所示)。

該計畫之研究認為以上小分子及 P3HT 高分子等 OPV 之材料及結構也必須確保長期穩定度(long-term stability)，其主要受制於內部劣化(intrinsic degradation)機制;因而提出必須要有高品質低成本的封裝(encapsulation)對應，該計畫提出封裝與壽命評估須考慮三要素(1)光(2)熱(3)空氣，因而提出三種基本測試條件(在單一應力下)，如圖 3.5 所示，熱穩定性測驗條件(24, 45, 65, 85 及 150°C)，其目前測試結果顯示，主要的劣化源自於大氣曝露下，其發現順式結構(conventional)中用 ZnO 取代 Yb 金屬(在陰極層附近)可大幅提升壽命，進一步 ZnO 取代後再改作為反式結構(inverted)則更加提升壽命(如圖 3.6 所示)。

該計畫研究反式小分子元件認為其劣化機制並非來自於受熱穩定度及照光效應影

響，而是來自於不良空氣穩定度(又稱內部機制)，圖 3.7 所示，有 ETL(電子傳輸層，其由 BCP:Yb 構成)存在及無 ETL 存在下(對照組)，在照光及受熱(提升溫度)的條件測試下，兩者之效率行為展現均穩定;但其暴露空氣中，穩定度則劇烈下降，而具有 ETL 層之元件，又比不具 ETL 層之元件差，故稱為內部機制。

對於具有最佳覆蓋面積的模組設計及建置，該計畫提出如圖 3.8 所示之設計，最佳設計為元件寬度 2 cm，各式元件間距為 20  $\mu\text{m}$ ，但目前實際間距僅達 100  $\mu\text{m}$ ，而元件寬度僅達 1 cm，其使用雷射刮除畫線(laser scribing)處理，並應用於 R2R 製程中。

X10D 計畫對於不同製程(solution-processed and vacuum-based)技術成本，耗能，生命週期評估結果未來將發表於白皮書(white paper on status and market potential of OPV)。

## 2. ZSW 研究團隊:

其成員主要由德奧等研究中心組成，但合作夥伴含有 KONARKA、MERCK 及 KIT 聞名之公司機構(如圖 3.9 所示)，其結果著重於具 ZnO 奈米粒子基結合層(recombination layer，簡稱 RCL)之高效率 tandem 元件，使用 ZnO 奈米粒子的好處為良好透光性、便宜、非毒性及(可能的)新應用方向，其 tandem 元件除電極外，其餘所有作用層均為溶液製程結果，如圖 3.10 所示，RCL 即 tandem 元件中兩不同元件之界面連接層，文獻亦指出不同 RCL 之材料影響 tandem 元件之效率值(從 6.5%~10.6%)，如圖 3.11 所示，所使用奈米粒子直徑 4~6 nm，RCL 厚度為 300 nm，其透光率(>95%，對 400~900 nm 之波長)。

該研究團隊提出半透光電極設計由  $\text{TiO}_2$  (18 nm)/Al (4 nm)/ZnO:Al (360 nm)三層組成，但是此半透光元件中光管理(light management)卻無預期之反射效果(如圖 3.12 所示)，效率反而降，而彌補此以增加效率的策略為(1)增加 Al 交界層厚度和(2)增加主動層厚度，實驗結果 Al=4 nm，主動層=130 nm 較 Al=18 nm，主動層 70 nm 者有較高之高波長穿透率，而兩者元件之效率提升程度則相同，如圖 3.13 所示。

另一方面，該團隊也展示在 tandem 元件中，其面光第一個元件厚度相當重要，影響效率之提升甚巨(從 6.5%~8.6%)，如圖 3.14 及 3.15 示。

## 3. Heliatek 公司:

該公司位於德國德勒斯登，為未來深具商機產品之開發公司(該公司由 BASF VC、

Bosch 及 RWE Innogy 等七家公司投資贊助),該公司發表之論文題目為小分子(oligomer)基礎之可撓性 OPV 由實驗室至生產製造之路,該公司擁有四項核心能力: (1)材料端之研發 (2)組件堆疊構造 (3)R2R 滾製生產技術及 (4)OPV 實業發展(如圖 3.16),其所研發之小分子具有快速合成,可量產,易純化及用 C<sub>60</sub> 當受體(不需 PCBM 衍生物)等,其分子鏈結構為兩端以受體作兩端官能基,中間為重覆展開之施體團,如此其有良好電洞傳輸性能(如圖 3.17),Heliatek 公司之 p-i-n tandem 元件(關鍵科技)之結構示意圖如圖 3.18 所示,2011 年 Heliatek 之小分子 OPV 效率已接近 10%(玻璃基板型; >1 cm<sup>2</sup>),其亦應用發展在塑膠基板(PET 薄片)上,效率接近 9%,如圖 3.19 所示其不同基板造成的效率損失是由於表面的反射率的增加及較低光學性質。

Heliatek 今年展示其專利化 p-i-n tandem 元件(由其專屬分子材料製成)之效率已抵 10.7%(面積為 1.1 cm<sup>2</sup>),由 SGS 驗證單位記錄(2012 年 3 月),如圖 3.20 所示,其壽命表現亦在頂尖,當溫度高達 40~60°C 之間,一般晶矽和 CIGS 薄膜太陽能電池在 60°C 時效率會降低 15%而非晶矽薄膜電池則降低 10%,反而 Heliatek 電池展現正的溫度效應,其效率在 60°C 時增至最高,如圖 3.21 示,此元件更展現優越的弱光下行爲績效,在 1/10 陽光照度下,此元件效率(原先效率為 10.3%)會提升一成,而一般晶矽與 CIGS 薄膜電池則下降,如圖 3.22 所示。

Heliatek 其模組面積為 142 cm<sup>2</sup>,效率值亦有 SGS 驗證記錄,其考慮電極面積(又稱 active area)之效率值為 9%,考慮實際總面積(142 cm<sup>2</sup>)之效率值為 7.7%,如圖 3.23 所示。其元件壽命測試顯示,在黑暗 85°C 下其效率(6%)在 5000 小時的不變,而在 1.5 陽光照度及 85°C 下,其效率在 5000 小時僅輕微下降,降幅低於 3%以內,如圖 3.24 示;此種小分子元件(效率 8.3%)在連續照光條件下(T80)壽命外可至 13600 小時(相當於~24 年),而其外推熱壽命(T80)可達 12200 小時,其在 85°C 1000 小時內效率劣化低於 5%,如圖 3.25 所示,另一方面其相當之塑膠基板模組(69 cm<sup>2</sup>)在 85°C 變動下及相對濕度 85%環境下,1000 小時內效率維持穩定,如圖 3.26 所示,這些有關壽命之測試數據,可擺脫 OPV 無法達到商業化壽命之魔咒。

在朝向大面積滾製生產方面,Heliatek 已在 2012 年 3 月著手建立生產線,生產線針對 30 公分寬之 PET 塑膠軟板,低溫真空鍍層,P1、P2 及 P3 結構化之雷射刮除畫線技

術，預計 2012 年底可進行封裝，如圖 3.27 所示，總結來說，Heliatek 之 p-i-n tandem 元件( $>1 \text{ cm}^2$ )之效率為 10.7%(玻璃基板)和 8.7%(PET 塑膠基板)，模組效率 9%( $120 \text{ cm}^2$ )，外推壽命遠超過 10 年，對抗光及熱之測試表現非常穩定。

#### 4. Solliance OPV 計畫:

此計畫為一個 R&D 聚集體(cluster)以朝向低成本、高效率、及穩定之 OPV 模組為目標，其主要成員均為聞名之研究機構及大學，有(1)ECN(領導之能源研究所；荷蘭)(2)Imec(在奈米領域世界領先研究機構)(3)Holst Center (荷蘭) 及(4)Tu/e(荷蘭，Eindhoven 大學)，如圖 3.28 示，其一般性目的在於(1)建立 OPV 元件、模組設計、製程、特性分析與整合之完整科技工具列(toolbox)，(2)尋求聞名之三角分立(效率、成本及其壽命所構成，如圖 3.28)之最佳化中心點 (3)在開放創新的模式下運作(即參與此 OPV 的公司一起分享研究成果)。其現階段有已被認證的單界面高分子元件效率為 8.3%，而未被驗證之單界面高分子元件效率 $>9%$ (imec)，而高分子 tandem 元件效率為 8.24%(TU/e)，而單界面高分子電池模組效率為 5.5%(imec)，ECN 負責低成本 OPV 模組及壽命分析，imec 負責低水敏感性的 OPV 堆疊設計，Holst center 負責高端阻絕物(high end barrier)及封裝 (water vapor transmission rate, WVTR 達  $10^{-6} \text{ g/day.m}^2$ )。

Imec 之單界面高分子元件驗證(效率=8.3%)其主動層使用 polyera 公司之高分子材料，其具陽陰極旁阻擋層(BL)材料之元件設計如圖 3.29 所示，TU/e 之高分子 tandem 元件(效率 8.24%)使用 PMDPP3T 及 PCDTBT 兩種高分子材料，imec 之被驗證過的高分子 OPV 模組(效率 5.5%， $A=16 \text{ cm}^2$ )其效率在製造、封裝及運轉時的變化，如圖 3.30 所示，其半透明 OPV 模組之效率為 5.0% ( $A=16 \text{ cm}^2$ )，相當接近非透明(full contact; 已封裝)OPV 模組之效率 5.2%，如圖 3.31 所示。Solliance OPV 計畫對於 R2R 設施廠房以及生產線之不同任務區域配置空間之規劃如圖 3.32 所示。

Solliance OPV 之效率、製程技術、成本發展哩程圖以今年與 2015 年相比(如圖 3.33)，目前 OPV 成本 $\sim 10 \text{ €}/\text{Wp}$ ( $\sim 150 \text{ €}/\text{m}^2$ )，R2R 製程以 slot-die coating 為主，其模組仍以真空 sputtering ITO 為主，元件效率 10%，模組效率為 $\sim 1.7%$ 且低產率，透過層化(lamination)來進行低端包裝(low-end packing)；2015 年 OPV 成本預計低於  $0.5 \text{ €}/\text{Wp}$  ( $<50 \text{ €}/\text{m}^2$ )，軟性或薄膜基板為主，陽極板以 TC(transparent conductive)或金屬之直接印刷製造，元件

效率>13%，模組效率>5%，其產率>20%，進行高端阻絕(high-end barrier) 科技達成在 65°C 及 45%相對溼度標準狀況下 1000 小時效率損失低於 10%。

Solliance OPV 之壽命發展階段，其利用傳統結構(順式)中以 MoO<sub>3</sub> 取代 PEDOT 以降低大氣週圍環境引起之劣化及降低易溼(hygroscopic)層的衝擊，結果發現 MoO<sub>3</sub>(溶液製程)、MoO<sub>3</sub>(真空蒸鍍)及 PEDOT 所製成之元件效率值均接近，但壽命表現 MoO<sub>3</sub>(溶液製程)= MoO<sub>3</sub>(真空蒸鍍)>>PEDOT，如圖 3.34 所示。Holst center 之阻絕層(barrier)研發科技從以前在 OLED(有機發光二極體)之玻璃基板和薄膜封裝技術順利轉移至 OPV 之可撓性阻絕層基板和薄膜封裝技術(規範: WVTR= 10<sup>-6</sup>/day.m<sup>2</sup>)，可達成類似成效，如圖 3.35 示。

Solliance OPV 之成本降低階段；對於 R2R 250 MWp 之製造成本，材料佔了最高比例 59% (ITO, barrier 及銀等)，如圖 3.36 所示，而驗證製程之監視點在溶液製程對真空製程，S2S 對 R2R, tandem 對單界面及 20MWp 對 500 MWp，其計算對於 4%、8%及 12% 三種元件效率下，不同 OPV 結構設計及製程改進下成本(\$ /Wp)之降幅比較，如圖 3.37 示，以 12%效率之元件而言，當其結構由 PET+barrier+ITO 進入 PET+barrier+printed Ag grid+PEDOT 最後抵達 PET+barrier+printed Cu grid+PEDOT，其成本依序從~1.5 \$ /Wp 至 1.0 \$ /Wp 最後抵達~0.5 \$ /Wp。其指出當元件效率在 12%時，總模組效率可抵達 9.3%。Solliance 計畫亦指出在低成本選項考慮之下，全溶液製程是必須的，他們由標準順式結構至反式結構，最後到全溶液製程，每一層使用之材料，厚度與相關製程方法於圖 3.38 所示。(以 P3HT/PCBM 為基礎，效率值為 2.49%)。

Solliance OPV 之量產化階段；其金屬網線(grid)之印製(ink-jet 及 rotary screen printing)，如圖 3.39 所示，片電阻(sheet resistance)低於 1 Ω/Sq，表面覆蓋率低於 5%，在網線印製的燒結過程，如果利用高溫爐(furnace)來執行燒結，則 R2R 製程需要 10 m/min 及 400 公尺長的高溫爐，所以利用光燒結(photonic sintering)來達成快速燒結，如圖 3.39 示，當其與 rotary screen printing 結合成線上燒結，R2R 速度為 5 m/min。Solliance OPV 之 slot die, spray coating 及 ink-jet 結合成之生產線，如圖 3.40 所示，機械廠牌分別為 coatema/Troller/nTact，R2R 生產線為 30 cm 寬模組用。圖案化(patterned)之 R2R slot die 鍍製成的 P3HT/PCBM 如圖 3.41 所示，該計畫亦同時嘗試用 ink-jet printing 來印製



PEDOT(用 Agfa 公司之 HC-PEDOT)層及主動層(用 plextroics 公司之 P3HT)，其效率增高約一成多。

Solliance OPV 成員 imec 指出其利用 spray coating 製作 P3HT/PCBM 模組當面積從 1.33 cm<sup>2</sup> 至 15.8 cm<sup>2</sup> 其效率變化從 2.9% 到 2.5%，甚至比用 spin coating 方法(面積 13.9 cm<sup>2</sup>，效率 2.4%)績效高些，如圖 3.42 示，另一方面 Solliance 計畫利用雷射刮除技術，達最大化元件面積，及最小化元件間連接區域，分三步驟，如圖 3.43 及 3.44 所示。最後 Solliance OPV 特別指出他們是由於分享研究而聚集在一起(together in shared research)，此分享研究有一個高水平的危機槓桿，爲了將 OPV 帶向實際成功，對同屬於 OPV 價值鏈的所有公司是必須的，第一家的工業公司已進入了 Solliance OPV 計畫，目前數項探險式的工業合作亦正在進行中，從材料供應端，至設備供應商，最後在終端用戶均示於圖 3.45，此計畫開放邀請有興趣者加入。

#### 5. 公眾基金計畫 EOS:

其資本集團組成除商業公司之外，亦涵蓋大眾及歐洲研究機構，組成如圖 3.46(著名 KONARKA 及 MERCK 公司均在內)，該計畫目的在於發展可撓性 OPV 元件及模組，經由效力成本(cost-efficient)印製過程製造，其中重點爲可印製之 tandem 科技(由低能隙及高能隙高分子所構成，可印製具空氣穩定之電極材料和緩衝層(buffer layer)，並確保 3~5 年壽命，工業上可匹配之生產過程及技術及市場驅動(market-driven)之規格以利在可撓基板之效力成本生產過程。OPV 模組之應用範圍如圖 3.47 所示；其成員在材料、元件設計、量產之模組及應用方面均各有所司的分工合作，如圖 3.48 所示。

該計畫研發所屬的高分子材料，其元件效率由 NREL 驗證爲 6.53%(A=1.014 cm<sup>2</sup>)，如圖 3.49 所示，而未經驗證的元件效率爲 6.9% 及 7.5%(如圖 3.50 所示)，然而其 tandem 元件之效率反而較低，順式結構效率 6.9%，而反式結構效率 4.3%，如圖 3.51 所示，另一方面已具有全印製 (fully printed) 太陽能電池之能力 (PET/ITO/EEL/KOPVI:PCBM/HEL/Ag；如圖 3.52)。其可撓性模組之壽命測試方面，雖然仍無 OPV 壽命測試標準，但仍取得相關之驗證測試，如圖 3.53 及 3.54 示，圖 3.55 及 3.56 展示該計畫的應用產品。

#### 6. 歐洲整合型計畫 Sunflower:

該計畫成立是為了符合以下挑戰 (1)OPV 太陽電力產生之最新一代:具可撓性、低成本、重量輕、新形式, (2)能力面向:新的消費者流動與應用、容易佈置於建物、整合太陽光電及其他新能源利用, (3)關鍵機會:在替代能源中建立創新的基礎 (4)挑戰效率、壽命、生產成本及降低環境之衝擊。該計畫之成員及發展面向如圖 3.57 所示, 其提出幾點指導方向, (1)大氣環境下 R2R 印刷製程方能降低在歐洲的製造成本及環境衝擊(CO<sub>2</sub>), (2)多層結構 (tandem)以達成高的模組能量與效率, 以及具競爭性的 PV 科技, (3)有效成本之擴散阻絕層(barrier)及 getters 以利增長壽命, (4)取代稀有無機成份(如 In、Te 和 Cd)以提升經濟與環境之永續性(sustainability), (5)基本及應用材料科學之發展以達到有效穩定的模組(如圖 3.58 所示)。

計畫目標為(1)模組效率大於 10%:高分子材料發展及交界層、形貌控制、tandem 結構、元件物理及分析、light management 結構、PEDOT+Ag, (2)壽命達 20 年:封裝及穩定性薄膜開發、劣化機制研究及界面材料改進, (3)成本低於 0.7 €/Wp:可印製之透明電極 PEDOT+Ag、量產之工具、滾製技術及有效阻絕層生產, 如圖 3.59 所示。sunflower 計畫之產品應用空間如圖 3.60 所示。

## (二) 加州大學洛杉磯分校材料系 OPV 實驗室團隊之現況與展望

該 OPV 團隊製造高分子 tandem 元件效率達 10.6%, 與 Heliatek 製備之小分子 tandem 元件(效率達 10.7%)相當, 與 Mitsubishi Chemical 公司之 OPV 元件(效率接近 11%), 此三者為目前世界前三高且具完整實力之團隊, 該實驗由 Y.Yang 教授帶領, 並與日本住友公司合作, 故代表性稱法為 UCLA-Sumitomo, Yang 教授解釋為何使用 OPV, 因有不受限的可能性(unlimited possibility), 其整理出許多目前的低能隙材料製造之元件效率均在 7% 或 8% 以上(如圖 3.61), 這些符合低成本及易製造之塊材異質接合(bulk heterojunction)高分子太陽能電池基本條件。另外從 NREL 統計之各型太陽能電池效率與發展時間趨勢圖來看, 大多數高效率(>16%)太陽能電池發展已趨近平緩, 其技術之突破空間不大, 而對照下 OPV 從 2008 年急速發展, 以趨勢分析來看 2015 年元件效率可達 15%, 以下則分析技術上如何突破。

UCLA 之高效率元件(反式結構), 其堆疊之兩吸收主動層互補並涵蓋大部份太陽光譜(如圖 3.62), 其結構設計和對應能階匹配如圖 3.63, 其使用 P3HT/ICBM 為(面光)第一

道之主動層，PBDTT-DPP/DC<sub>n</sub>BM 為第二道主動層，PBDTT-DPP 之分子結構如圖 3.64，其本身與 P3HT 之高分子吸收光譜特性如圖 3.65，(P3HT 之  $E_g=1.9\text{eV}$ ，PBDTTT-DDP 之  $E_g=1.4\text{eV}$ )，由 NREL 驗證之此反式結構 tandem 元件(2011 年)其效率為 8.6%，而第一道(面光)之主動層元件效率為 5.7%，第二道主動層元件效率為 6.5%，該團隊指出目前 tandem 元件之短路電流( $I_{sc}$ )偏低，其原因是 OPV 之量子效率偏低所致(~60%)，如圖 3.66 所示，相較之下染料敏化太陽能電池之量子效率達 90%。並且他們認為利用高分子材料之能隙與開路電壓( $V_{oc}$ )之可調整關係，該團隊提出現階段效率 10%之元件，若克服挑戰將量子效率提升至 90%， $V_{oc}$  提升至 0.7V 能隙之消耗，而 FF 維持在 70%左右(現有)，則效率 20%之元件是可能的。

對於高分子 OPV 壽命方面，該團隊依據文獻指出過去 P3HT/PCBM 型高分子 OPV 壽命測試可達 3 年，而對於新型低能隙高分子元件其壽命可達 6 年以上，甚至有些是 10 年，而在 65°C/85%溼度下，其外推壽命超過 8000 小時，65°C/1 陽光照度下，外推壽命超過 3 年，如圖 3.67 示。其亦展示量產化的結果，如圖 3.68，如裝置具多重鍍層及低成本封裝，小面積元件效率為 6%，而模組效率為 4.6%(面積=201.9 cm<sup>2</sup>，若考慮有效面積計算，則效率為 3.9%)。

該團隊在朝向全溶液製程(full solution process)元件方面，其有一點創新處即該團隊結合了銀奈米線及 TiO<sub>2</sub> 奈米粒子於新穎溶液中以製備銀奈米線電極，銀線間接合具有熔合良好特性，如圖 3.69，其結果顯示銀奈米線電極層會在加入 TiO<sub>2</sub> 奈米粒子後，其阻抗(>1MΩ/Sq)改善至 19Ω/Sq，若加入 TiO<sub>2</sub>+PEDOT，則更改善至 15Ω/Sq，而三者電極層之穿透率則穩定沒變更(~80%)，當此層結合元件成為透明 OPV 時，其元件之光穿透率在 70%以上(對所有波長)，如圖 3.70，其元件在用傳統不透光鋁電極時，效率為 6.03%，而採用透明 OPV 元件時，效率則降為 4.02%(光由 ITO 端進入)或 3.82%(光從奈米銀線層進入)，如圖 3.71。

另一方面該實驗室應用全溶液製程技術至其他半導體薄膜太陽能電池之元件製作(CIGS/CISS)，在 3 年內其 CIGS/CISS 元件效率從 1%進展至 10%，如圖 3.72，值得一提的是其製作之 CIGS 元件中；傳統上使用 ZnO/ITO 電極(濺射方式製成)已被溶液製程作的透光奈米銀線層(含 TiO<sub>2</sub> 奈米粒子)取代，且其效率為 10.3%，如圖 3.73。

最後 Yang 教授以 OLED 發展經驗借鏡，來分析 OPV 是否未來會成功，他認為 1993 年 OLED 僅數小時壽命，且效能低於 10lm/watt，而現在 OLED 壽命已超過 100 K 小時，效能高於 50lm/watt，2010 年韓國 Samsung 宣佈 OLED 將是下一趨勢的顯示器，今年 LG 與 Samsung 已賣出 OLED 電視。Yang 教授期望能在 2~3 年內打破 15%的效率，如此將可發展出效率 10~12%的面板效率(panel efficiency)，在這再生能源中將有重大意義，因為 OPV 太陽能面板將可像報紙一樣印製，Yang 教授之研究團隊如圖 3.74 所示。

### (三) 半導體薄膜太陽能電池之機會及市場

矽晶型(wafer-based)及半導體薄膜型太陽能電池由於已商業化及在量產階段，其成本關鍵控制及市佔率是熱門注目點，較不像 OPV 之發展屬於前期研發及投資階段(各種前瞻開發計畫林立); 而染料敏化太陽能電池，近年來效率無顯著的突破改進，反而其化學染料分子有採用結合無機奈米粒子或以其取代趨勢(致效率降低但壽命及成本改善)。

#### 1. 市場:

2012 年是一個全球 PV 市場預測的修正年，如圖 3.75 所示，市場大小(GW)是難以預測，誘因仍然驅動需求，較去年(2011) 裝置容量市場急遽下降為(13.7GW)遠偏離預測值，日後變化亦很大。圖 3.76 顯示上個十年內 PV 模組價格的變動，從 2006 年的最高峯(\$ 3.5/W<sub>p</sub>;矽短缺所致)然後逐漸降低(主因是容量增加、台灣與大陸、較高效率與較低成本)，在 2012 年 Q2 抵達 1.05/W<sub>p</sub>(價格與朝向合併等因素)。圖 3.77 顯示半導體薄膜型太陽能電池在整個 PV 市場佔有率從 17%(2009 年)逐漸降低至 13%(2010 年)，而在 2011 年則稍微調升至 14%(容量: 3204MW)。圖 3.78 顯示 2011 年~2015 年間 CdTe,  $\alpha$ -Si 及 CIS 型太陽能電池在薄膜 PV 之比重(中程遠景預測)，薄膜矽仍然將停滯，而 CdTe 型則會緩慢逐漸增加(由於效率的限制、新廢棄物法規導致接受度問題)，特別地 CIS 型將有顯著的逐年增長幅度(由於從實驗室階段至量產移轉成功)，但是以上仍有問題，即以玻璃基板為主，而量產化可撓型的發展需要時間來成熟。

圖 3.79 顯示實驗室元件效率的發展進程(至 2012 年止)及模組效率的理想目標，圖 3.80 顯示各薄膜型電池的材料，製造難易與效率比較，CdTe(II-VI 族)容易製造，而 Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> 有最好的效率，但 In 卻是稀有元素，未來會受材料限制，而 Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>,

其成份元素便宜且豐富，但製造較困難。Manz 公司於 2012 年 8 月發佈最高之 CIGS 型模組，效率 15.9%(60 cmx120 cm；玻璃-玻璃夾層)，如圖 3.81 所示。基本上，薄膜型 PV 之挑戰在於走向高效率 PV 模組及最後成本 $<0.5 \text{ € / W}$ ，(如圖 3.82 和 3.83 所示)，以 CIGS 型為例，若其成本在  $0.5 \text{ € / W}$ ，則材料方面比重幾達一半(主要材料為玻璃、封裝、junction box 等)，未來需要創新型的模組概念以剪裁客製化需求，如圖 3.84，演講者總結薄膜 PV 之機會在於(1)較低的成本(less material、less energy、solar energy payback)，(2)應用(建物整合、質輕及可撓性模組之拓展運用)，(3)創新的潛力，其亦認為目前的障礙(hurdles)在於(1)financial、(2)production、(3)maturity 及(4)technological。

## 2. 一種薄膜型 PV 創新設計為例:

美國 Sandia National Laboratory 針對薄膜矽 PV 推出一種創新概念的產品，即超薄可撓性單晶矽迷你模組，其動機為與生活行動用品結合而推出，傳統上矽 wafer 相當於一個元件，其將矽 wafer 製成數百微元件之組成，如圖 3.85 所示，在此情況下，即使沒有光捕捉(light trapping)之外加結構，90%的光亦會被在前  $20 \mu\text{m}$  材料被吸收，而世界上其他團隊亦正嘗試製作此種小而薄的裝置，其產品外觀如圖 3.86，此種設計如同 IC 設計，如圖 3.87 所示，其原型(prototype)具很好的可撓性，如圖 3.88 和 3.89 所示，但是此產品之成本相當高是可以預期的，該團隊於此高成本強調其研發之目的是為了開發增加行動電子之應用性。

## 3. 目前的應用層面:

近十年來 PV 之生活應用層面較過去有顯著多樣化，且範圍拓展，主要原因，過去十年前工程師並未與建設師在思維差異上有效溝通，如圖 3.90 示，建築師目前已有清楚的認同及配合去作推廣，而工程師可盡量提供技術層面的資訊，如圖 3.91、3.92 及 3.93(鐵道旁隔音牆)所示。另一方面，歐洲目前已整合 PV 及太陽熱(solar thermal)系統成為建物整合太陽能科技(Building Integrated Solar Technology；簡稱:BIST)，如圖 3.94 所示。

## 4. 展覽會之展品及交流:

Heliatek公司之展品可謂本次OPV之代表作，圖3.95為藍色OPV(玻璃基板，效率8.5%)，圖3.96為半透明藍色OPV(玻璃基板，效率6.4%)，圖3.97為可撓式OPV(PET塑膠

基板，~5%)，圖3.98及3.99為透明塑膠基板之OPV(效率2.8%)。

Heliatek之三者不同OPV展品雖隨著可撓性及透明性功能的增加，而效率降低，但是三者皆應有其市場需求面，並非效率為唯一考量因素，特殊功能性有時可超出成本因素。Solliance計畫在展場亦有攤位卻無展品，可是卻樂觀地用文宣品及大幅海報描述他們從矽晶型進入半導體薄膜的過去經驗以及如何利用過去的技術來開發未來OPV之產品及市場，看好此OPV之應用；先前世界上唯一發表商業化OPV的公司(美國KONARKA Technology Inc.)雖已今年倒閉，但是其在歐洲亦有獨立的分支公司(KONARKA Technology GmbH)將繼續發展並且併入於德國公司(Belectric OPV GmbH)。展場上亦有薄膜矽太陽能電池的功能性應用，廠商將其製作成有可撓性且原型為波浪狀的基板上，波浪狀可增加不同方向之入射光有效吸收(不使用追蹤器)，可以看出日後市場需求已從太陽光發電系統走入日常生活應用層面。

#### 5. 未來商品化的趨勢及應變---以銅膠發展為例

目前太陽能電池主要還是由矽晶材料所製作，其製作成本目前已降至~0.7 USD/W(多晶矽 2012 年 9 月已降至 1 公斤 20 美元)，2014 年朝~0.5 USD/W 邁進，如圖 3.100 所示；因此對其他薄膜型太陽能電池造成莫大壓力，2009-2011 薄膜型太陽能電池佔 PV 市場的比例從 17%降至 13-14%，如圖 3.77 所示；其中 CdTe 從 13%降至 8%，amorphous Si 維持 3%，CIGS 從 1%升至 2-3%，目前皆致力於進一步降低成本，在材料方面，由於 Ag pastes & inks 佔整個 Si Solar cell 成本約 25%(見圖 3.101)，因此擬發展 Cu pastes 取代以大幅降低成本(見圖 3.102)，過去曾嘗試使用 Cu-Ag Core-Shell particles 方式，但在空氣中會有氧化與聚集現象發生(見圖 3.103、104 及 105)，一般傳統 Cu pastes 即使在氮氣中也會氧化(見圖 3.106)，但日本 Tohoku University 宣稱已發展出易燒結、不易氧化與低電阻之新的 Cu pastes(見圖 3.107)，此外亦發展出 barrier 可以阻止 Cu 擴散至 Si 且有很好的 ohmic contact(見圖 3.108)，由此可見 Cu pastes 似乎發展成功，未來可以在 Solar cell 製造成本降低面佔一席之地。在製程方面，擬採非真空全溶液製程為其主要發展方向，以有機太陽電池(OPV)為例，未來採用非真空全溶液 Roll to Roll 製程，有機會降至 0.2 USD/W。

## 四、 建議事項

- (一) 由於受到世界經濟不景氣的影響，本屆展覽參展廠商家(656家)比前年少了約1/3，但仍吸引 31,500人到場參觀，世界各國專家與會代表亦有4,024員，主要研討方向為如何進一步降低成本，在材料端如使用銅膠代替銀膠，在製程端為發展非真空全溶液製程與ITO free新型透光電極製程技術，與本所製程研發方向不謀而合，因此本所仍應繼續朝此一研發方向努力發展。
- (二) OPV的主要領導廠商Konarka，雖然今年在此次太陽能不景氣的聲浪中破產，然其歐洲德國分公司已被Belectric OPV GmbH取得並繼續發展，此外法國Amor最近亦宣佈將投資1千4百萬歐元在OPV上，加上歐洲亦成立很多整合型計劃繼續發展OPV，顯然大多數與會專家仍持續看好OPV未來的發展，因此建議本所仍應投入適當之基本人力與物力，切入關鍵之卷對卷(R2R)製程技術，以為後續時機成熟時，有機會進入國際OPV市場。
- (三) OPV由於屬高度前瞻技術並具挑戰性，與其他有能力之研究機關和公司成立合作聯盟，如同國際型之研究計畫現況發展，可以在有限的人力條件下得到最佳化的進展，建議利用各種機會或本所之地位，主動整合上中下游及水平方向的產業學界以發展OPV。
- (四) 在OPV發展技術中，雖然最後目標為元件模組商品之製程開發，但是部份獨特性的關鍵技術或材料製程的掌握建立，卻也等同重要甚或在獲利層面較大，因為這些關鍵技術或材料其市場為全世界OPV製造公司或者所有商品之一部份，建議研究計畫團隊在績效上並非專注單元件效率值、產品功能性及達成度(或是技轉金)，潛在型的核心專利也相同重要。
- (五) 未來OPV市場將逐漸步入日常生活應用，其功能性及應用結合性可能與成本效率考量因素等同重要，故開發產品之應用設計及其獨特功能性為未來必須考量之一點。



圖 2.1 歐洲太陽能國際研討暨展覽會(27th EU PVSEC)，研討會會場情景



圖 2.2 歐洲太陽能國際研討暨展覽會(27th EU PVSEC)，展覽會場情景



# Bi-hierarchical Nanostructures of Donor-acceptor Copolymer and Fullerene for High Efficient Bulk Heterojunction Solar Cells

Huan-Chung Liao,<sup>1</sup> Cheng-Si Tsou,<sup>2</sup> Charn-Ying Chen,<sup>3</sup> Yu-Tsun Shao,<sup>3</sup> Sheng-Ying Chang,<sup>3</sup> Yu-Ching Huang,<sup>3</sup> Chih-Min Chang,<sup>2</sup> Tsung-Hsin Lin,<sup>4</sup> Chuan-Jen Su,<sup>1</sup> Li-Jer Jinn,<sup>4</sup> Yang-Fang Chen,<sup>2</sup> and Wei-Fang Su<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Science and Engineering, National Taiwan University, Taipei 106-17, Taiwan  
<sup>2</sup> Institute of Nuclear Energy Research, Longtan, Taoyuan 325-46, Taiwan  
<sup>3</sup> Department of Physics, National Taiwan University, Taipei 106-17, Taiwan  
<sup>4</sup> National Synchrotron Radiation Research Center, Hsinchu, 300-77, Taiwan



Corresponding: susf@ntu.edu.tw  
 hollan@ntu.edu.tw

## Abstract

Solvent additive processing has become the most effective method to tune the nanostructure of donor-acceptor (D-A) type copolymer/fullerene bulk heterojunctions (BHJs) solar cells for improving power conversion efficiencies. However, to date qualitative microscopic observations reveal discrepant results on the effects of solvent additives. Here, we present quantitative evolutions of bi-hierarchical nanostructure of D-A copolymers and fullerenes (i.e. a binary phase system with surrounding matrix) by employing grazing-incidence small/wide angle X-ray scattering (GISAXS/GIWAXS) technique and (2,6-bis(4-tolylthio)-4H-cyclopenta[2,1-b:3,4-b']-dithiophene)-alt-4,7-(2,1,3-benzoxadiazole)[6,6]-phenyl-C<sub>61</sub>-butyric acid methyl ester (PCPDTBT/PCBM) BHJ as model materials. An accurate GISAXS model analysis is established herein for revealing the distinctive bi-hierarchical nanostructures from molecular level to hundreds of nanometer scale. The mechanisms of hierarchical formation and mutual influence between PCPDTBT and PCBM domains are proposed to correlate with photovoltaic properties. These results provide a comprehensive interpretation in respect to previous studies on the nanostructures of D-A copolymer/fullerene BHJs. It is helpful for optimum structural design and associated synthesis improvement for achieving high efficiency BHJ solar cells.

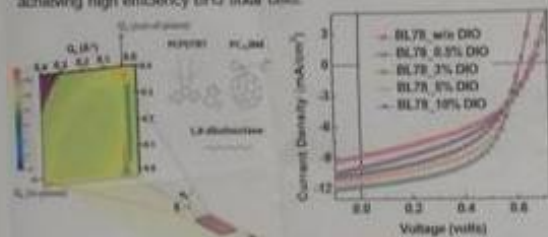


Fig. 1 Photovoltaic energy conversion efficiency and current density-voltage curves of PCPDTBT/PCBM BHJ solar cells processed without and with different amount of DIO.

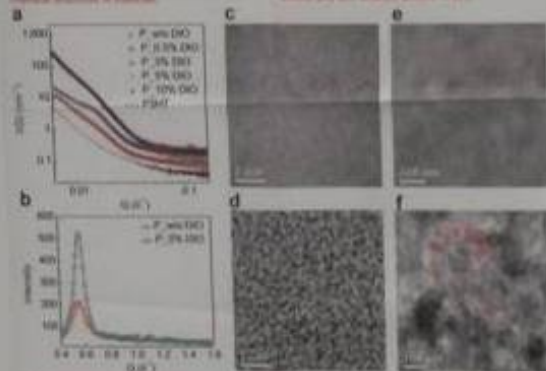


Fig. 2 (a) GISAXS profiles of PCPDTBT domains processed without and with 0.5%, 3%, 5%, 10% DIO. (b, c, d) AFM images of PCPDTBT domains processed without (b) and with 3%, 5%, 10% DIO respectively. The legend shows regions for red circles as PCPDTBT aggregated particles, for blue circles as PCPDTBT primary particles with size of ~20 nm for comparison against PCPDTBT domain size.

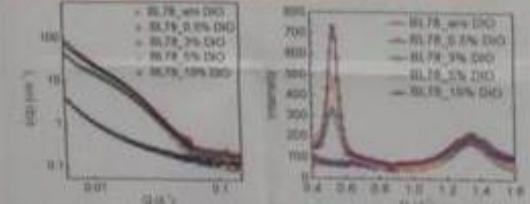


Fig. 3 (a) AFM images and (b) GISAXS profiles of PCPDTBT domains processed without and with 0.5%, 3%, 5%, 10% DIO respectively.

Sample	PCBM (%)	PCBM <sub>1</sub> (nm)	PCBM <sub>2</sub> (nm)	PCBM <sub>3</sub> (nm)	PCBM <sub>4</sub> (nm)	PCBM <sub>5</sub> (nm)	PCBM <sub>6</sub> (nm)	PCBM <sub>7</sub> (nm)	PCBM <sub>8</sub> (nm)	PCBM <sub>9</sub> (nm)	PCBM <sub>10</sub> (nm)
BL78_w/o DIO	4%	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64
BL78_0.5% DIO	4%	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64	~64
BL78_3% DIO	3%	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100
BL78_5% DIO	3%	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100
BL78_10% DIO	3%	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100	~100

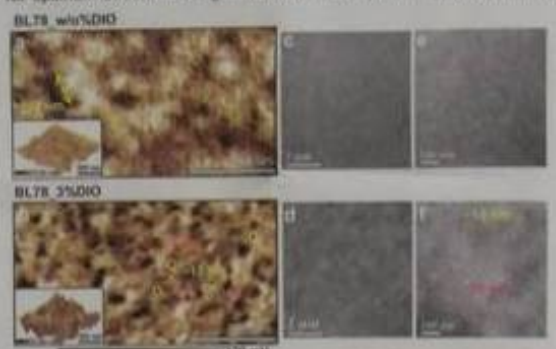


Fig. 4 (a-e) AFM images of BL78 domains of BL78\_w/o DIO and BL78\_0.5%, 3%, 5%, 10% DIO respectively. The indicated scale height is 20 mV. The scale bar is 20 nm. The inset shows the enlarged image of the domain. The legend shows regions for red circles as BL78 aggregated domains with broad distribution (D<sub>BL78</sub> = 100 nm), for blue circles as BL78 primary particles with narrow distribution (D<sub>BL78</sub> = 20 nm) and for green circles as PCPDTBT primary particles (~20 nm) and PCBM facial aggregation (~10 nm) respectively.

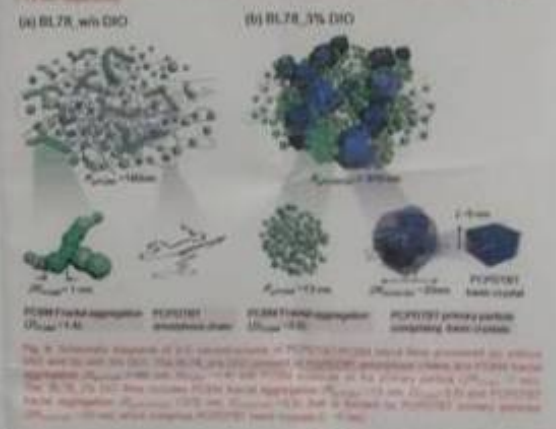


Fig. 5 Schematic diagrams of PCPDTBT and PCBM aggregation. (a) BL78\_w/o DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation. (b) BL78\_3% DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation. (c) BL78\_5% DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation. (d) BL78\_10% DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation.



Fig. 6 Schematic diagrams of PCPDTBT and PCBM aggregation. (a) BL78\_w/o DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation. (b) BL78\_3% DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation. (c) BL78\_5% DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation. (d) BL78\_10% DIO shows PCPDTBT primary particles and PCBM facial aggregation.

## Acknowledgement

This work was supported by the National Science Foundation of Taiwan (NSC102-2311-B-002-001-001-001) and the National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) (102-0-001-001-001-001).

圖 2.3 核研所與台大材料系共同發表之高分子太陽能電池壁報論文

## Conference Programme Outline

Monday, 24 September	Tuesday, 25 September	Wednesday, 26 September	Thursday, 27 September	Friday, 28 September
<p>08:30 Conference Opening 1AP.1 Plenaries</p> <p>11:30 International Addresses and Keynote Hall Harmonie</p> <p>12:00 Lunch</p> <p>13:30 2AO.1 T2.2 Harmonie 2AO.4 T2.2 Panorama 1 2AO.7 T1.2 Panorama 2 2AO.8 T1.2 Poster Area 1 2AO.9 T1.2 Poster Area 2 2AO.3 T2.2 Harmonie 2AO.5 T2.2 Panorama 1 2AO.8 T1.2 Panorama 2 2AO.9 T1.2 Poster Area 1 2AO.3 T2.2 Harmonie 2AO.5 T2.2 Panorama 1 2AO.8 T1.2 Panorama 2 2AO.9 T1.2 Poster Area 1</p>	<p>08:30 2EP.1 Plenaries Harmonie 1</p> <p>09:00 Break</p> <p>09:30 2BO.1 T2.1 Harmonie 2 2BO.5 T2.1 Harmonie 1 2BO.8 T1.1 Panorama 1 2BO.9 T1.1 Poster Area 1 2BO.10 T1.1 Poster Area 2 2BO.3 T2.4 Harmonie 2 2BO.7 T2.2 Harmonie 1 2BO.8 T2.2 Panorama 1 2BO.9 T1.4 Panorama 1 2BO.10 T1.4 Poster Area 1 2BO.4 T2.3 Harmonie 2 2BO.8 T2.2 Harmonie 1 2BO.9 T1.4 Panorama 1 2BO.10 T1.4 Poster Area 1</p>	<p>08:30 3CO.1 T3.1 Harmonie 1 3CO.5 T5.1 Harmonie 2 3CO.8 T4.1 Panorama 1 3CO.10 T2.3 Panorama 2 3CO.11 T3.3 Poster Area 1 3CO.12 T3.3 Poster Area 2 3CO.3 T3.3 Harmonie 1 3CO.7 T5.1 Harmonie 2 3CO.11 T4.1 Panorama 1 3CO.15 T2.1 Panorama 2 3CO.4 T3.3 Harmonie 1 3CO.8 T5.1 Harmonie 2 3CO.12 T4.3 Panorama 1 3CO.16 T2.1 Panorama 2 3CO.4 T3.3 Harmonie 1 3CO.8 T5.1 Harmonie 2 3CO.12 T4.3 Panorama 1 3CO.16 T2.1 Panorama 2</p>	<p>08:30 2OP.1 Plenaries Harmonie 1 2OP.14 T1.3 Harmonie 2 2OP.17 T2.2 Poster Area 1</p> <p>09:00 Break</p> <p>09:30 4OP.2 Plenaries Harmonie 1</p> <p>10:00 5OP.3 Plenaries Harmonie 1</p> <p>11:00 Lunch</p> <p>11:30 2DO.1 T2.4 Harmonie 1 4DO.4 T4.2 Panorama 1 5DO.7 T2.2 Panorama 1 4DO.11 T8.2 Harmonie 2 2DO.2 T2.4 Harmonie 1 4DO.5 T4.1 Panorama 1 2DO.8 T2.2 Panorama 1 4DO.13 T8.2 Harmonie 2 2DO.3 T2.3 Harmonie 1 4DO.8 T4.1 Panorama 1 5DO.8 T5.3 Panorama 1 3DO.13 T3.3 Harmonie 2 2DO.4 T2.4 Poster Area 1</p>	<p>08:30 4EO.1 T6.4 Harmonie 1 2EO.2 T2.2 Harmonie 2 4EO.3 T4.1 Panorama 2</p> <p>09:00 Break</p> <p>09:30 5EP.1 Plenaries Harmonie 1</p> <p>10:00 Break</p> <p>11:00 Closing Session Hall Harmonie 1</p>
	EU PVSEC Welcome Reception		EU PVSEC Dinner Party	

<b>Topics / Subtopics</b>	<b>1 Material Studies, New Concepts and Ultra-High Efficiency</b> T1.1 Fundamental Material Studies T1.2 New Materials, Cells and Modules T1.3 Solar Cells, Modules and PV Systems for Space Applications T1.4 Terrestrial Concentrator Systems	<b>4 Components for PV Systems</b> T4.1 PV Modules T4.2 Balance of System Components T4.3 Standardisation
	<b>2 Wafer-Based Silicon Solar Cells and Materials Technology</b> 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	<b>5 PV Systems</b> T5.1 Large PV Power Plants and Distributed PV: System Aspects and Grid Integration T5.2 PV and Architecture T5.3 Off-grid Applications
	<b>3 Thin Film Solar Cells</b> T3.1 Thin Film Crystalline Silicon Solar Cells T3.2 Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells T3.3 CdTe, CIS and Related Ternary and Quaternary Thin Film Solar Cells T3.4 Organic-based PV	<b>6 PV - a Major Electricity Source</b> T6.1 Markets T6.2 PV in the Electricity Mix T6.3 Sustainability Aspects T6.4 PV Globalisation, Policies and Administrative Barriers

**Conference Plenary / Oral Sessions**

**PIO** Conference Plenary and Oral Sessions take place in the Congress Centre Level C2 - **Harmonie (1 + 2)** and Forum Level 1 - **Panorama (1 + 2)**

**Conference Posters / Visual Presentations**

**V** Visual Sessions; Visual Presentations take place in the **Poster Area 1** located in Hall 5.1 and **Poster Area 2** located in the Forum

**Day Codes**

**A** Monday, 24 September  
**B** Tuesday, 25 September  
**C** Wednesday, 26 September  
**D** Thursday, 27 September  
**E** Friday, 28 September

**Session Type**

**P** Plenary Sessions  
**O** Oral Sessions  
**V** Visual Sessions

圖 2.4 會議議程概要



圖 3.1 歐洲整合型計畫 X10D 組織成員

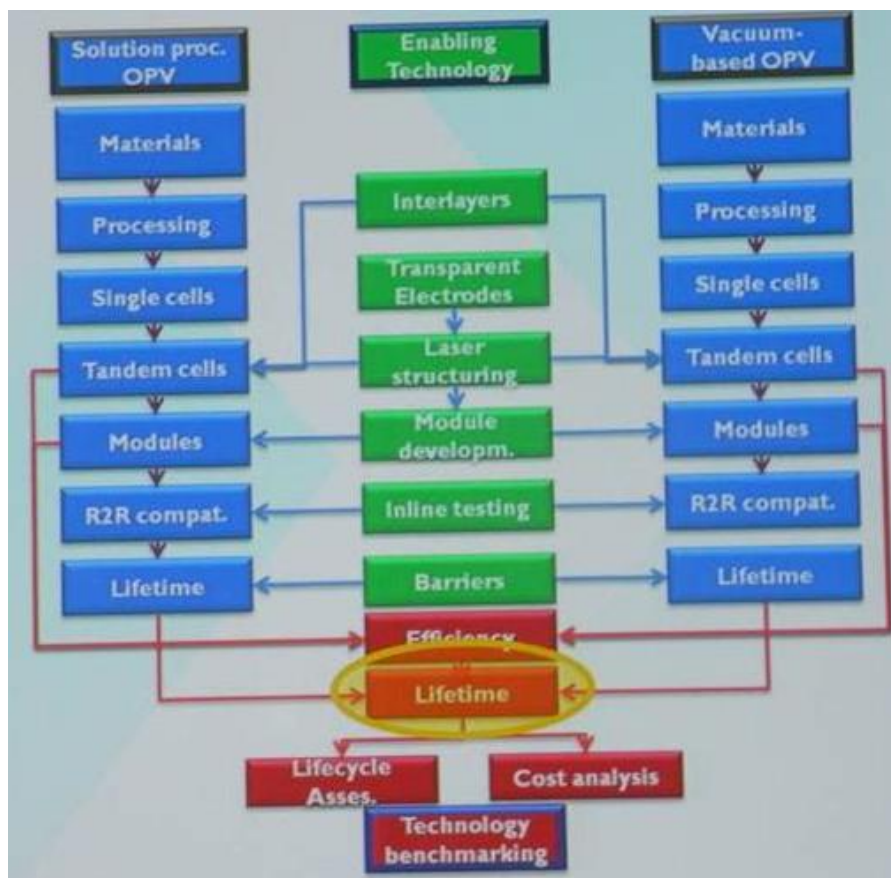


圖 3.2 X10D 計畫整合製程與科技之流程圖



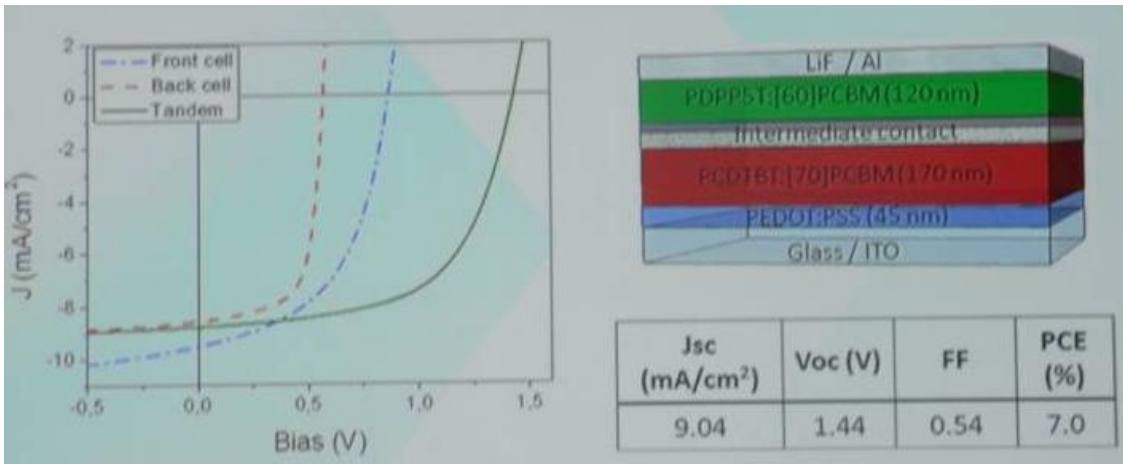


圖 3.3 X10D 計畫驗證溶液製程之 tandem 元件

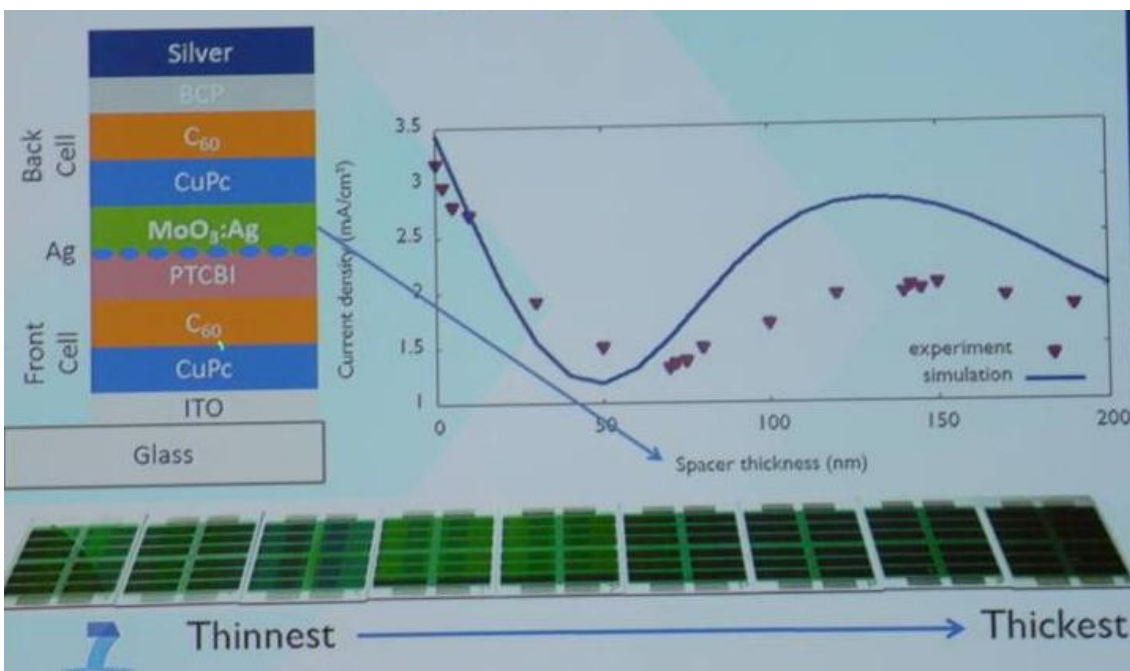


圖 3.4 X10D 計畫驗證真空鍍層製程之小分子 tandem 元件之交界面層厚度對效率關係

	Air stability	Heat stability	Light stability
Light	x	x	1 sun
Temperature	x	25, 45, 65, 85 and 150°C	35-45°C
Atmosphere	Air or controlled humidity	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Load	x	x	x
Data logging	Daily, Weekly	Daily, Weekly	30 min

圖 3.5 針對(1)光(2)熱(3)空氣影響之三種基本測試條件

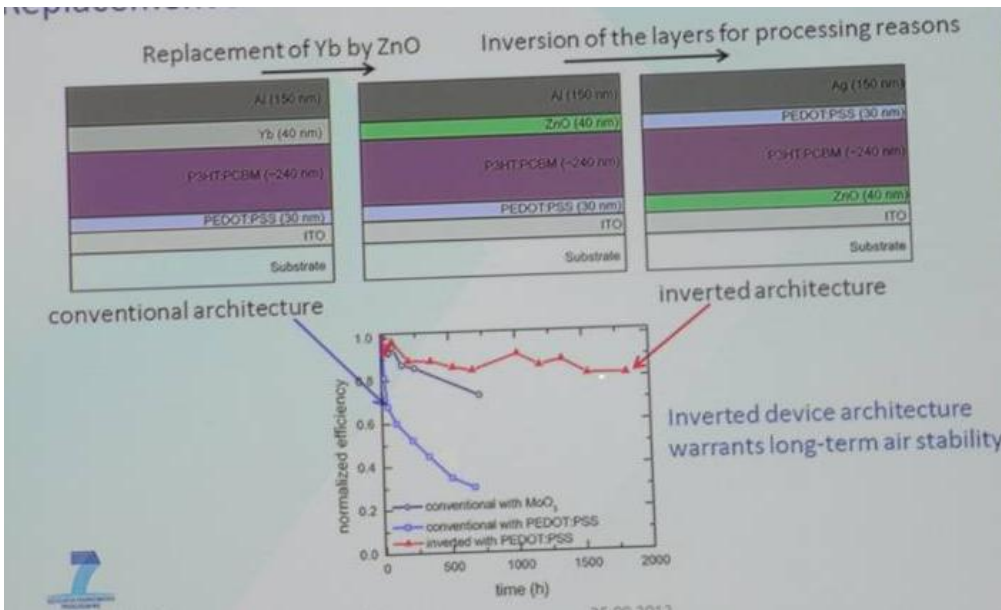


圖 3.6 X10D OPV 之反式結構元件壽命之改進

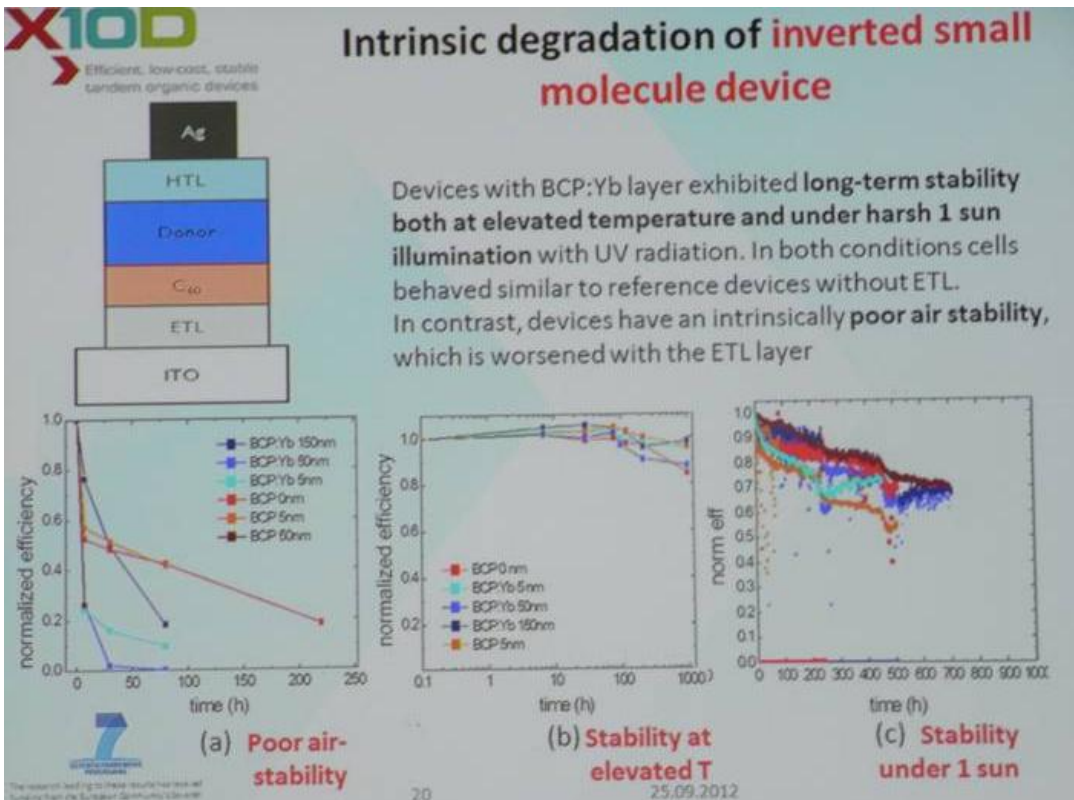


圖 3.7 內部機制(不良空氣穩定度所造成)驗證

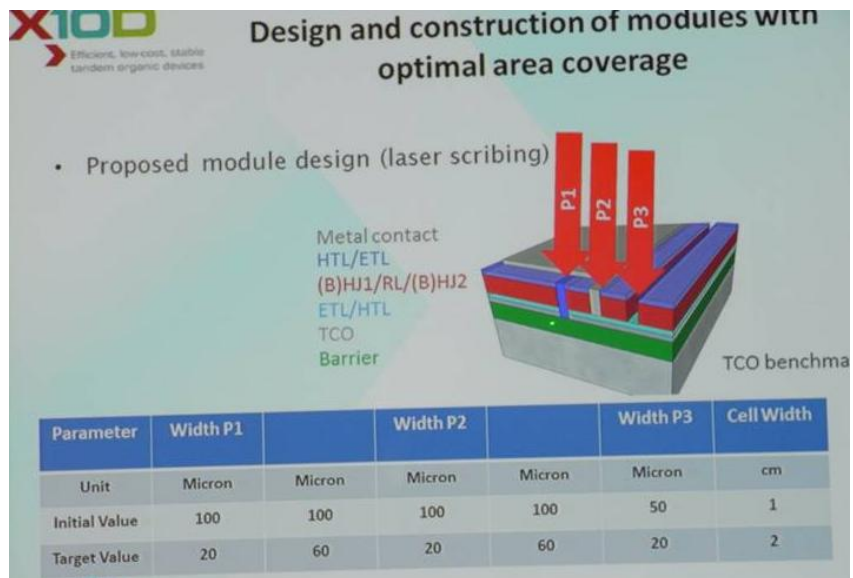


圖 3.8 最佳覆蓋面積的模組設計

- The Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (EOS, FKz 03X3516D),
- The DFG within the SPP 1355/TRAPOS

Bundesministerium für Bildung und Forschung

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

We thank our collaboration partners from the EOS project, especially the partners in the work package tandem cells:

- Konarka
- Merck
- LTI/KIT

KONARKA<sup>®</sup> MERCK KIT  
Karlsruhe Institute of Technology

ZSW

圖 3.9 ZSW 研究團隊組成

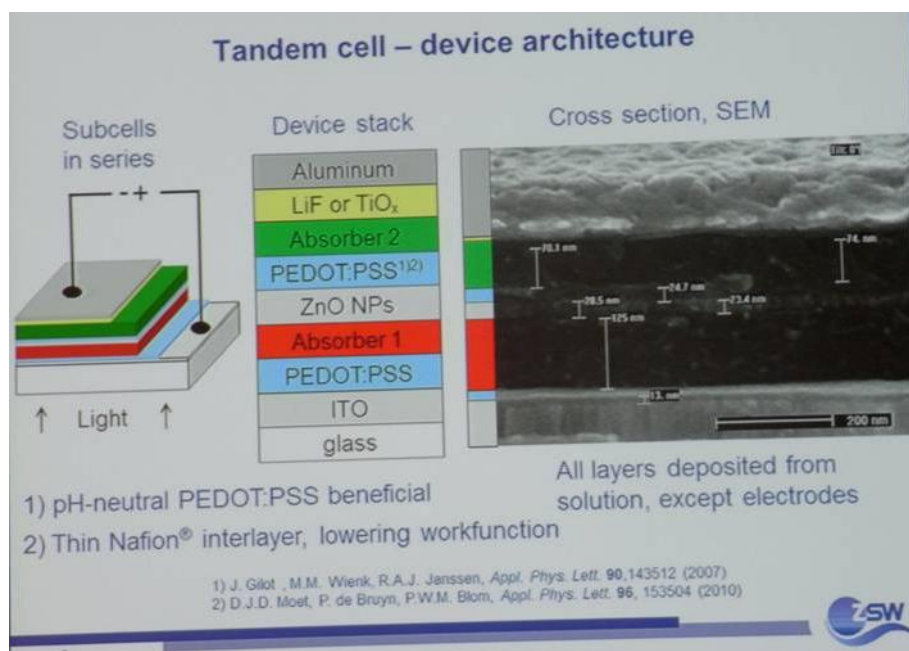


圖 3.10 ZSW tandem 元件設計



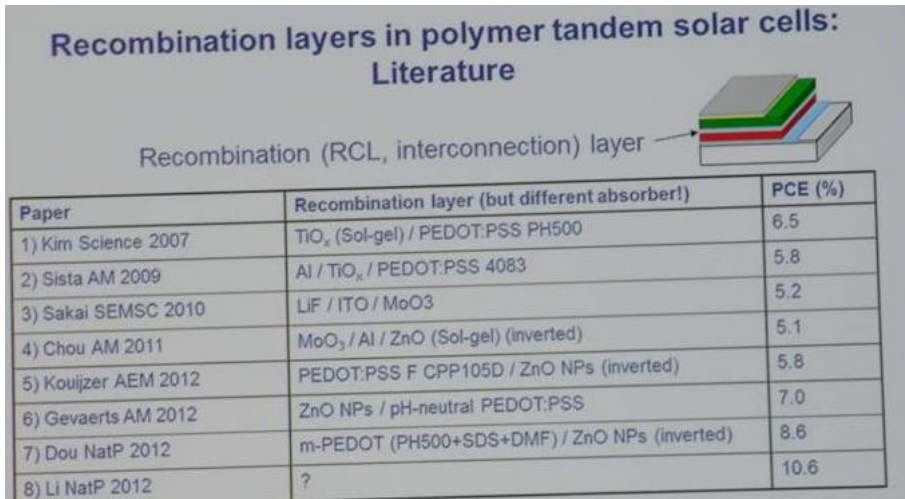


圖 3.11 不同連接層造成效率影響之文獻整理

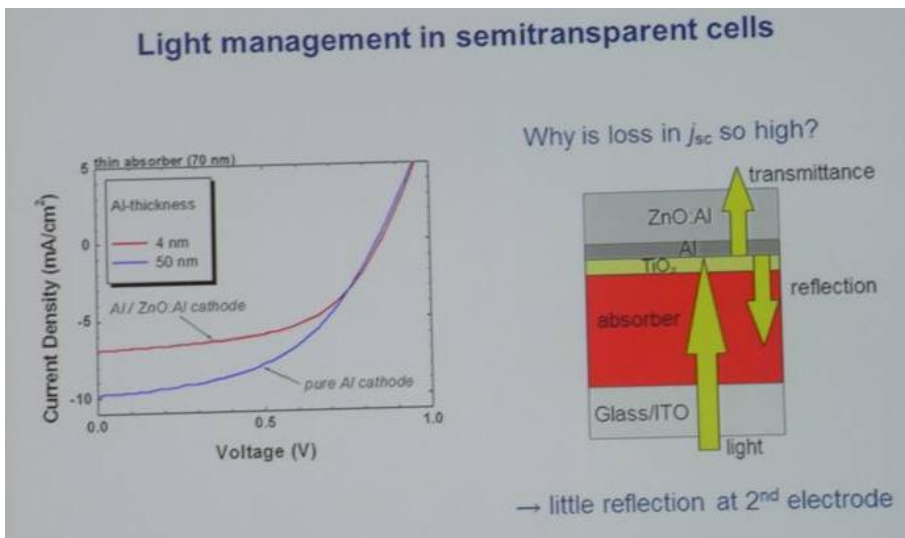


圖 3.12 2SW 半透光元件之光管理

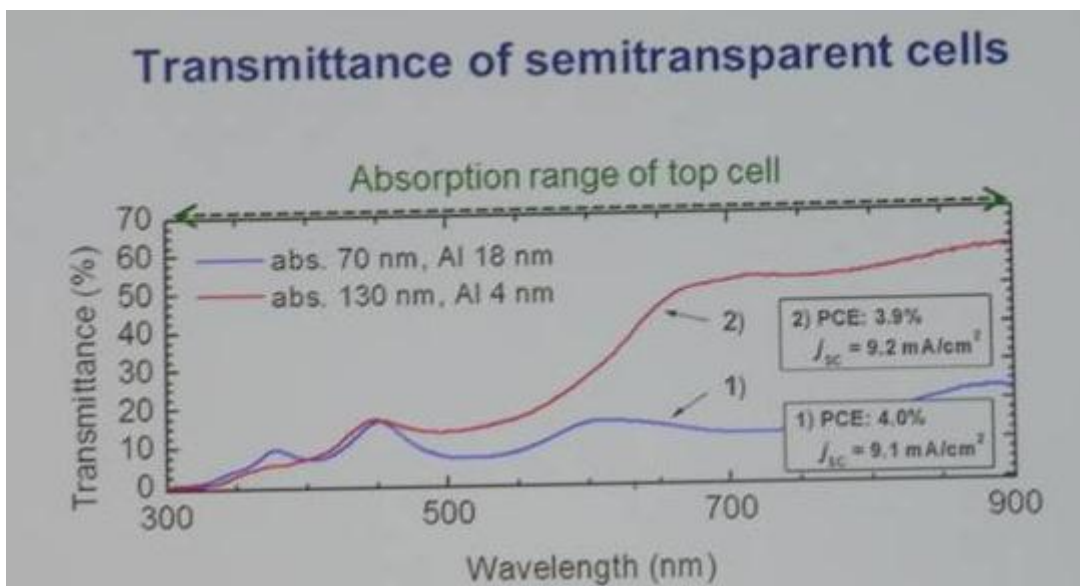


圖 3.13 主動層與 Al 層交界層厚度對效率及透光性影響

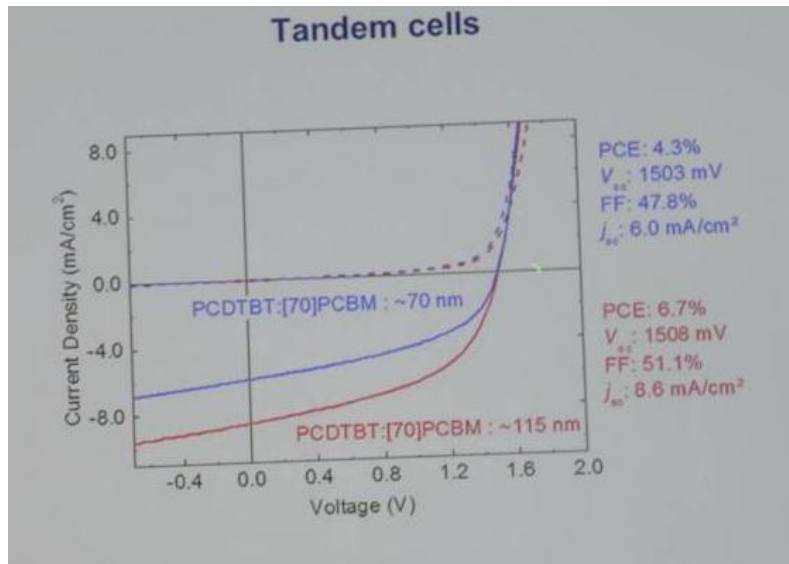


圖 3.14 不同主動層(第一元件)厚度對效率影響

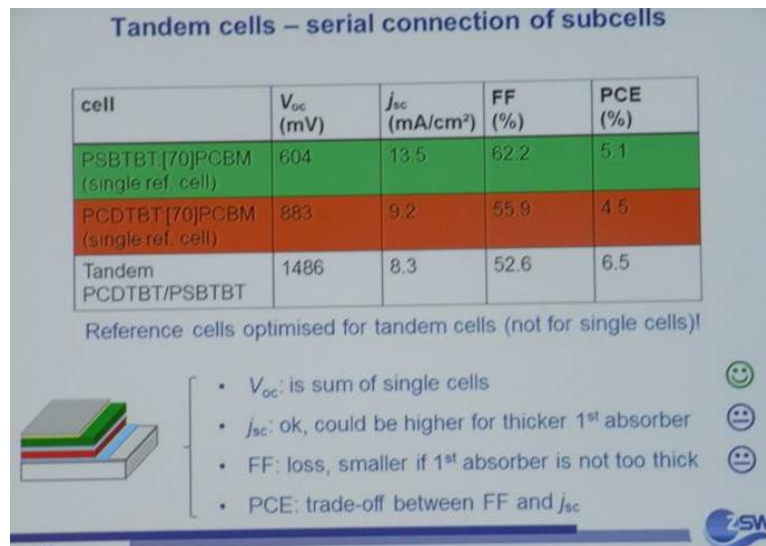


圖 3.15 串聯之 tandem 元件



圖 3.16 Heliatek 四項核心能力



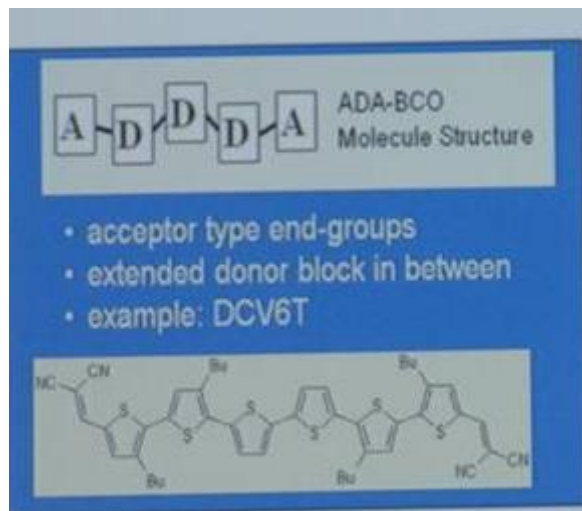


圖 3.17 Heliatek 小分子結構圖

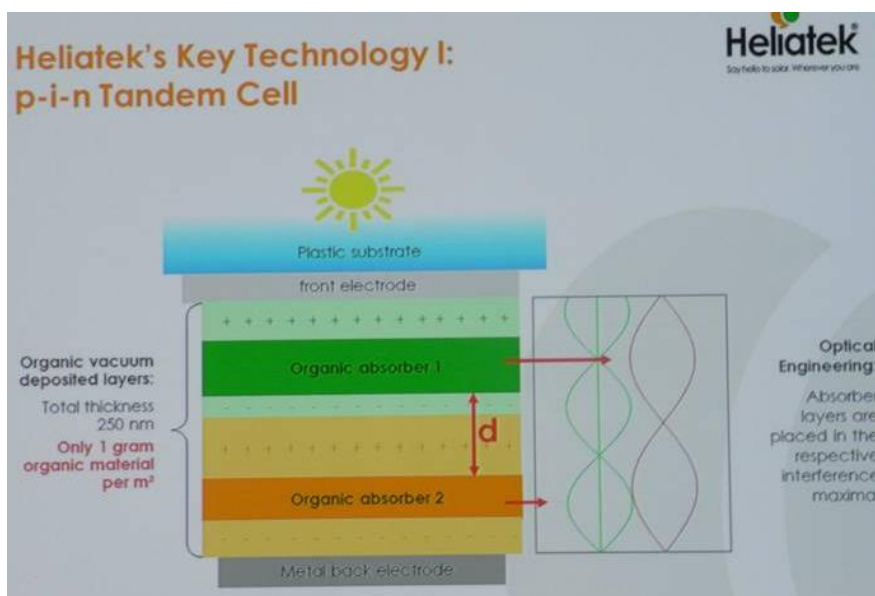


圖 3.18 Heliatek p-i-n tandem 元件結構示意圖

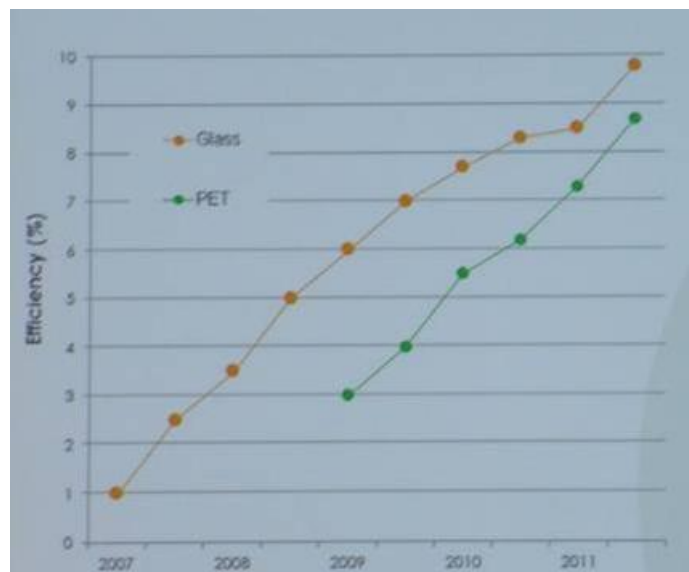


圖 3.19 Heliatek 使用不同基板造成微小效率損失

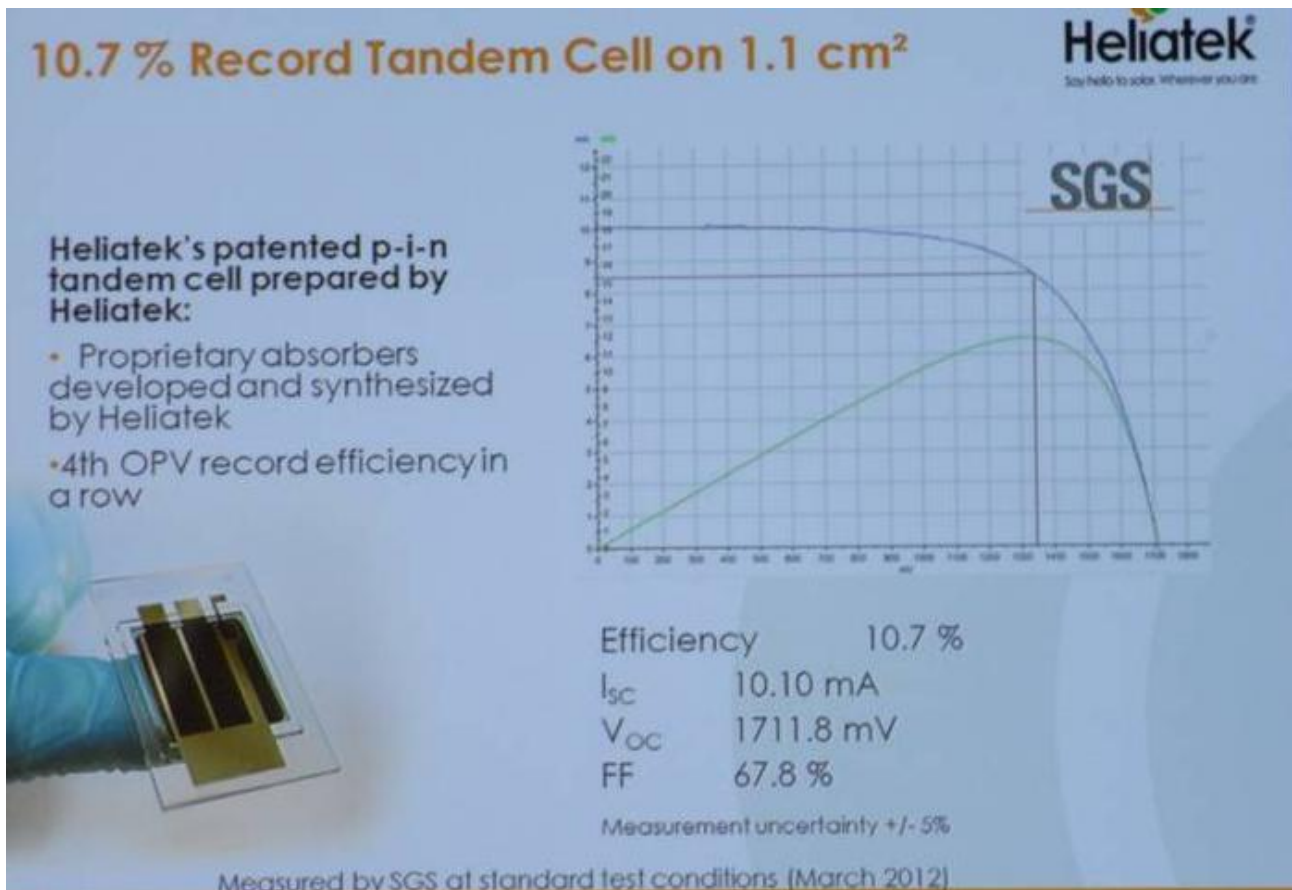


圖 3.20 Heliatek tandem 元件效率之驗證

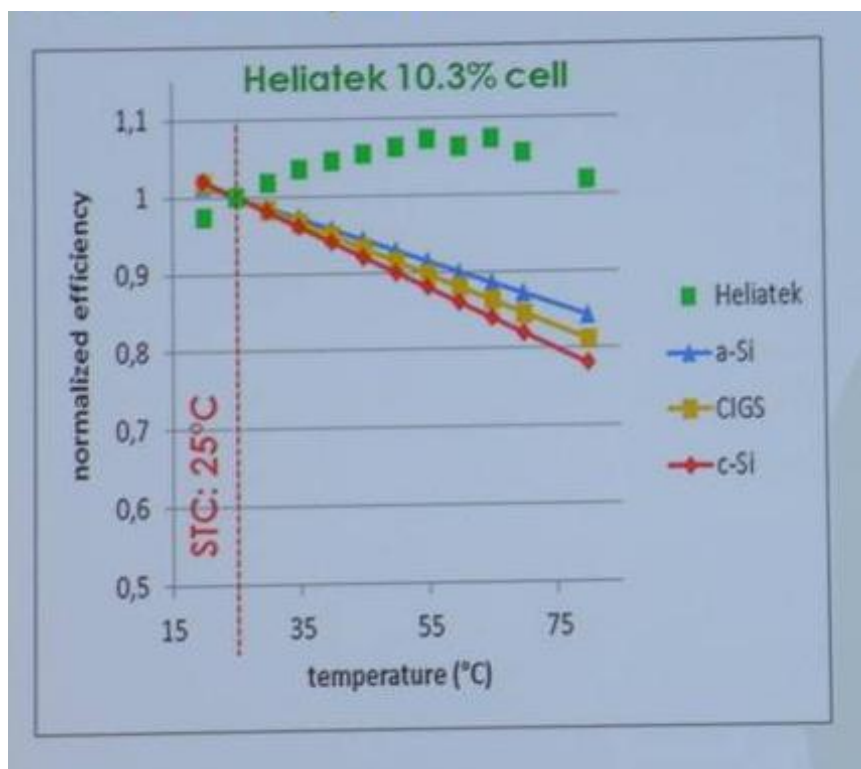


圖 3.21 Heliatek 元件壽命之正溫度效應

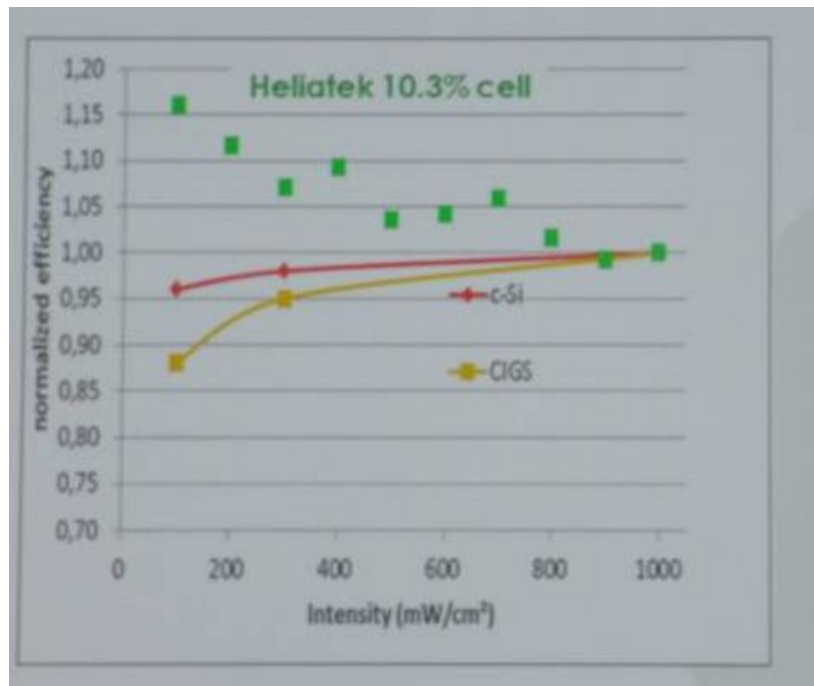



圖 3.22 Heliatek 元件在弱光照度下之效率影響效應

## 142 cm<sup>2</sup>-Module on Glass

Record efficiencies thanks to minimum upscaling losses



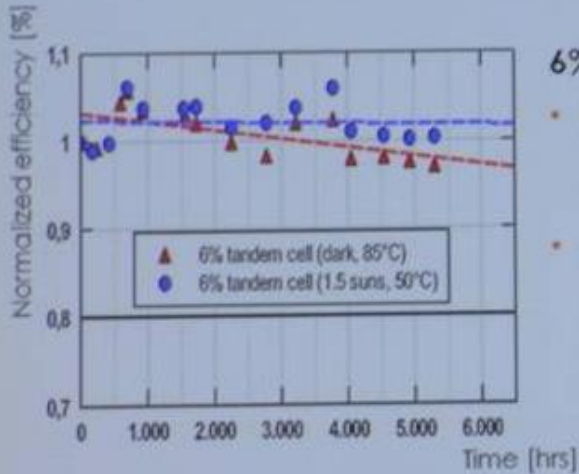
7 Cells in Series	Active Area 122 cm <sup>2</sup>	Total Area 142 cm <sup>2</sup>
V <sub>oc</sub>	11.8 V	11.8 V
V <sub>oc</sub> per cell	1.67 V	1.67 V
J <sub>sc</sub> mA/cm <sup>2</sup>	1.21	1.04
FF	63 %	63 %
<b>Efficiency</b>	<b>9.0 %</b>	<b>7.7 %</b>

**Efficiency on active area: 9,0 %**

93 % of 1cm<sup>2</sup>-efficiency preserved on 142 cm<sup>2</sup> in spite of thickness inhomogeneities ~10 %

圖 3.23 Heliatek 模組之效率驗證

## Lifetime: Stable Oligomer Cells

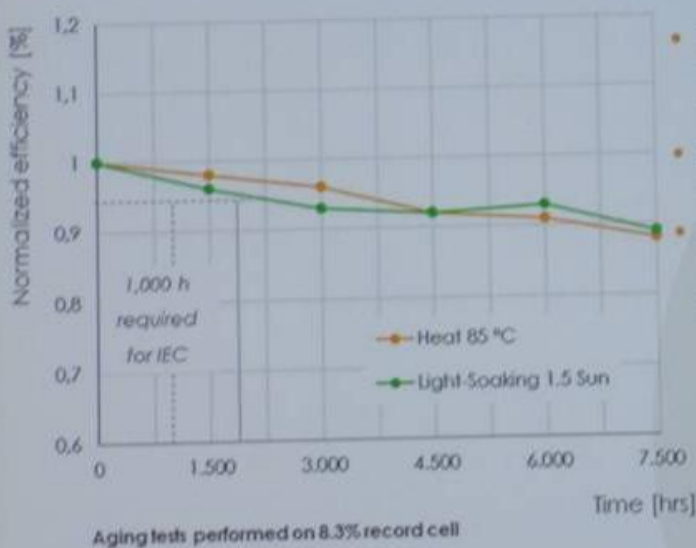


6%:

- In intense white light illumination (tungsten halogen lamp, corresponding to ~1.5 suns)
- At 85 °C

圖 3.24 Heliatek 元件之高溫照光壽命測試

## Lifetime: Stable Oligomer Cells



8.3%:

- Extrapolated light soaking lifetime T80: 13,600 h (equals approx. 24 yrs.)
- Extrapolated heat lifetime T80: 12,200 h
- Also the 9.8 %-cell can stand 1,000 h at 85 °C with less than 5 % degradation

圖 3.25 Heliatek 高效率元件之連續照光壽命測試



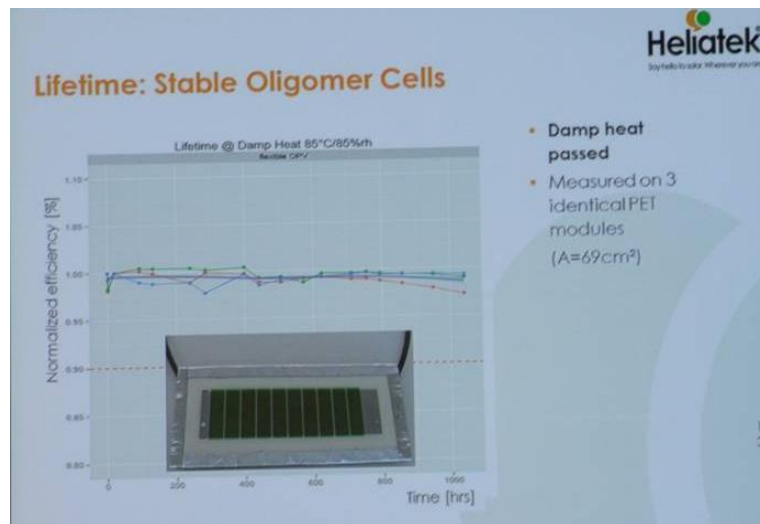


圖 3.26 Heliatek 模組之高溫高溼下壽命測試

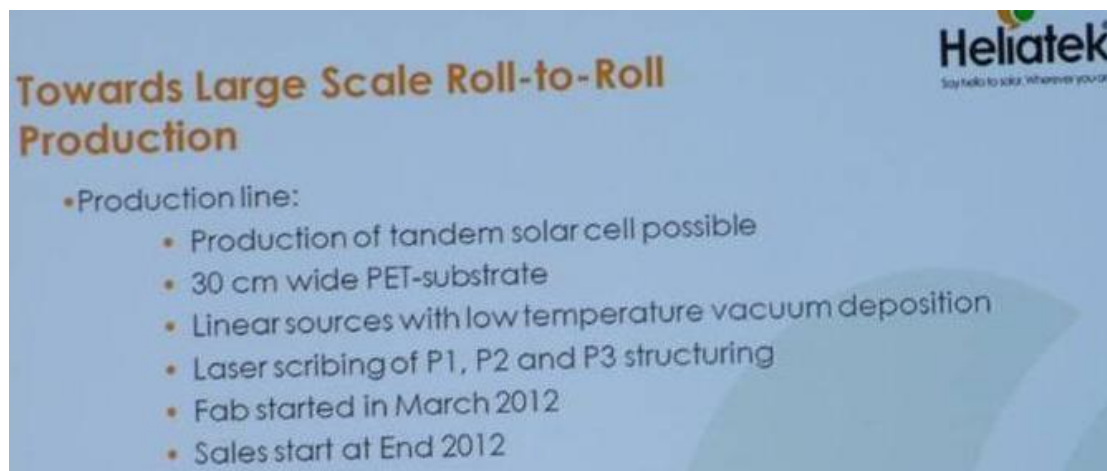


圖 3.27 Heliatek 量產滾製生產線目標

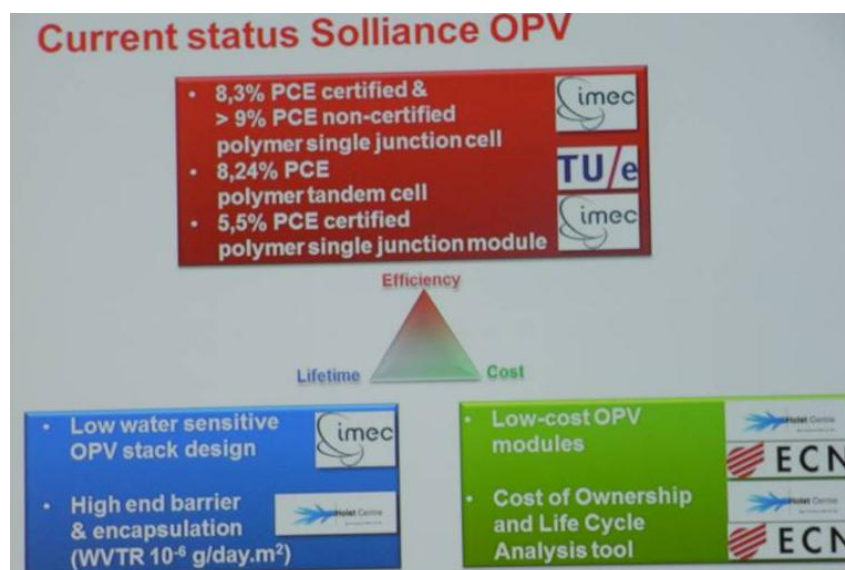


圖 3.28 Solliance 計畫之組成成員及其分工結果

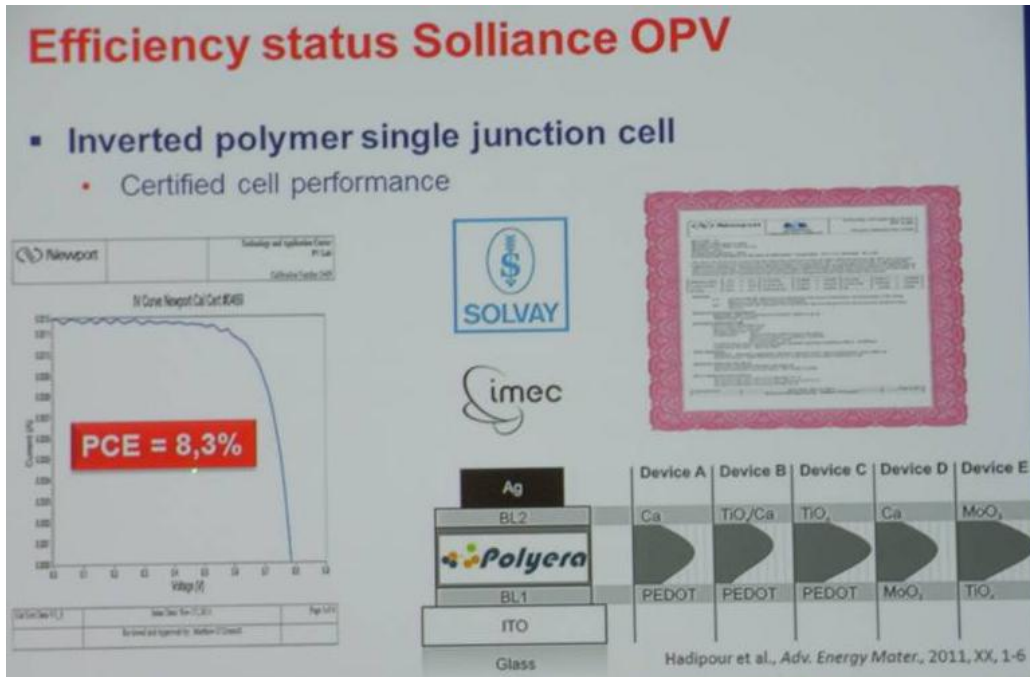


圖 3.29 Solliance 計畫 tandem 元件效率驗證

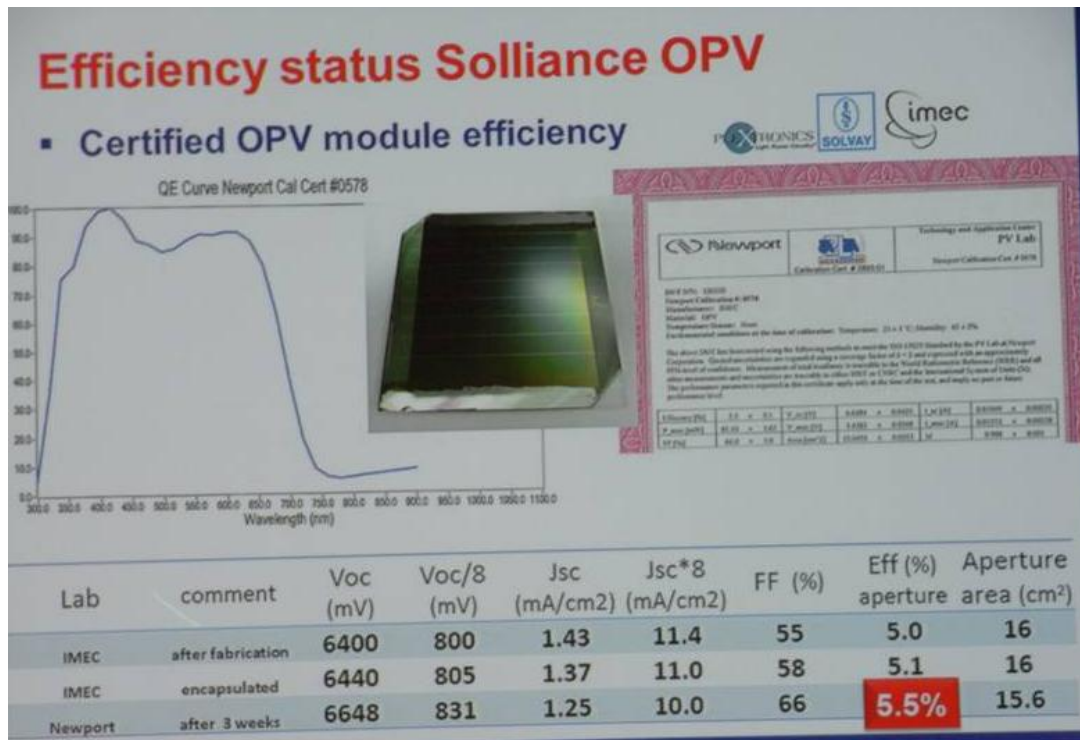


圖 3.30 Solliance 計畫 OPV 模組效率驗證及製造影響

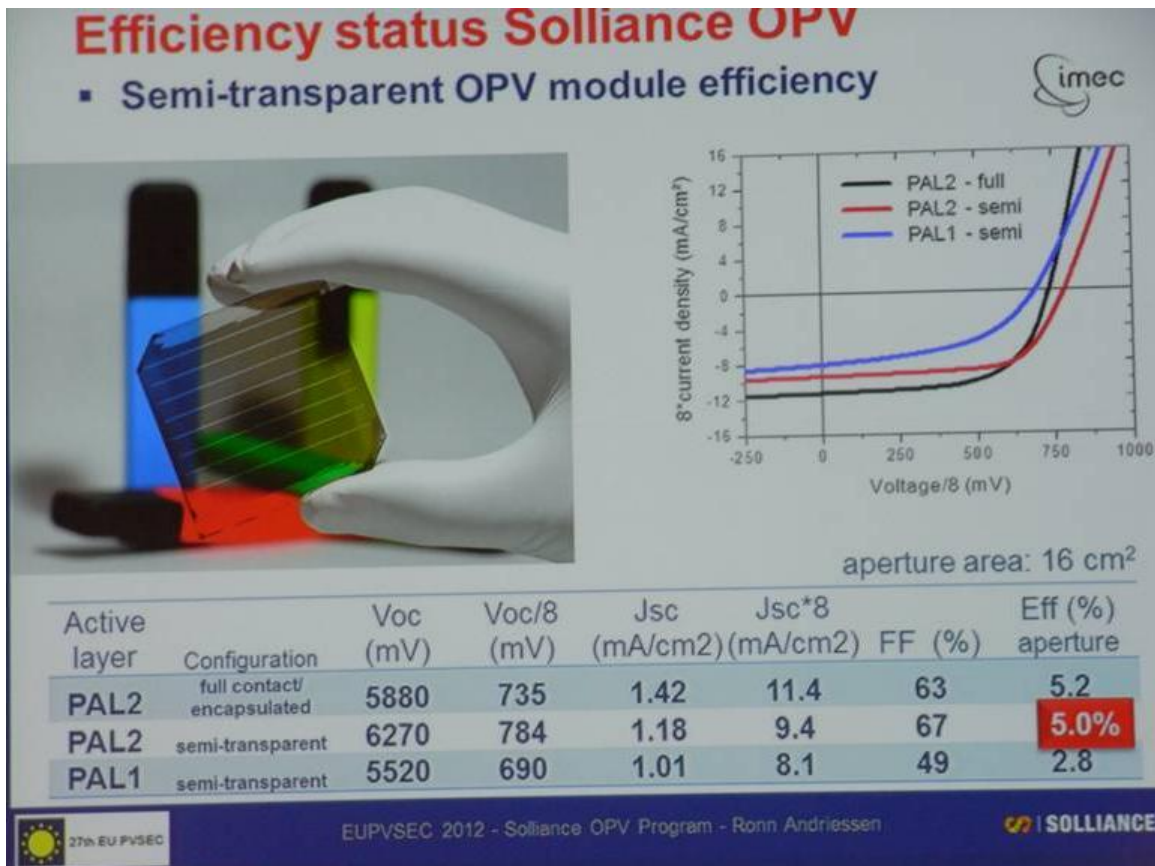


圖 3.31 Solliance 計畫半透明 OPV 模組效率比較

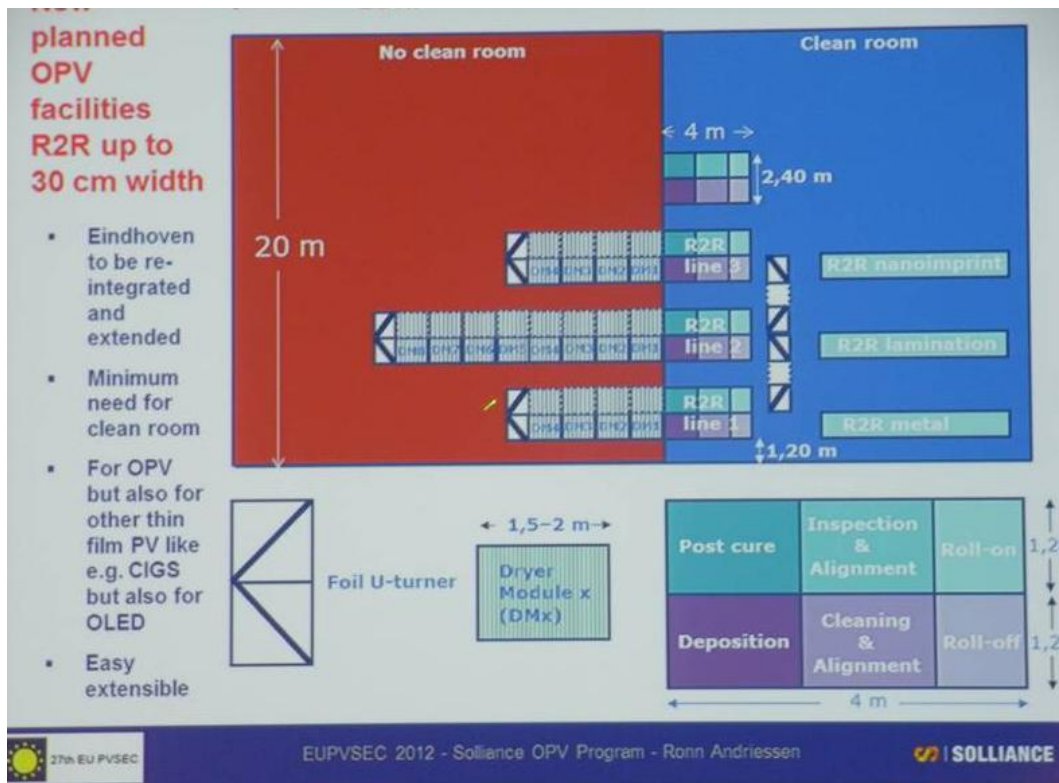


圖 3.32 Solliance 計畫 R2R 設施廠房配置圖





圖 3.33 Solliance OPV 之效率、製程技術、成本發展哩程圖

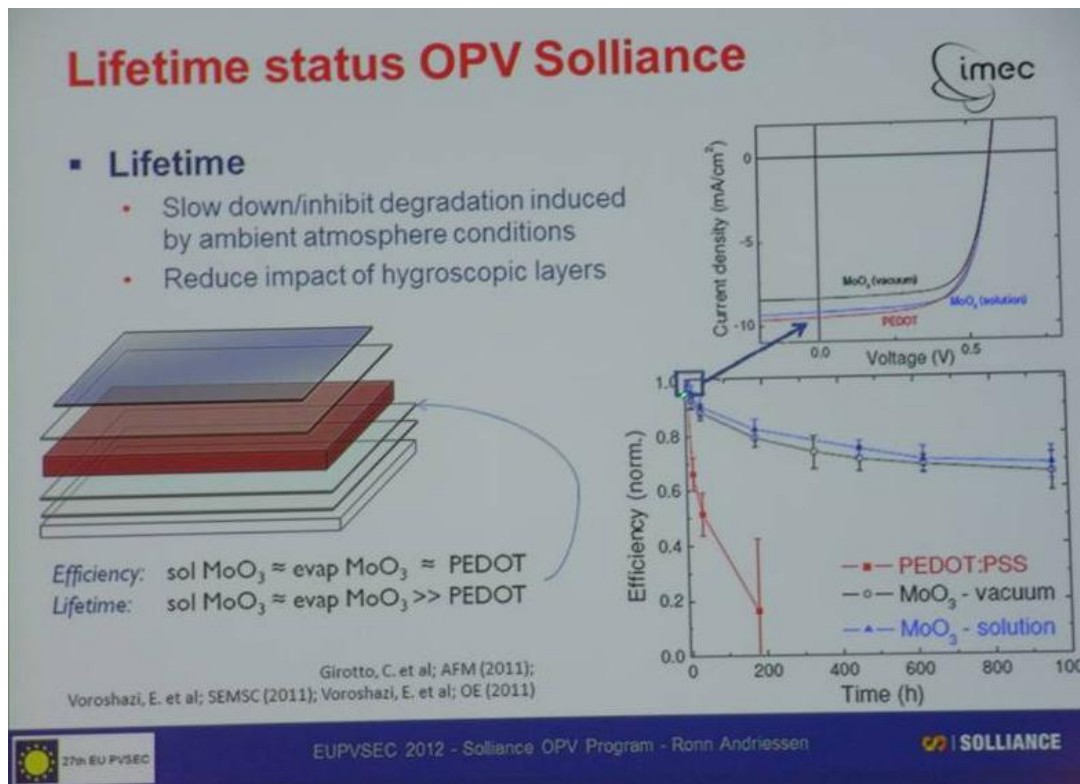


圖 3.34 Solliance 計畫利用不同製程及 HTL 層提升元件壽命



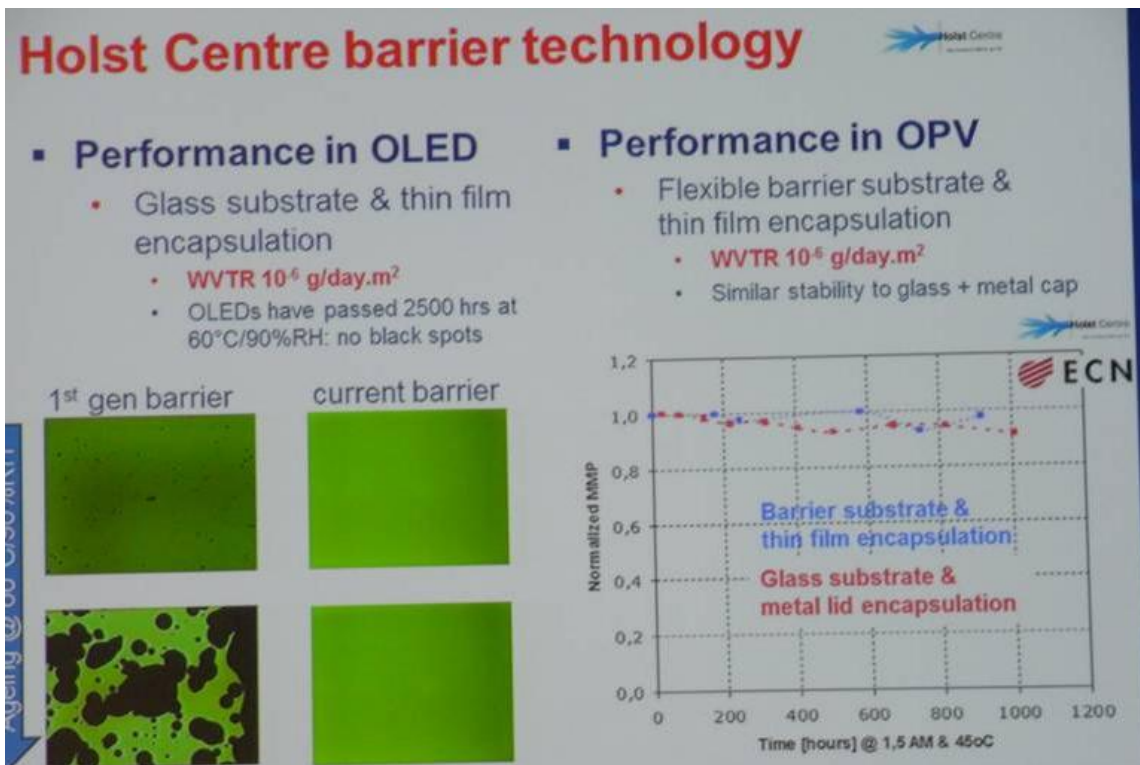


圖 3.35 Holst center 在阻絕層開發技術方面之歷史發展

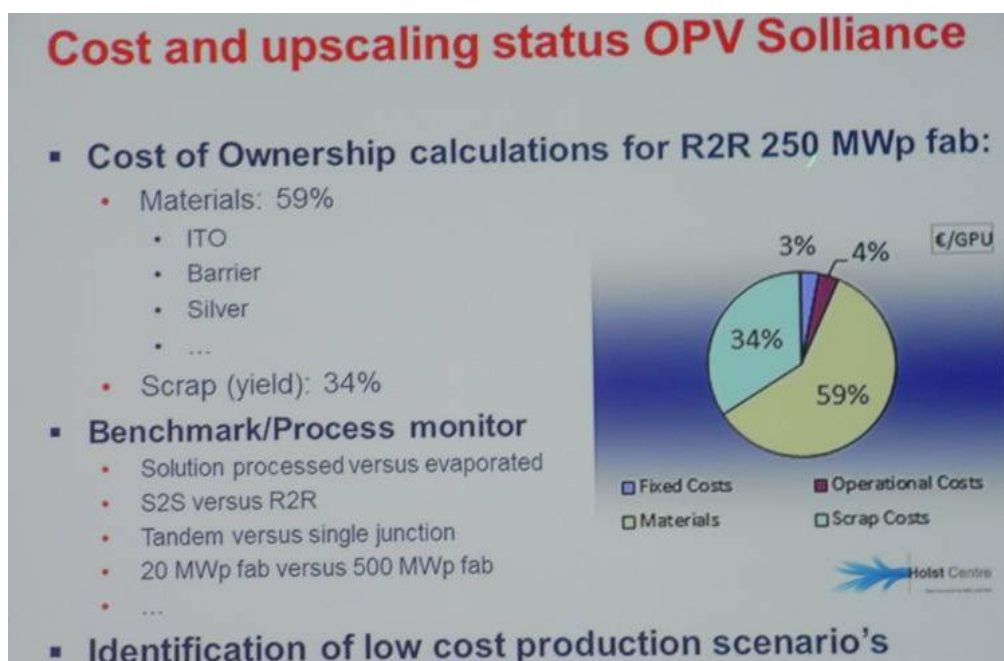


圖 3.36 Solliance 計畫 OPV 成本比重估計

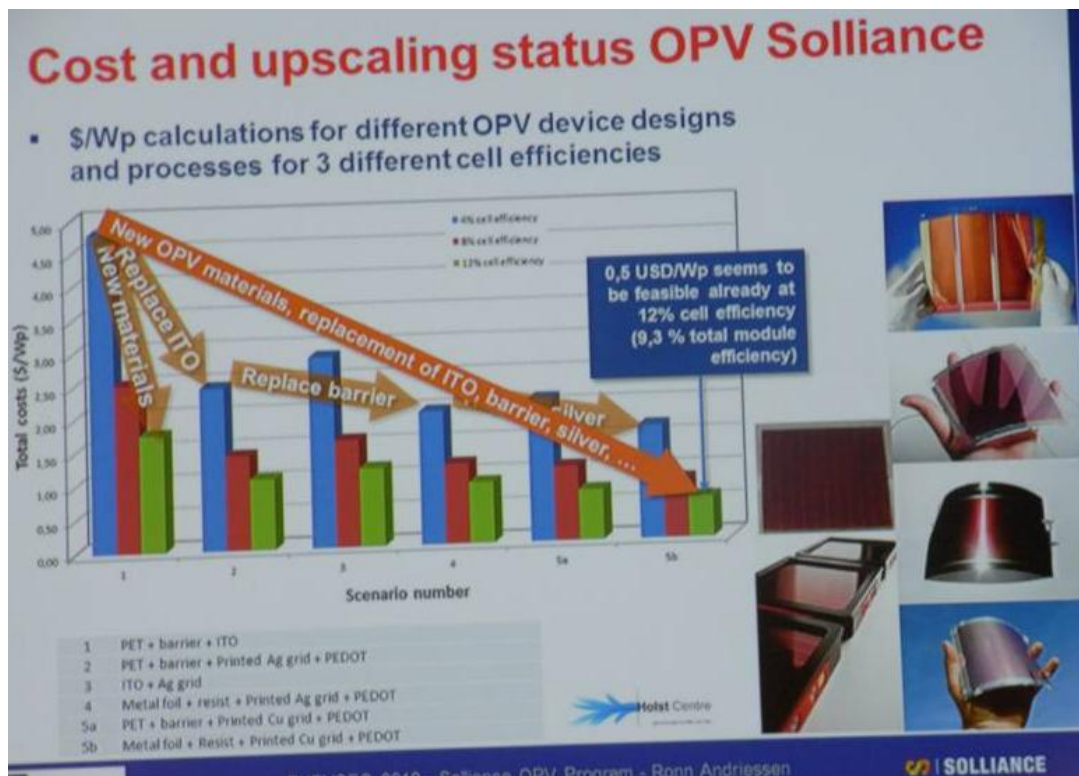


圖 3.37 Solliance 計畫不同 OPV 結構設計及製程改進下之成本控制

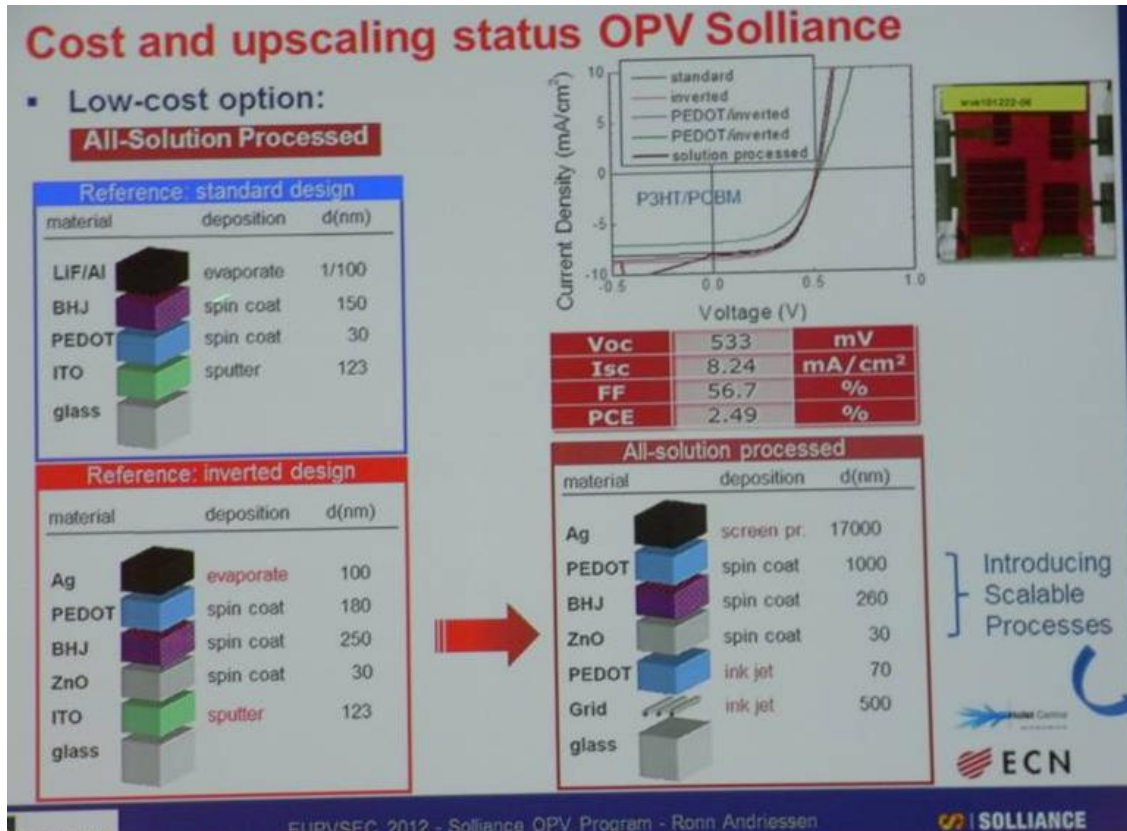


圖 3.38 Solliance 計畫 P3HT/PCBM 元件之製程改進與成本降低



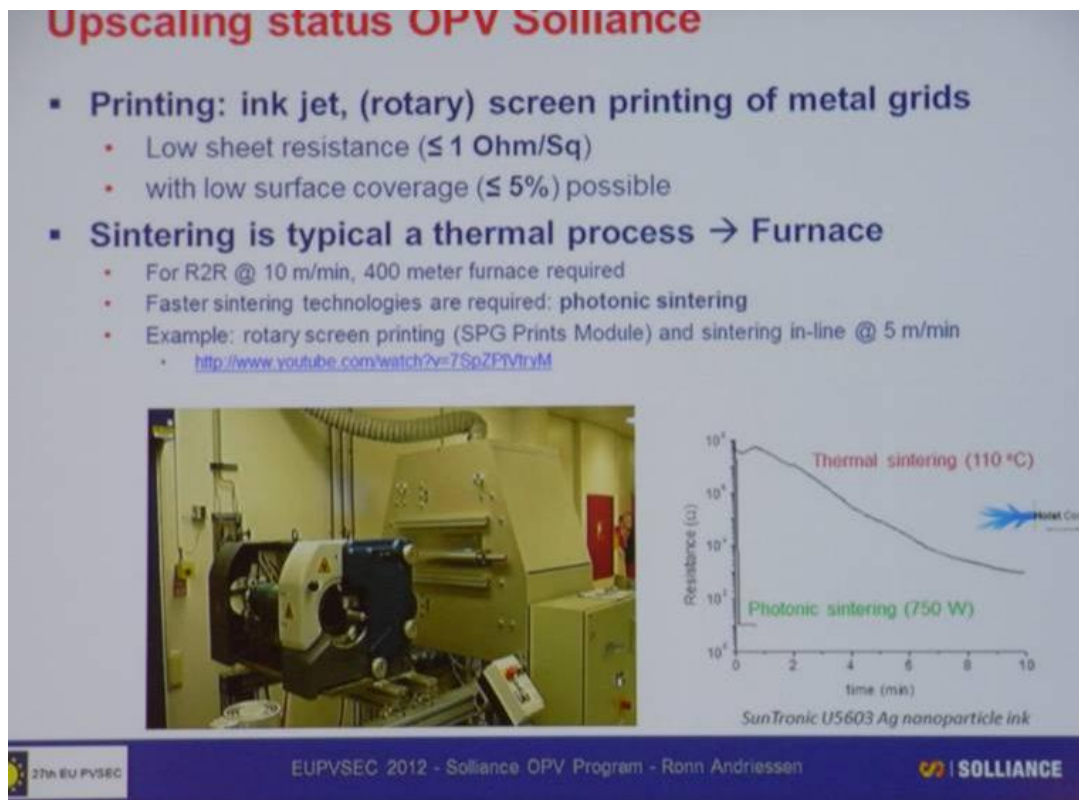


圖 3.39 Solliance 計畫金屬網線印刷設備與結果



圖 3.40 Solliance 計畫量產生產線

## Upscaling status Solliance OPV

- **Example: patterned R2R slot die coating of P3HT/PCBM**
  - Ink formulation developed for ink jet printing on HC-PEDOT **AGFA**
    - Three (non-chlorinated) solvents system
    - Only stable enough at elevated temperature (40 – 50 °C)
    - Heated slot die
  - Layer uniformity
    - Critical for multi-solvent system: unwanted Marangoni flows
    - High end dry process needed

Drying process 1      Drying process 2      Improved edge control with special designed

Hotlet Centre  
nTact

圖 3.41 Solliance 計畫圖案化 R2R 製程之 P3HT/PCBM OPV

## Upscaling status Solliance OPV

- **Spray coating**
  - Implement spray coating in our module process

Spin or sprayed photo-active P3HT:PCBM layer

	Area [cm <sup>2</sup> ]	Eff [%]
Very small	0.031	3.5 (±0.1)
Small	0.134	3.4 (±0.1)
Medium	1.33	2.9
Large (spin)	13.9	2.4
Large (spray)	15.8	2.5

imec

27th EU PVSEC      EUPVSEC 2012 - Solliance OPV Program - Ronn Andriessen      SOLLIANCE

圖 3.42 Solliance 計畫 spray coating 製造模組，效率與面積之關係

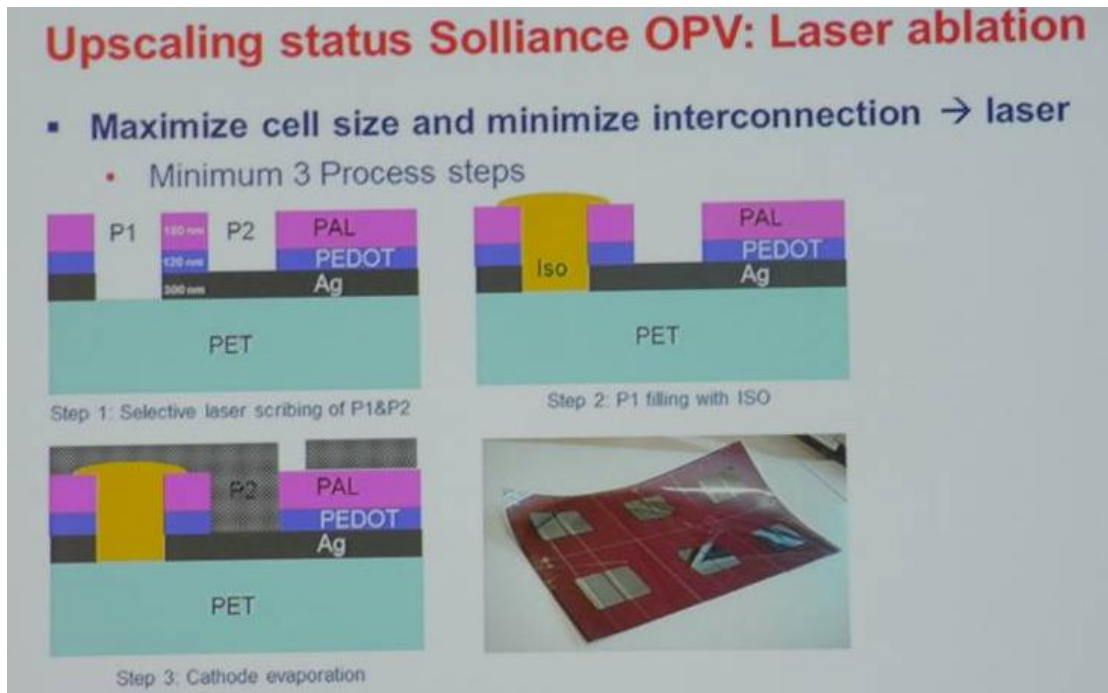


圖 3.43 Solliance 計畫雷射刮除程序( P1、P2、P3 最佳化)

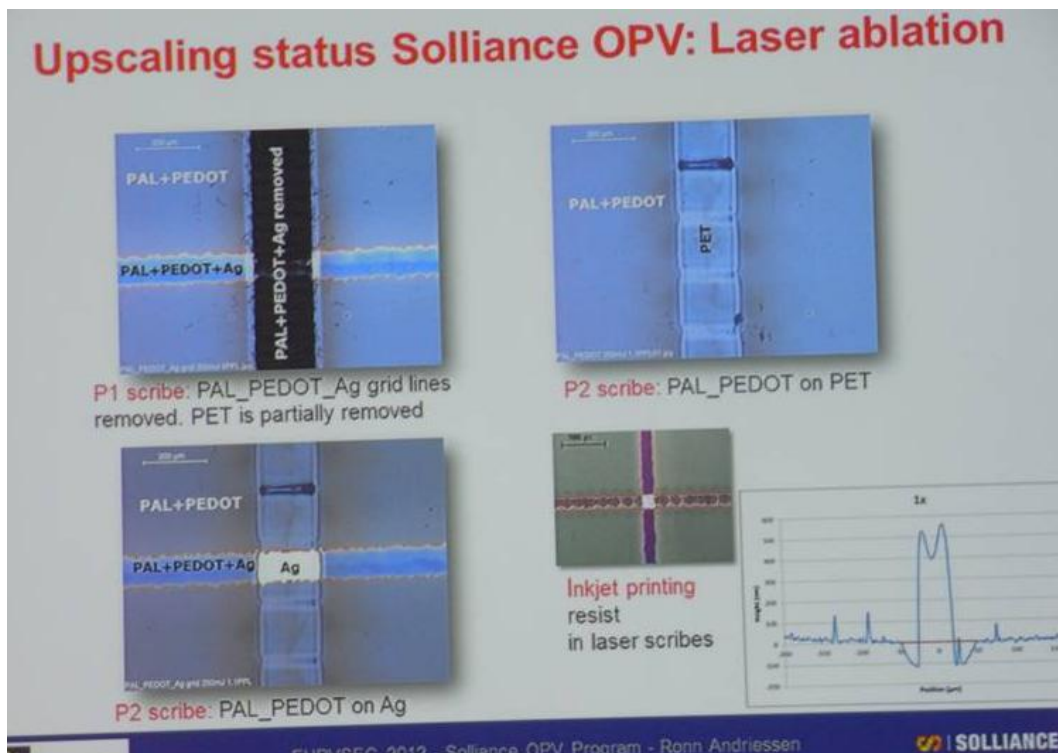


圖 3.44 Solliance 計畫雷射刮除結果



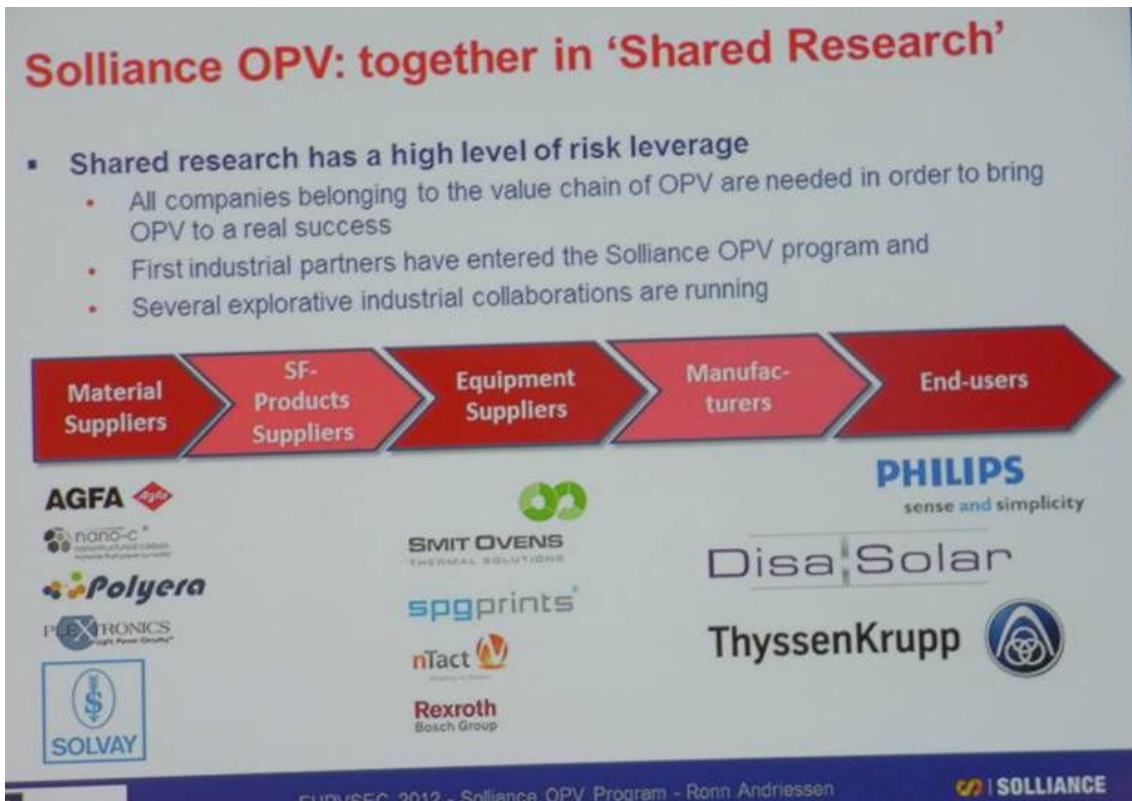


圖 3.45 Solliance 計畫之分工與商業合作廠商之關係



圖 3.46 EOS 計畫下成員組成

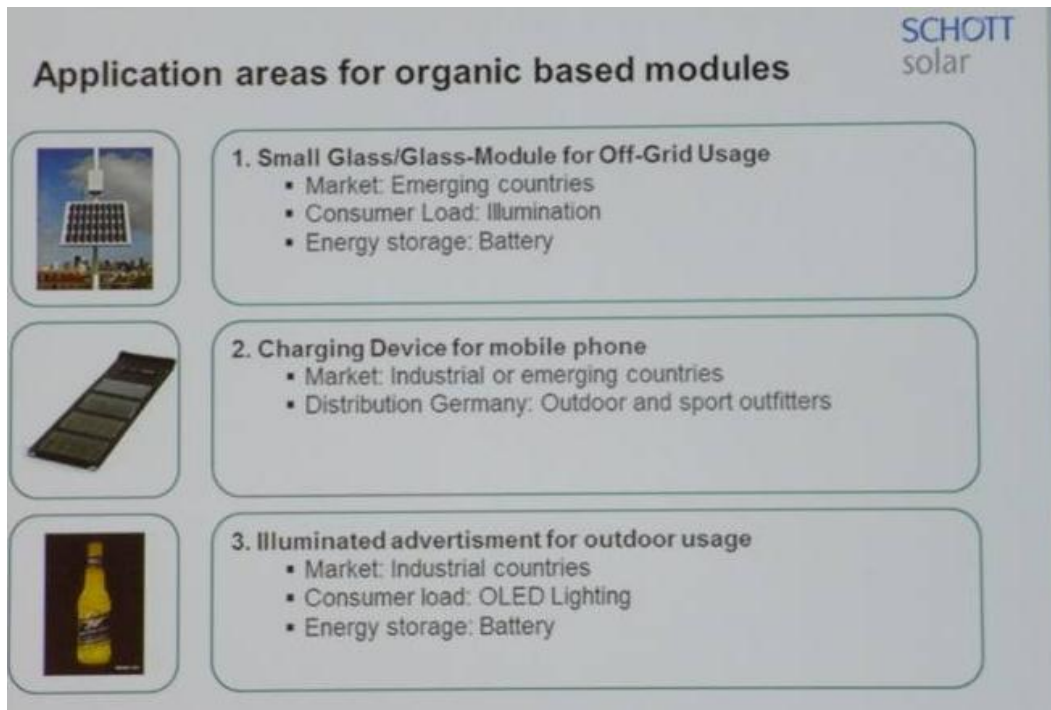


圖 3.47 EOS 計畫之 OPV 模組規劃應用方向

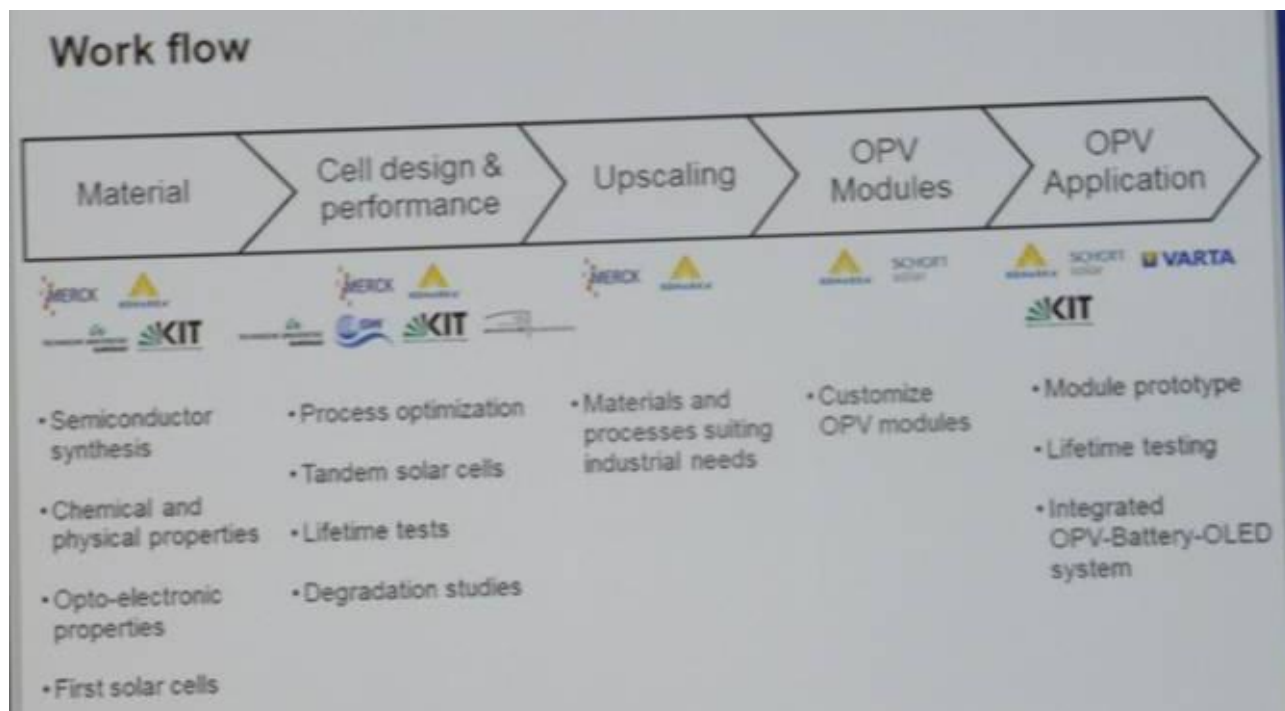


圖 3.48 EOS 計畫成員之分工及工作進度規劃

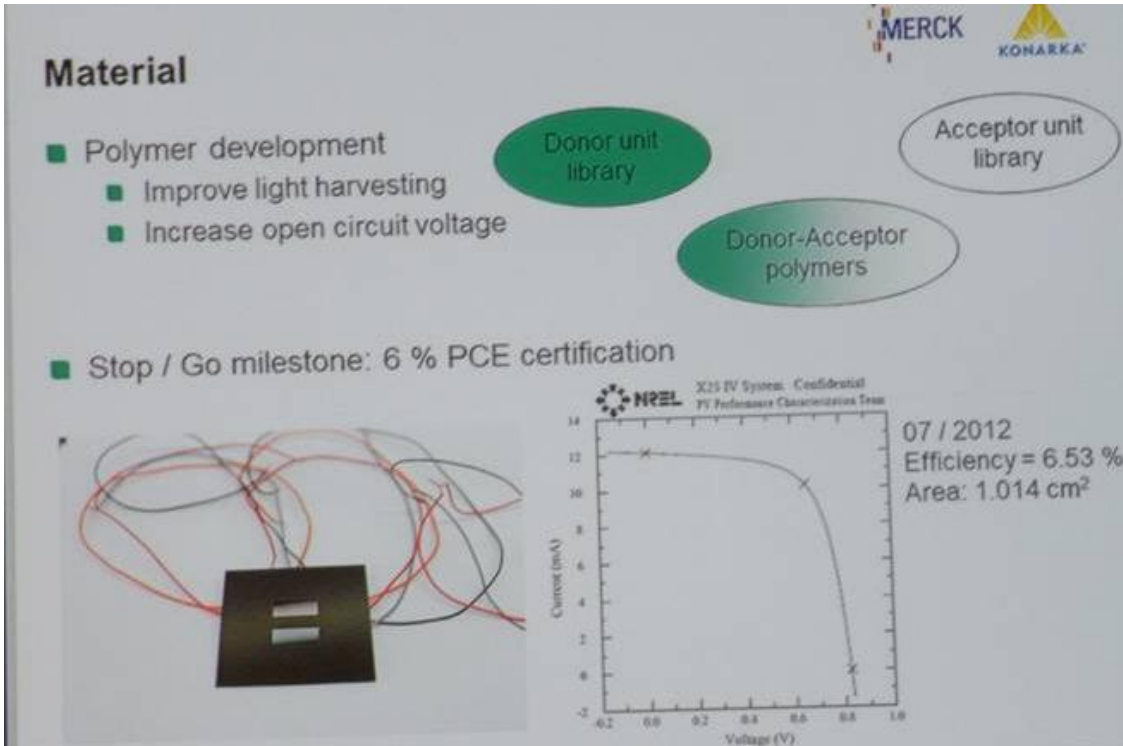


圖 3.49 EOS 計畫元件效率(已驗證者)

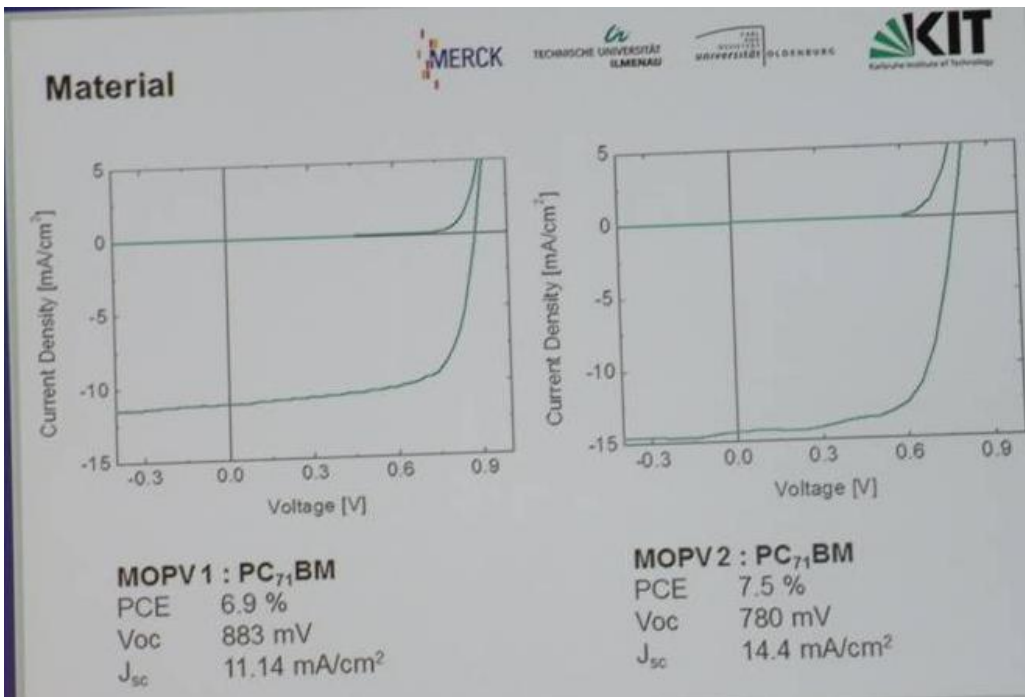


圖 3.50 EOS 計畫元件效率(未驗證者)



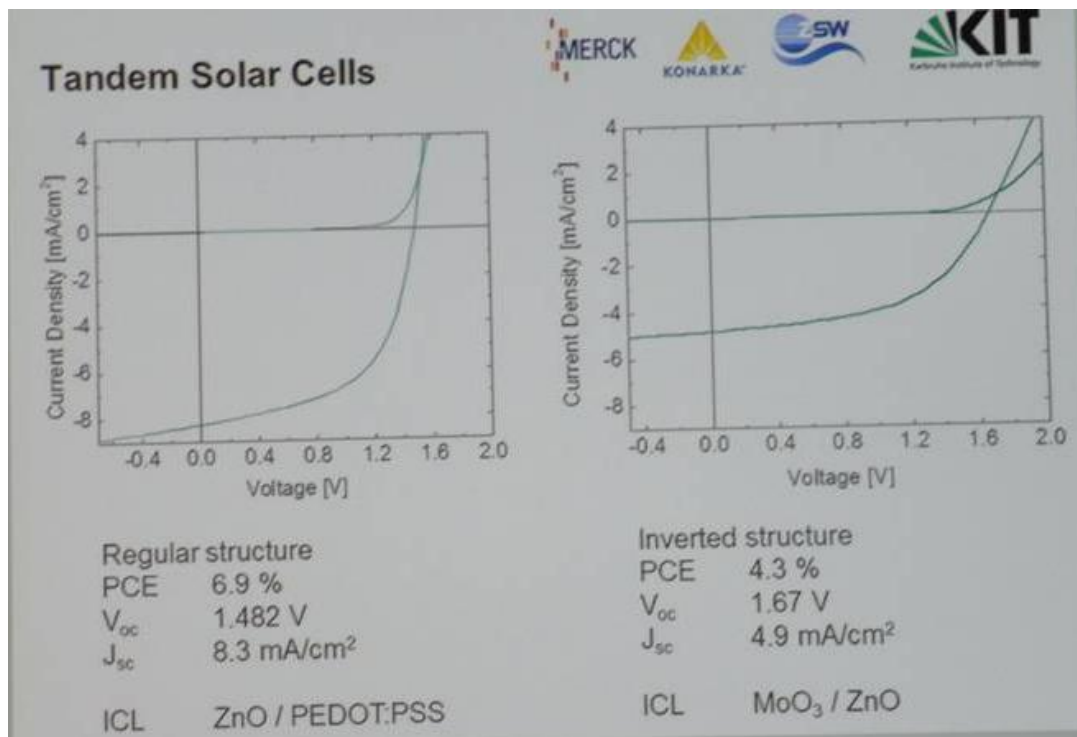


圖 3.51 EOS 計畫 tandem 元件效率

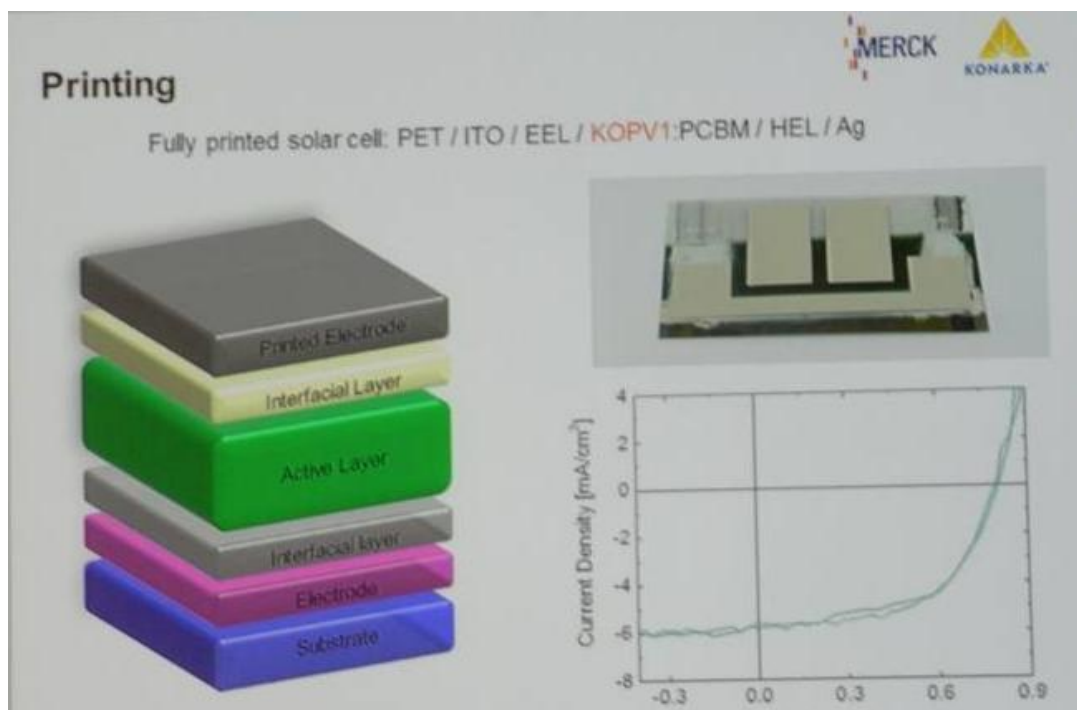



圖 3.52 EOS 計畫全印製之元件

SCHOTT solar 

## Lifetime of flexible modules

- OPV lifetime certification standard still missing, but
- Certification Tests acc.
  - IEC 61215
  - IEC 61646
  - IEC 61730
  - UL 1703
- Qualification Tests acc.
  - Schott Internal Standard
  - ↔ 200 % IEC Standard









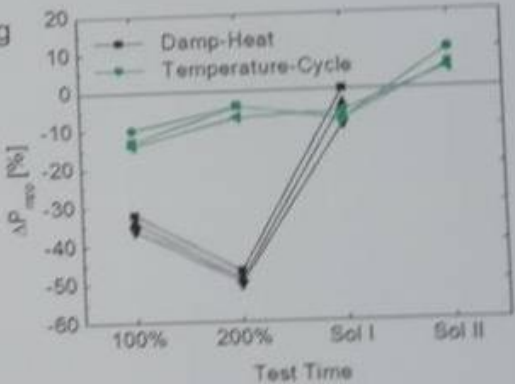
圖 3.53 EOS 計畫可撓性 OPV 之驗證

SCHOTT solar 

## Lifetime of flexible modules

- Optical inspection:
  - Delamination: < 10 % cell area
  - Performance not affected
- Electrical results:
  - Severe degradation after IEC testing
  - Modules recover after solarisation
- Modules fulfill IEC 61646 requirements



Test Time	Damp-Heat (% Δ P <sub>mp</sub> )	Temperature-Cycle (% Δ P <sub>mp</sub> )
100%	-35	-15
200%	-48	-12
Sol I	-5	-5
Sol II	10	15

圖 3.54 EOS 計畫可撓性 OPV 之驗測試



圖 3.55 EOS 計畫 OPV 應用商品-I



圖 3.56 EOS 計畫 OPV 應用商品-II



圖 3.57 Sunflower 計畫之組成成員及發展方向

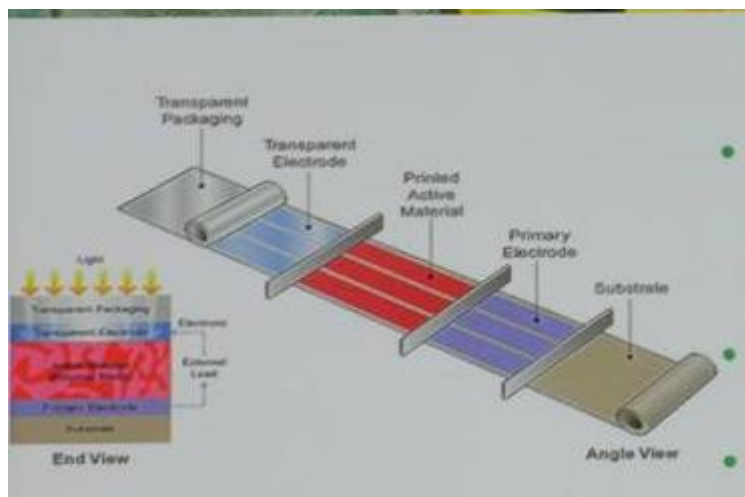


圖 3.58 Sunflower 計畫多層結構大氣環境下 R2R 印刷製程



圖 3.59 Sunflower 計畫計畫目標





圖 3.60 Sunflower 計畫產品應用空間

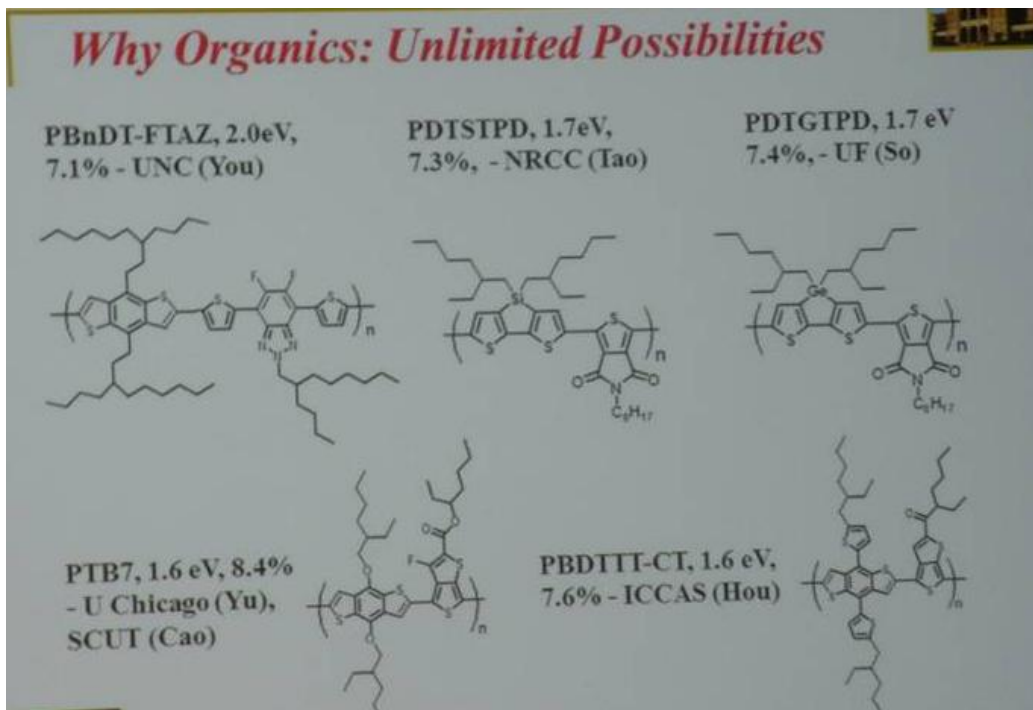


圖 3.61 不同低能隙高分子材料及其可達成之元件效率

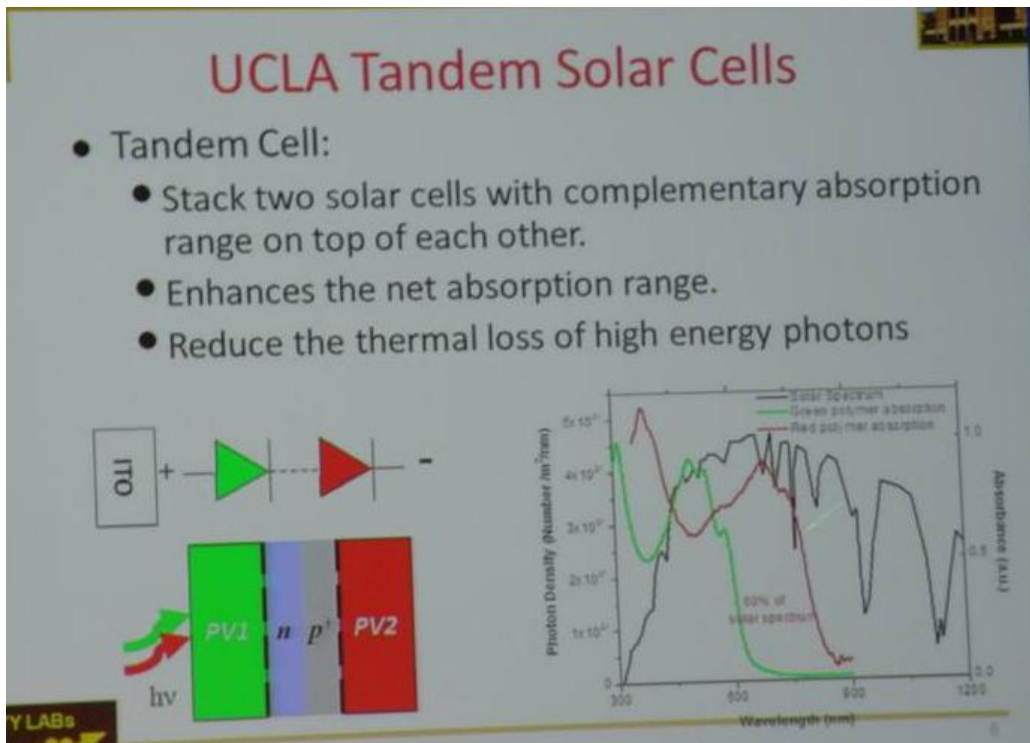


圖 3.62 UCLA tandem 元件之吸收光譜響應

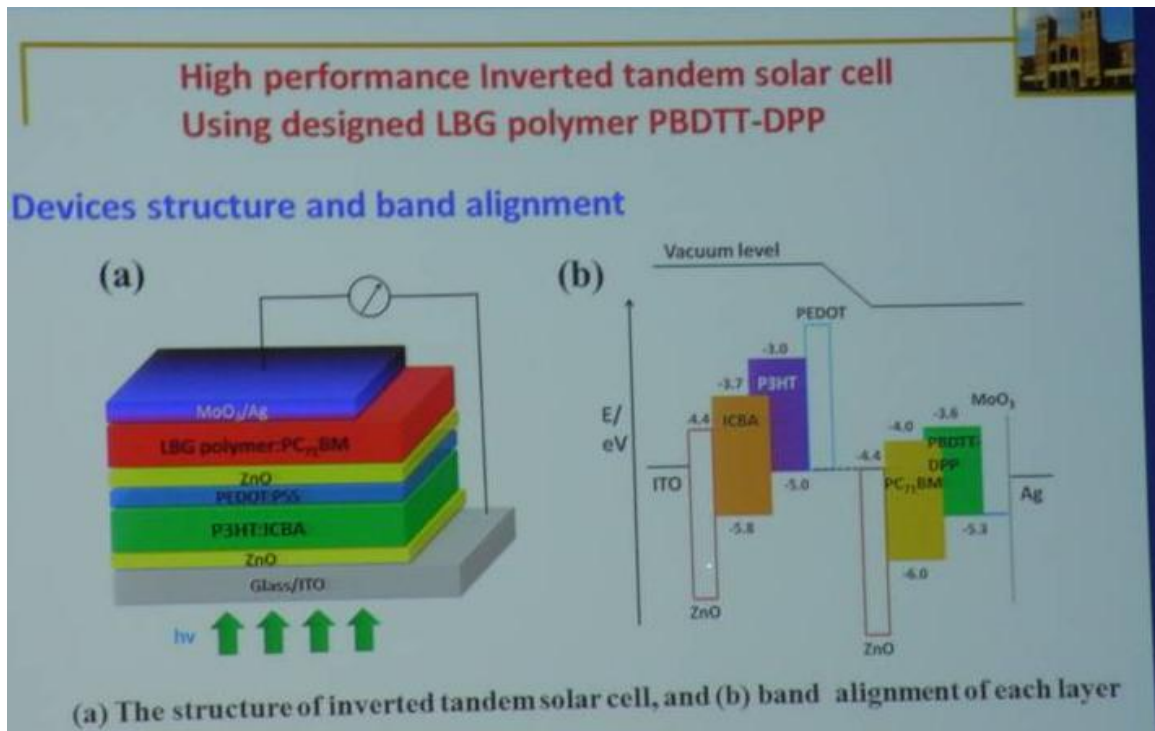


圖 3.63 UCLA 高效率 tandem 元件之反式結構與能階匹配

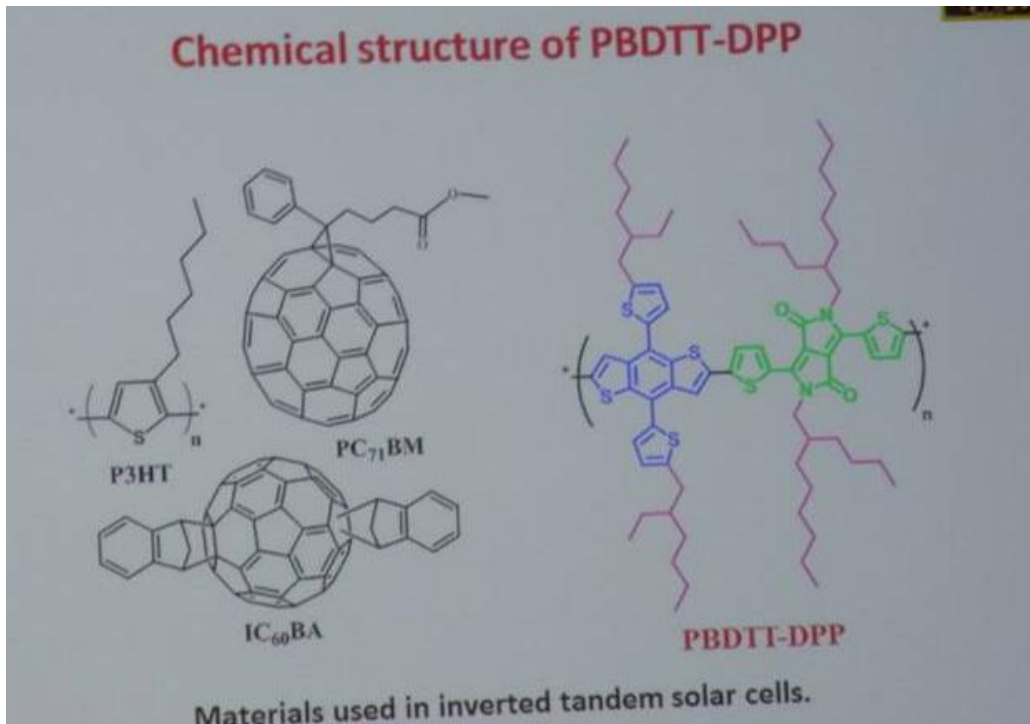


圖 3.64 PBDTT-DPP 之分子結構圖

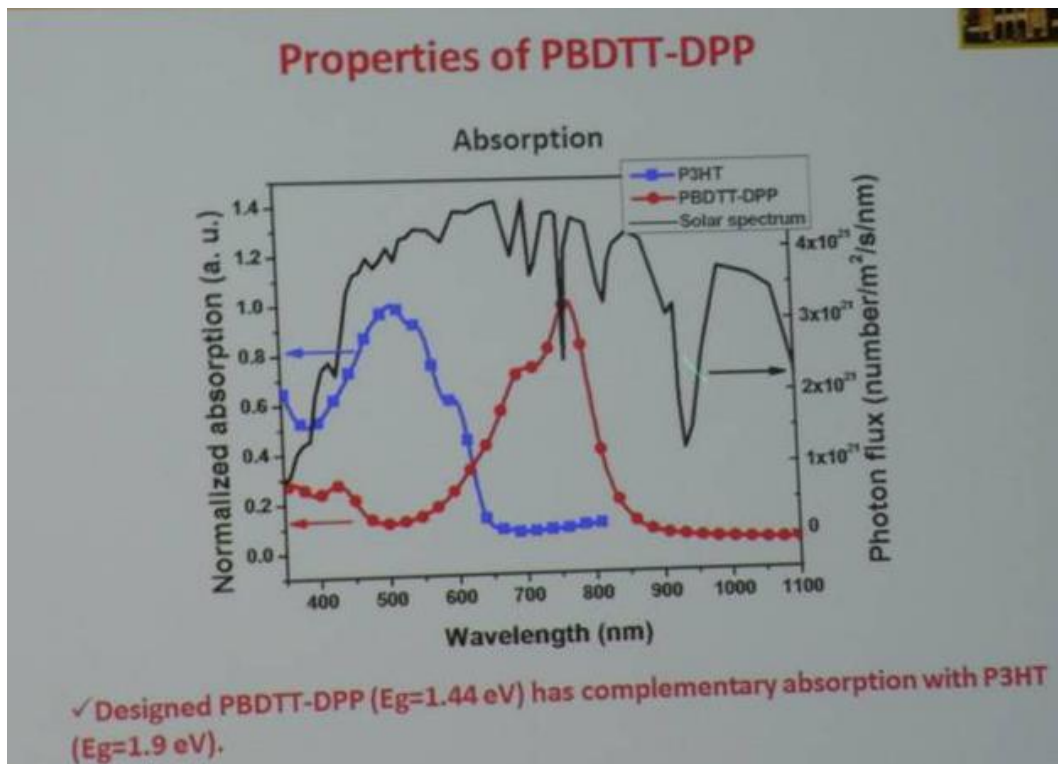


圖 3.65 PBDTT-DPP 吸收光譜特性

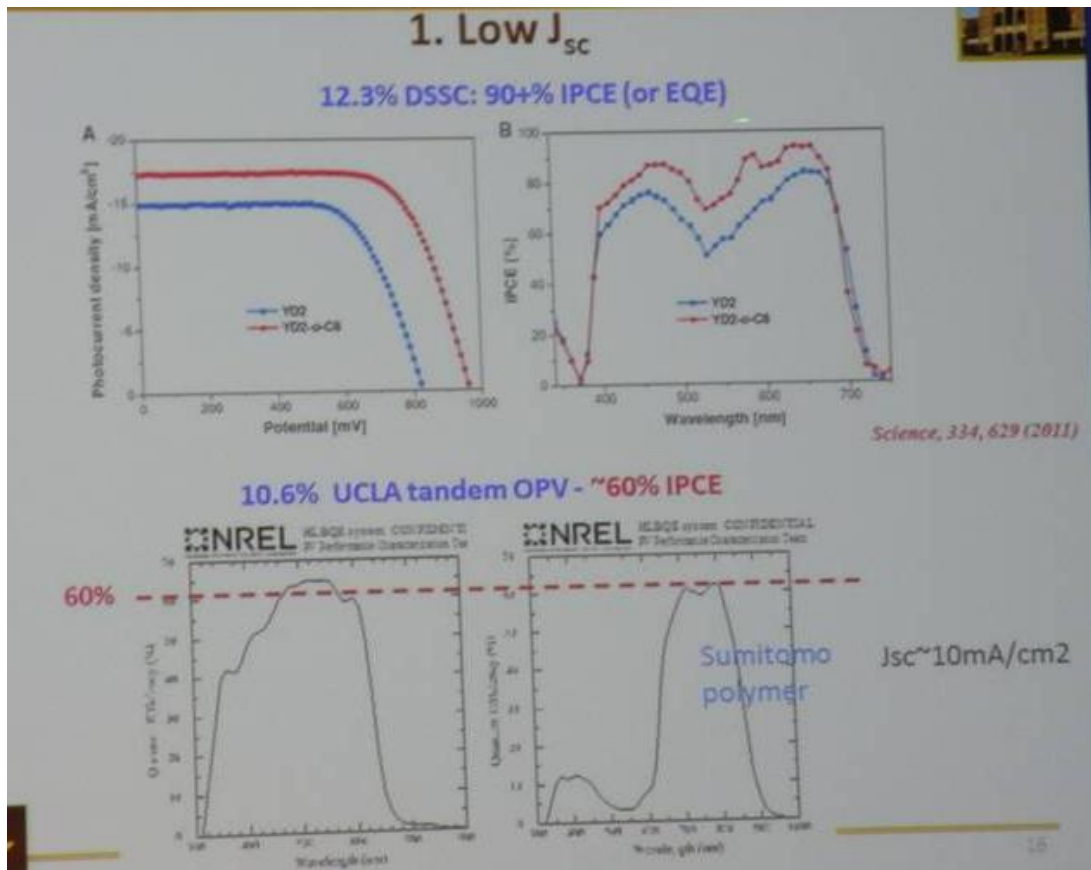


圖 3.66 UCLA 元件之量子效率量測結果及與染料敏化電池比較

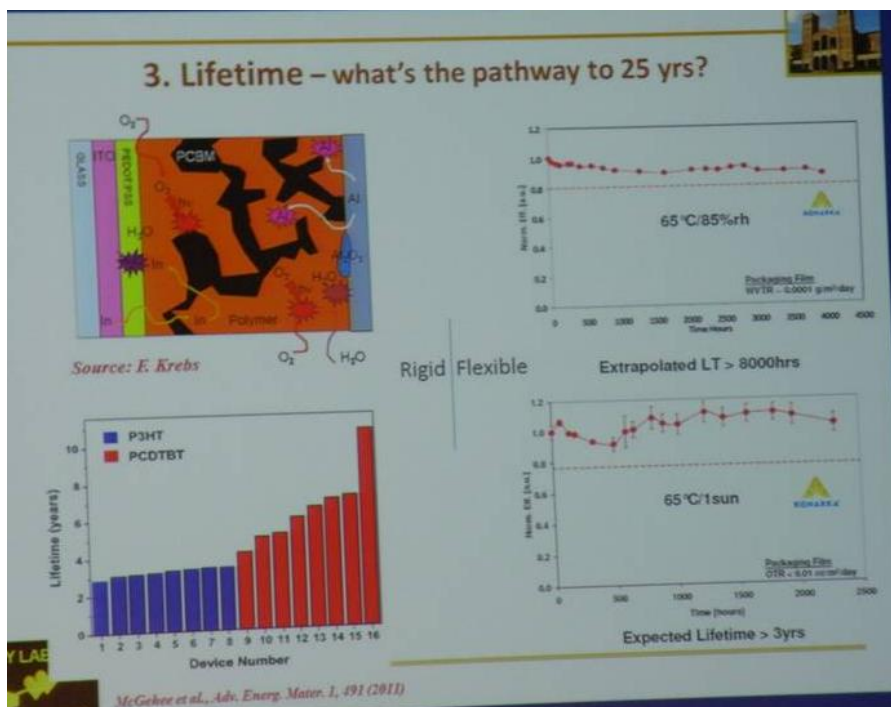


圖 3.67 OPV 元件壽命分析與環境測試結果



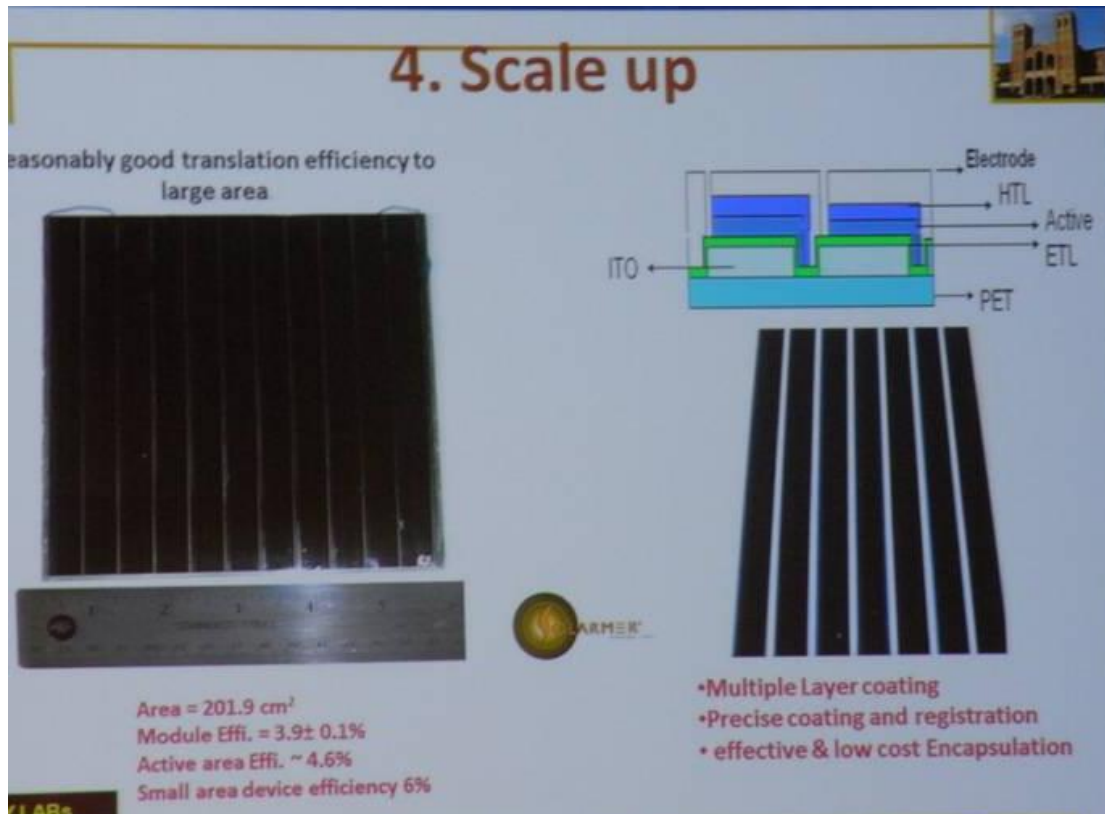


圖 3.68 UCLA 團隊之 OPV 量產化結果評估

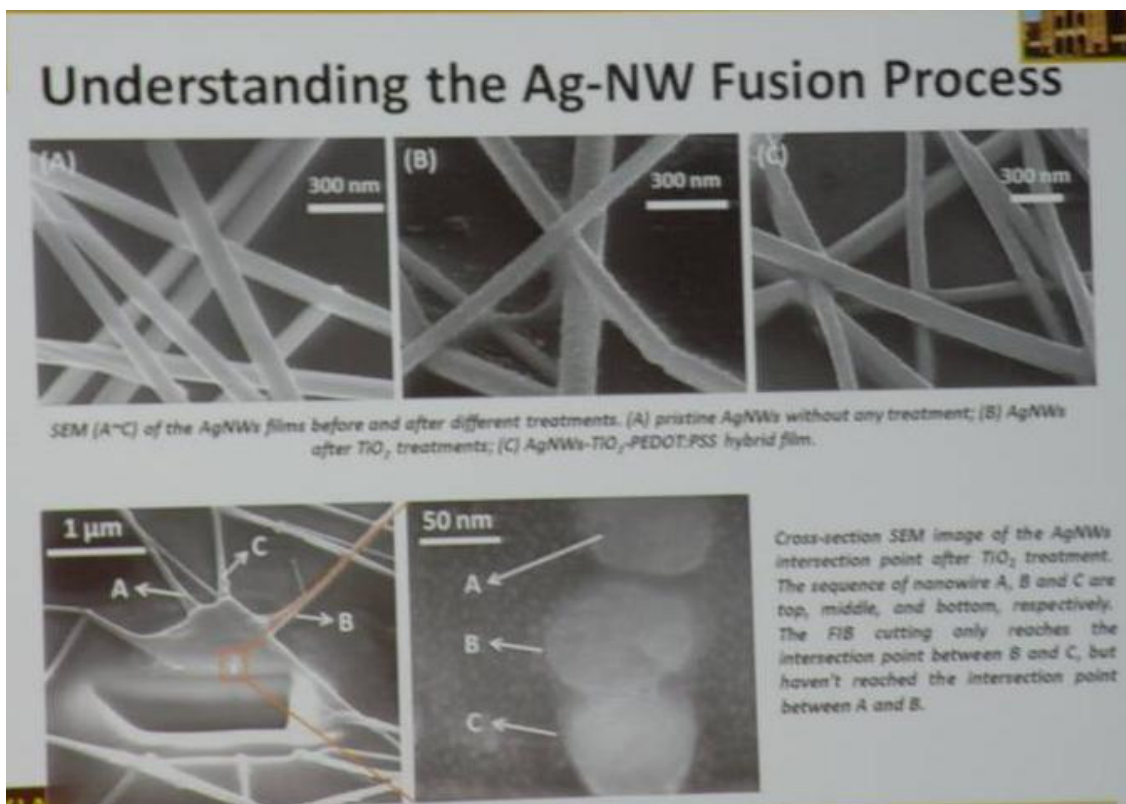


圖 3.69 電極層中，銀奈米線由於 TiO<sub>2</sub> 奈米粒子之助而接合良好

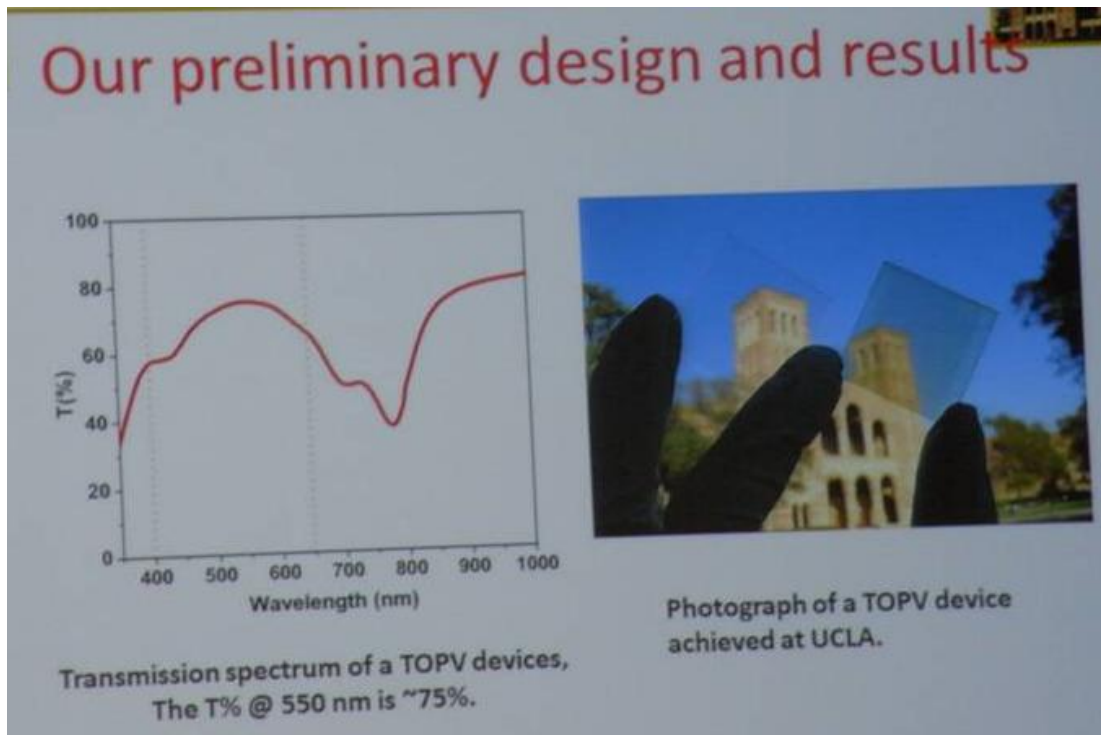


圖 3.70 UCLA 團隊之透明 OPV 透光性量測

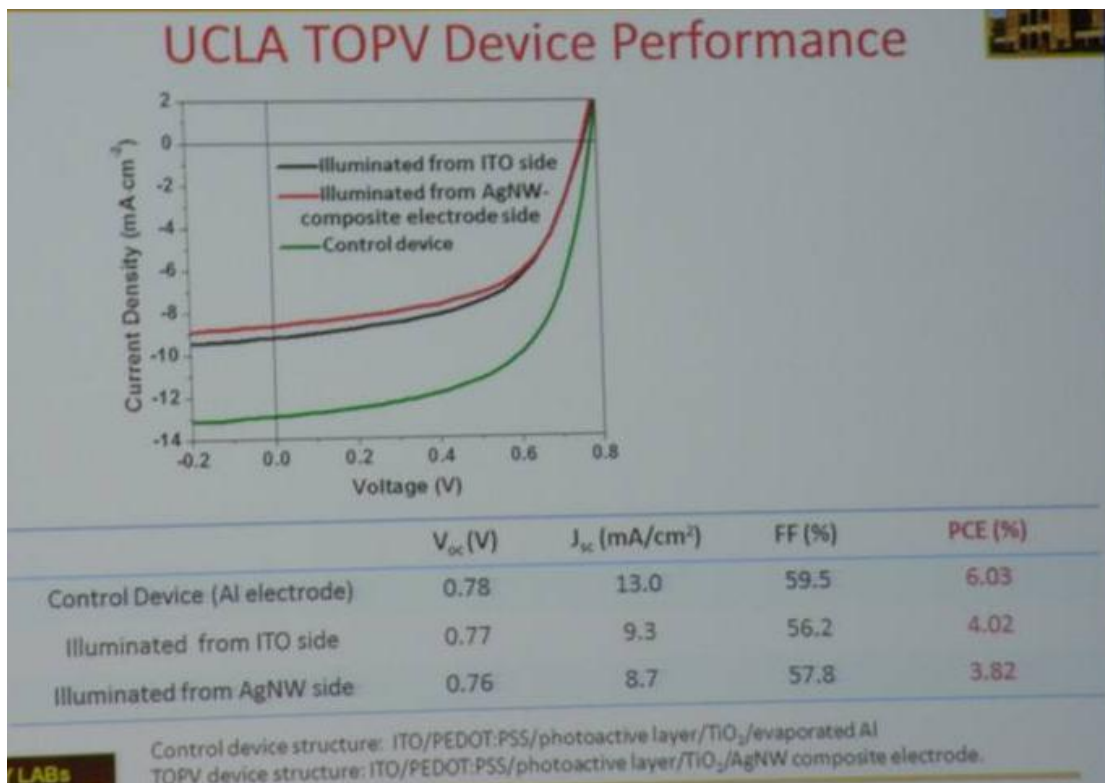


圖 3.71 UCLA 團隊之透明 OPV 效率與傳統元件之比較

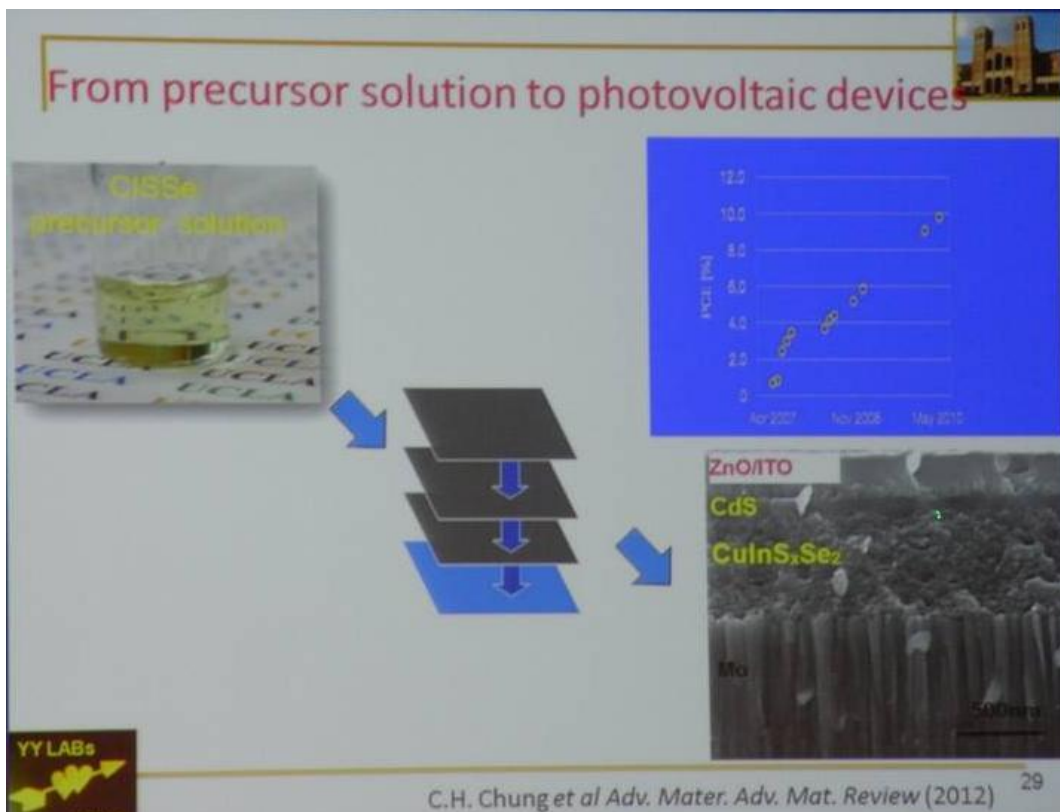


圖 3.72 UCLA 團隊全溶液製程之 CIGS 薄膜太陽能電池之效率發展

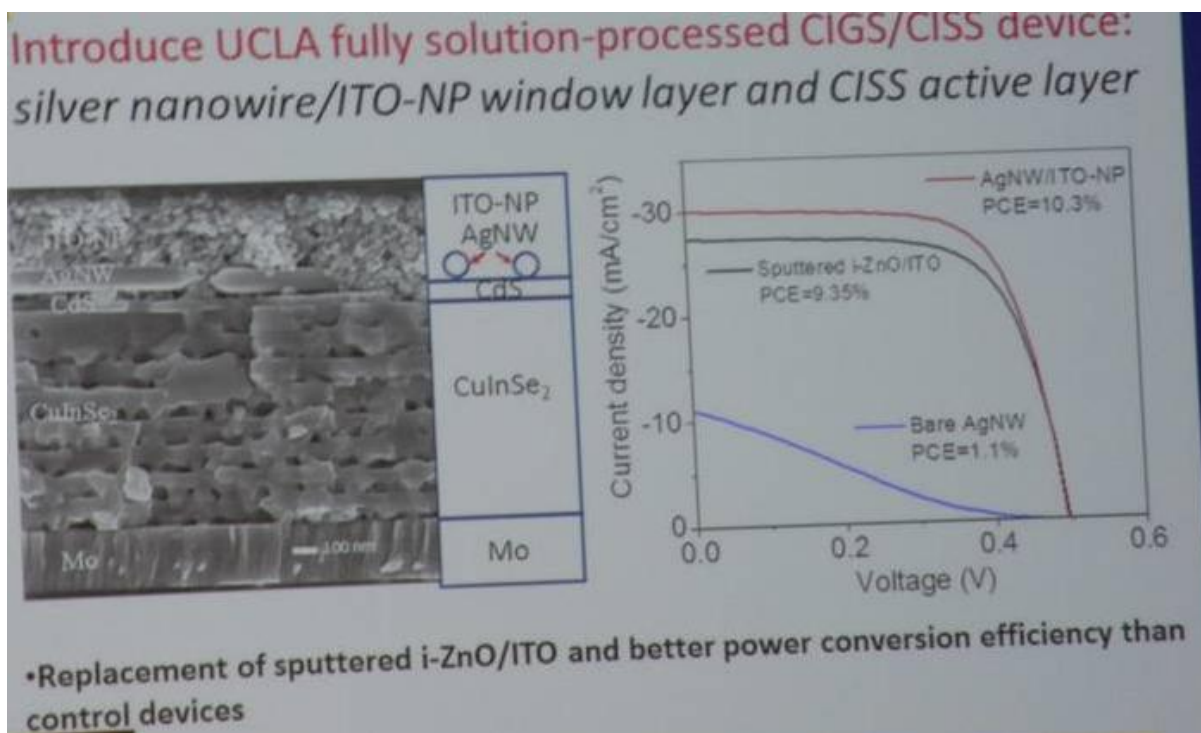


圖 3.73 UCLA 團隊全溶液製程之 CIGS 薄膜太陽能電池之結構(含銀奈米線層)及效率變化





圖 3.74 UCLA 研究團隊成員

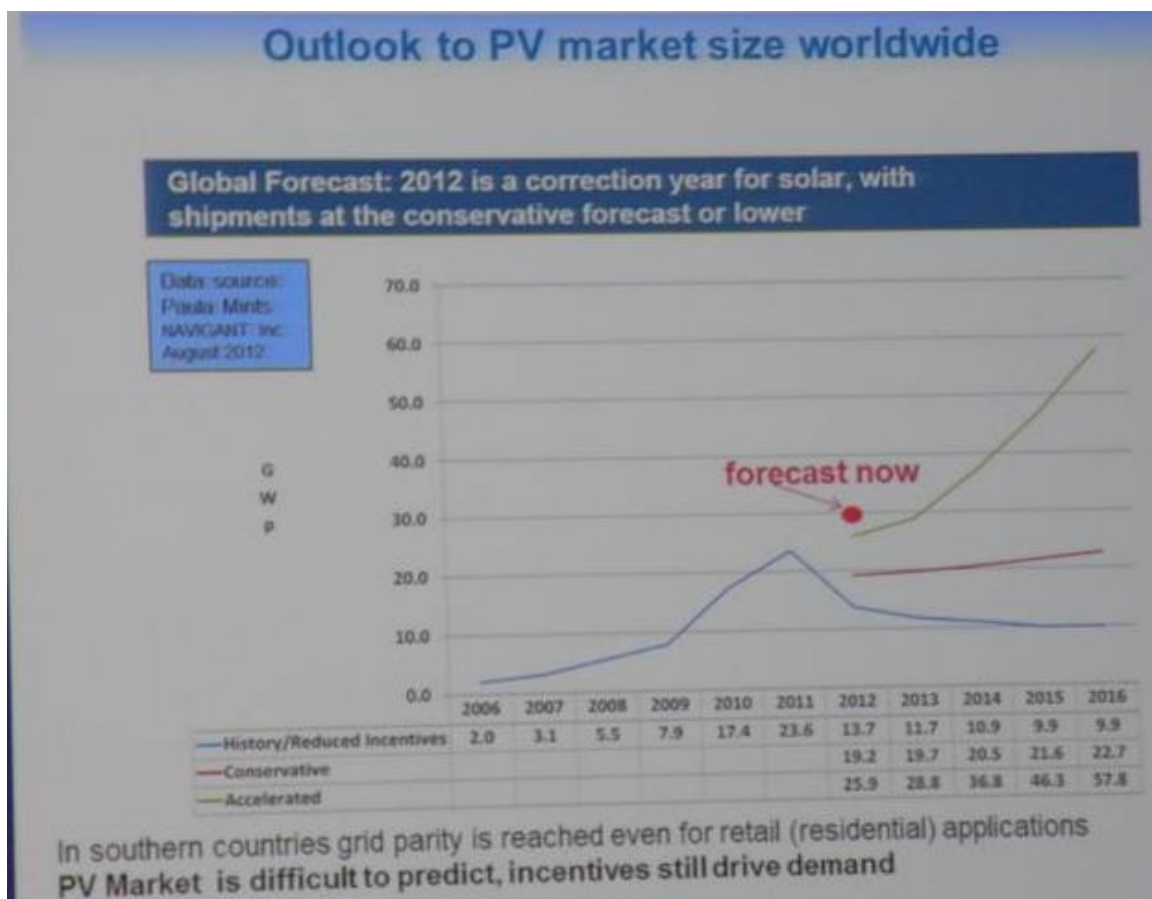


圖 3.75 全球過去 PV 容量與未來預測

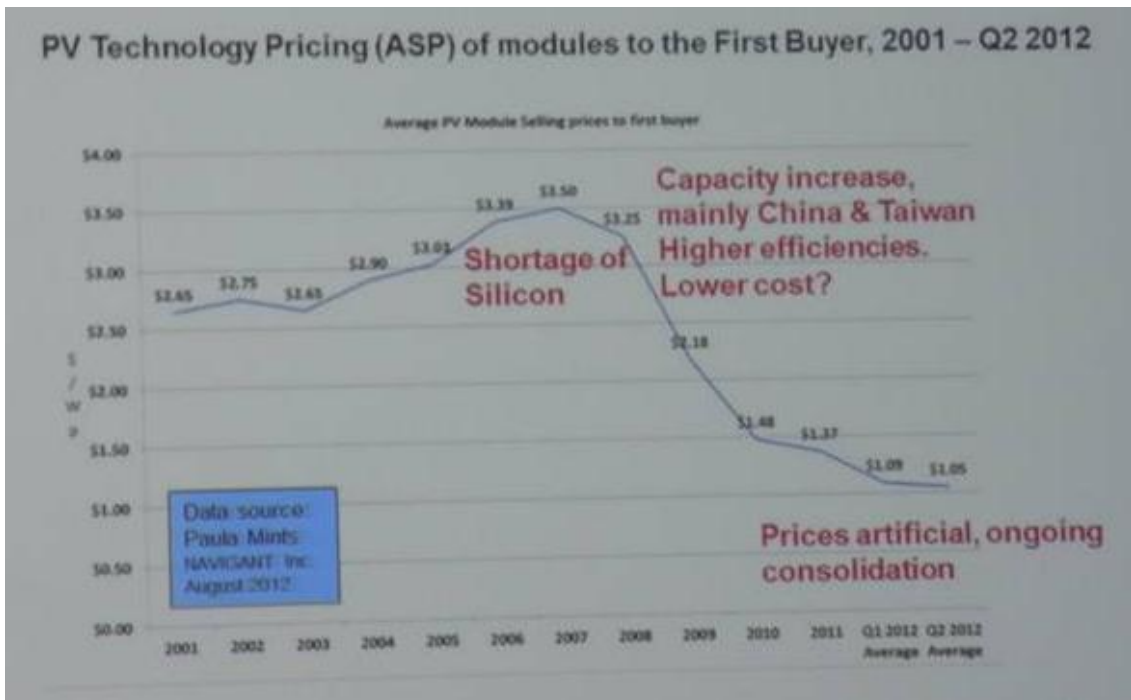


圖 3.76 (a) PV 模組價格變化趨勢圖

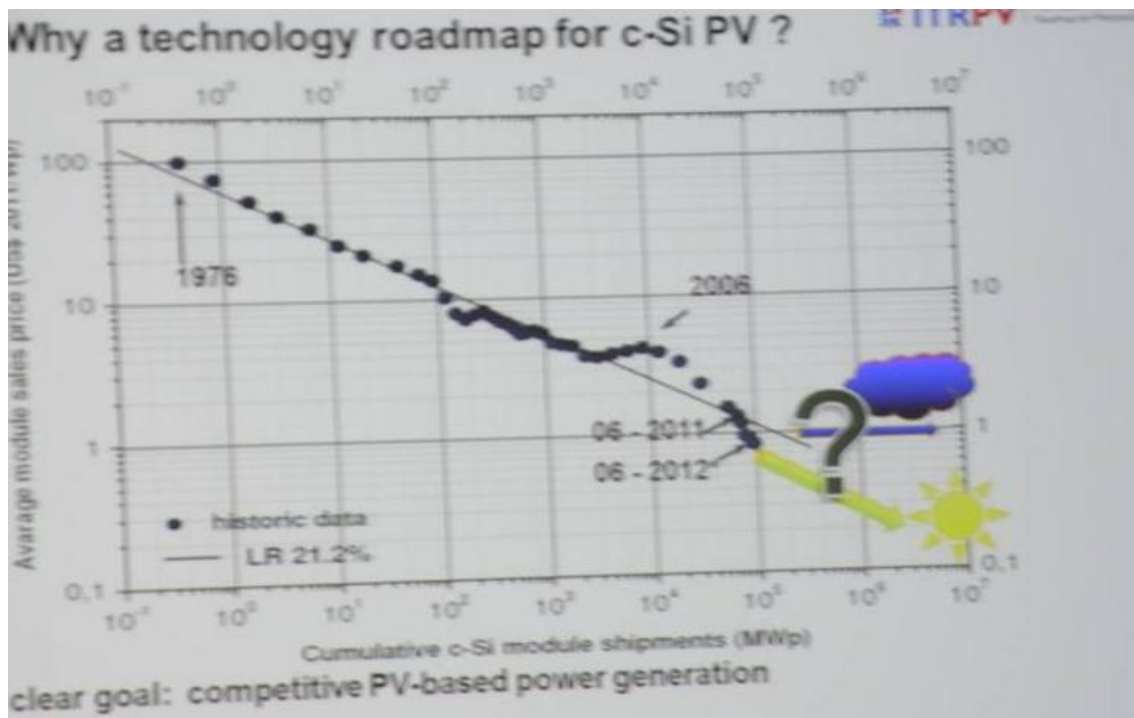


圖 3.76 (b) 矽晶 PV 哩程圖(模組發電量與成本)



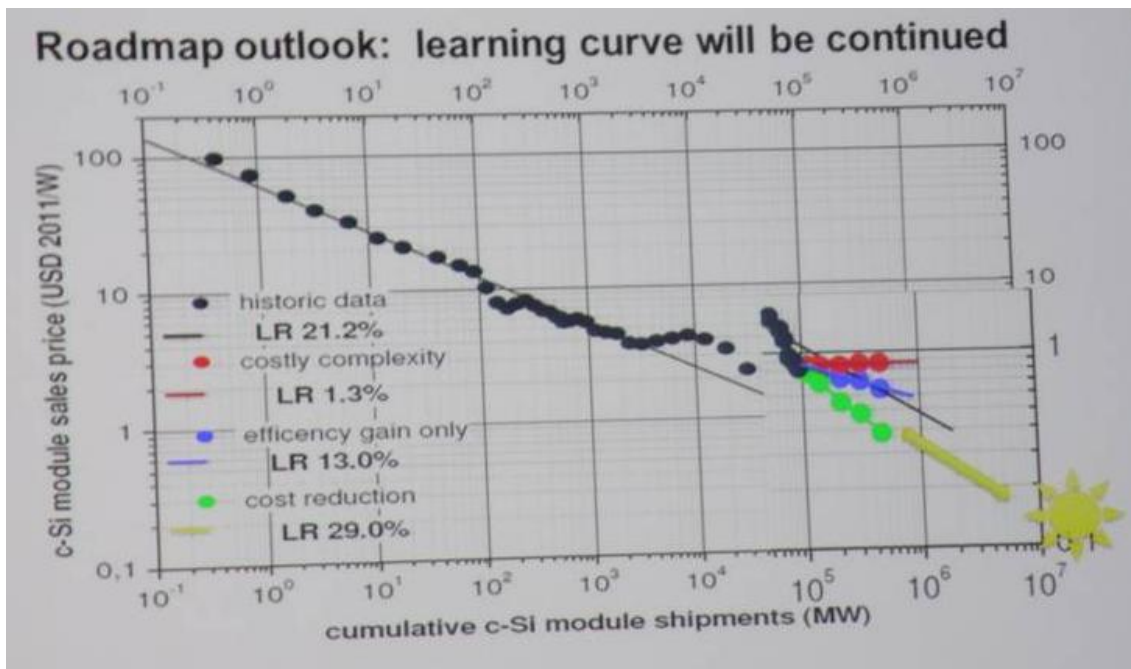


圖 3.76 (c) 矽晶 PV 發電量與成本學習曲線

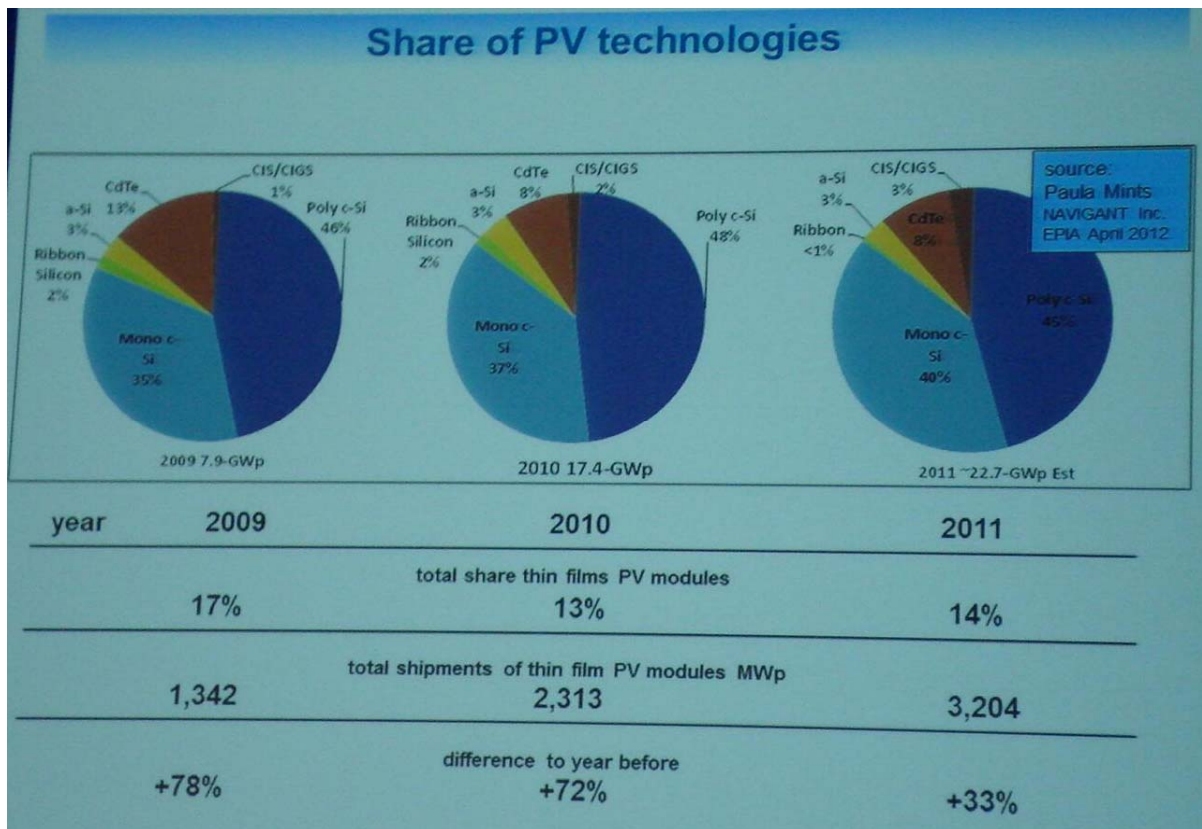


圖 3.77 半導體薄膜 PV 佔總體 PV 之比重趨勢變化

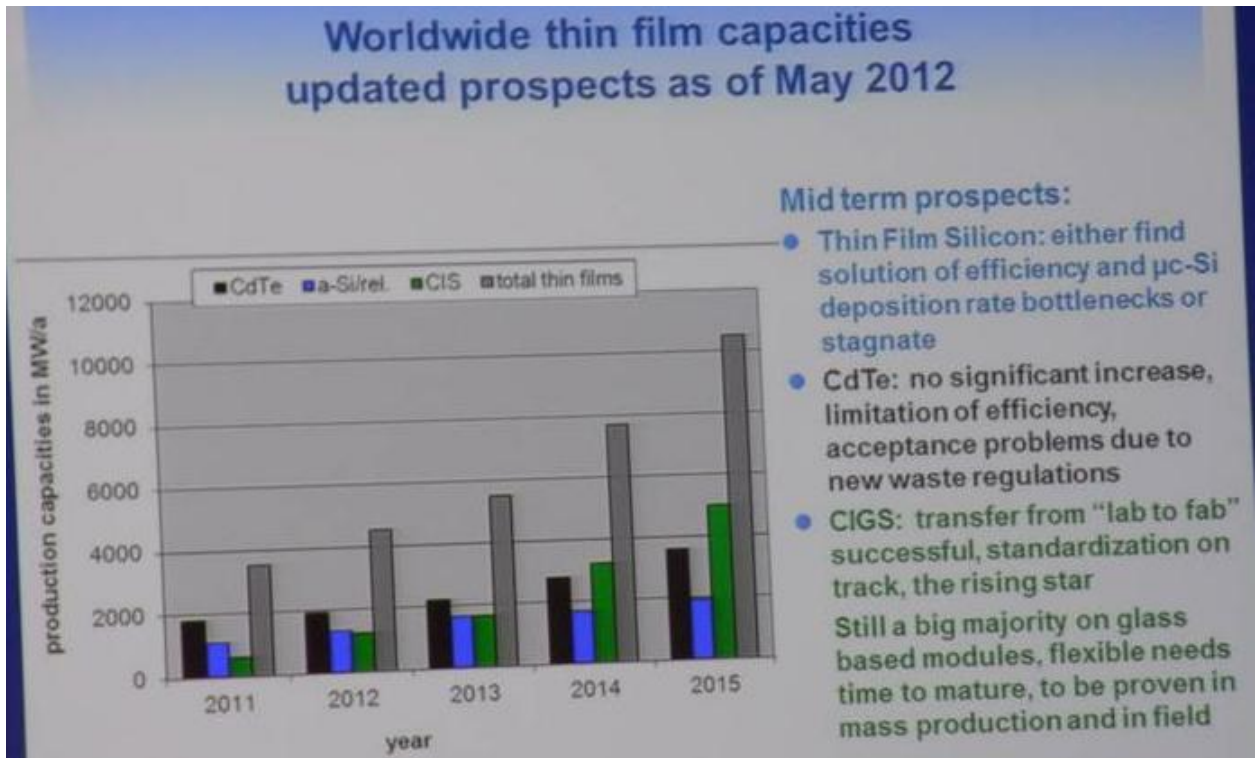


圖 3.78 各型薄膜 PV 之發展比重趨勢變化

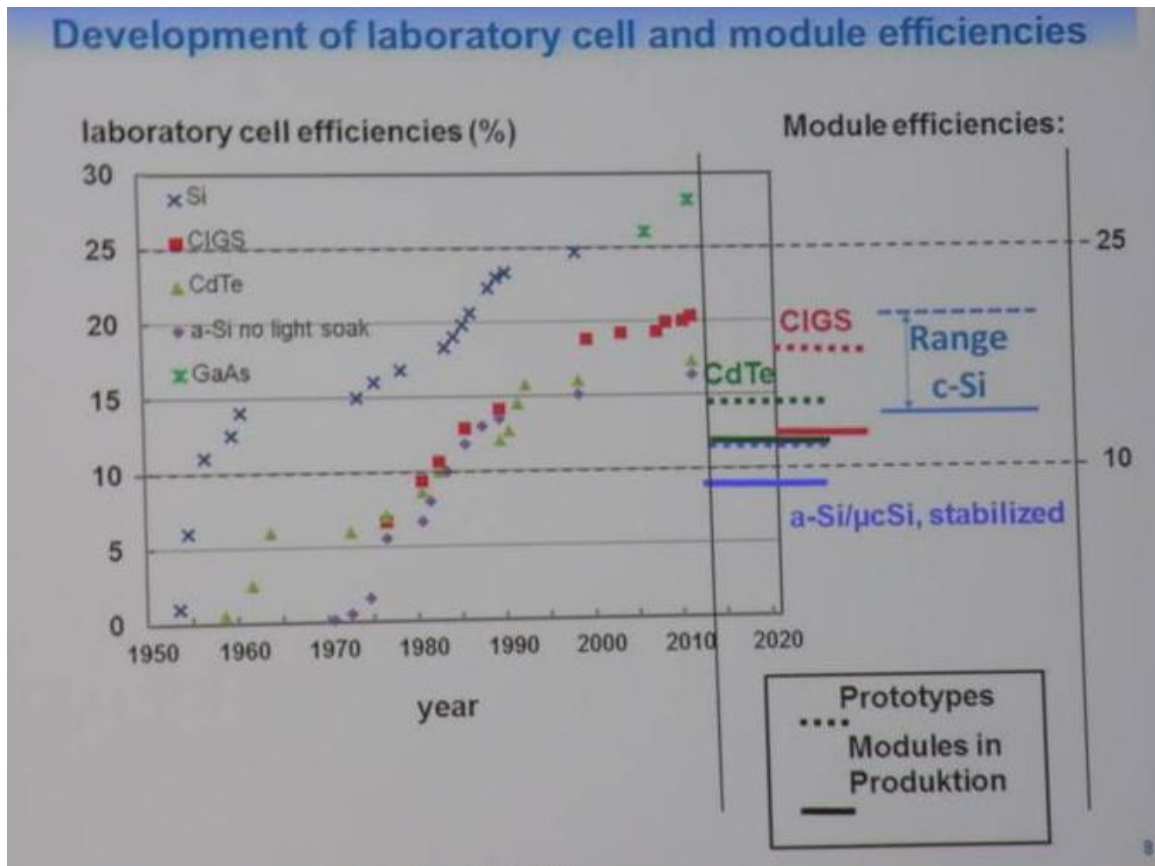


圖 3.79 半導體薄膜 PV 之實驗室元件及模組效率發展與目標

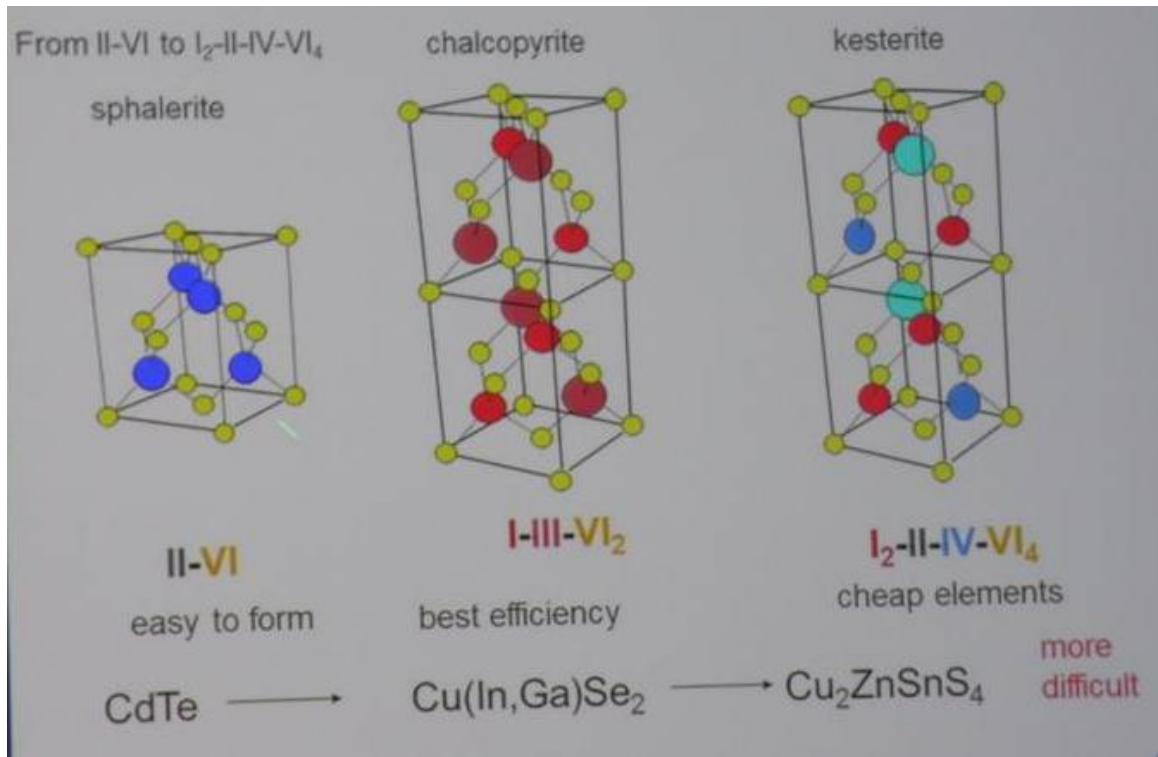


圖 3.80 半導體薄膜 PV 之材料、製造與效率之比較

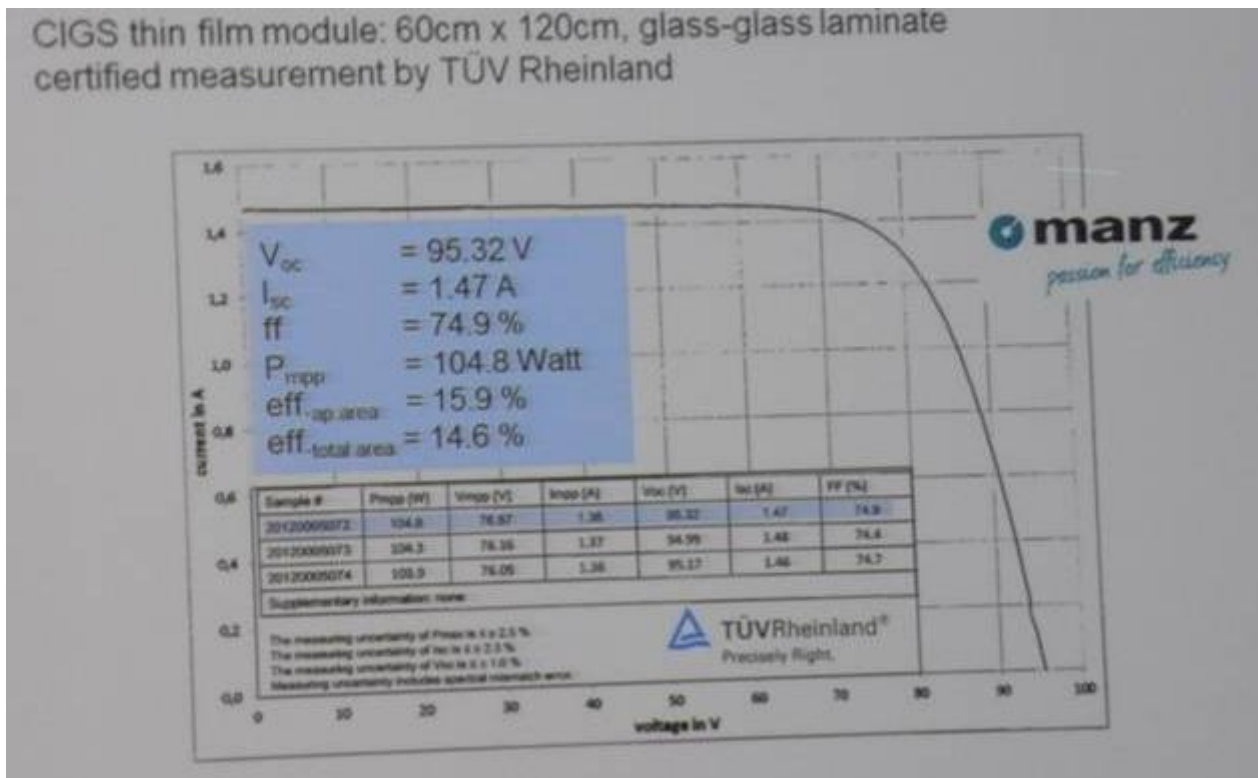


圖 3.81 manz 公司之 CIGS 模組效率



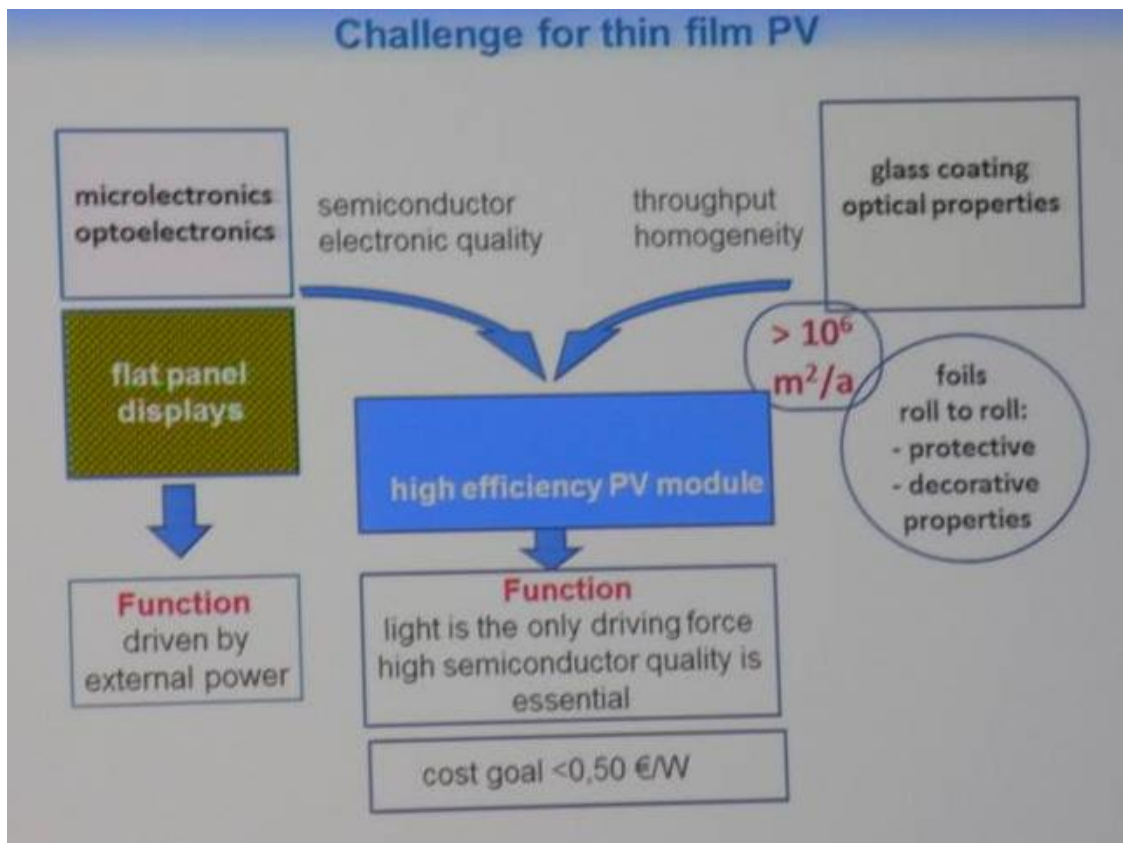


圖 3.82 半導體薄膜 PV 之挑戰

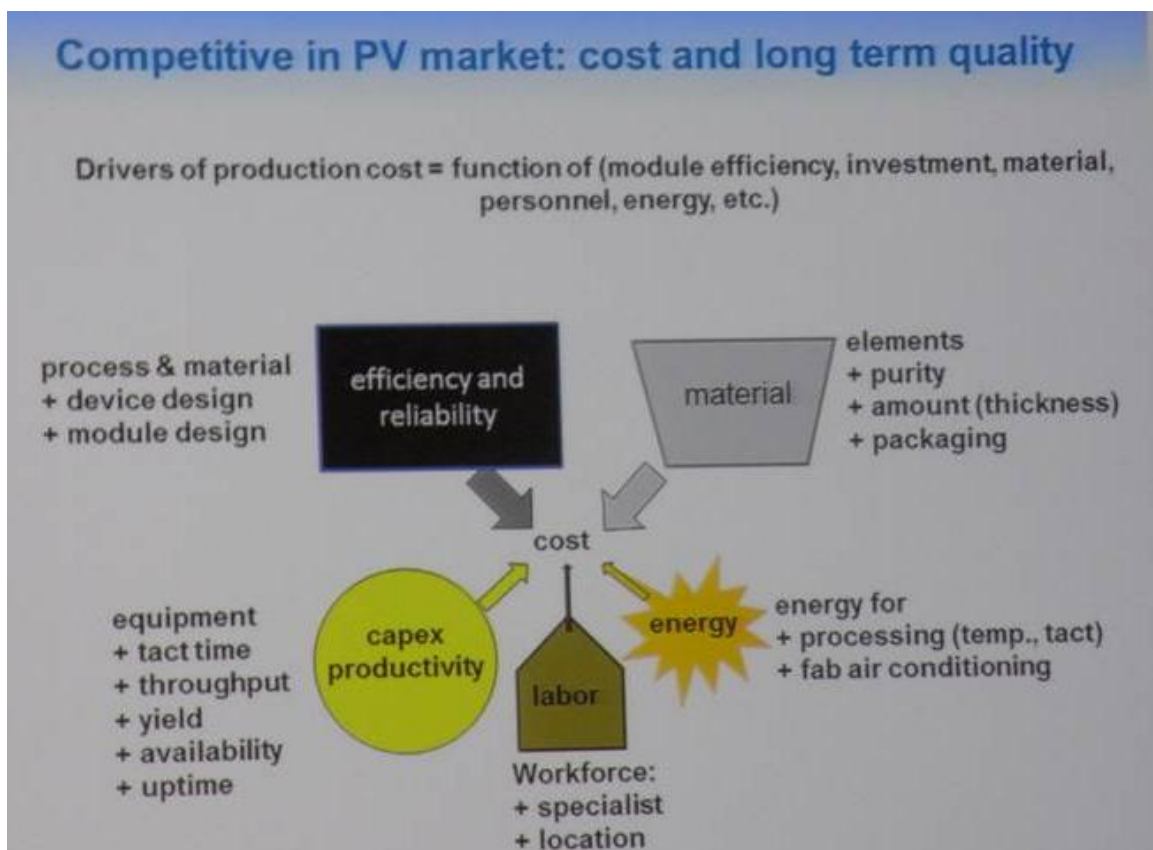


圖 3.83 PV 市場之競爭

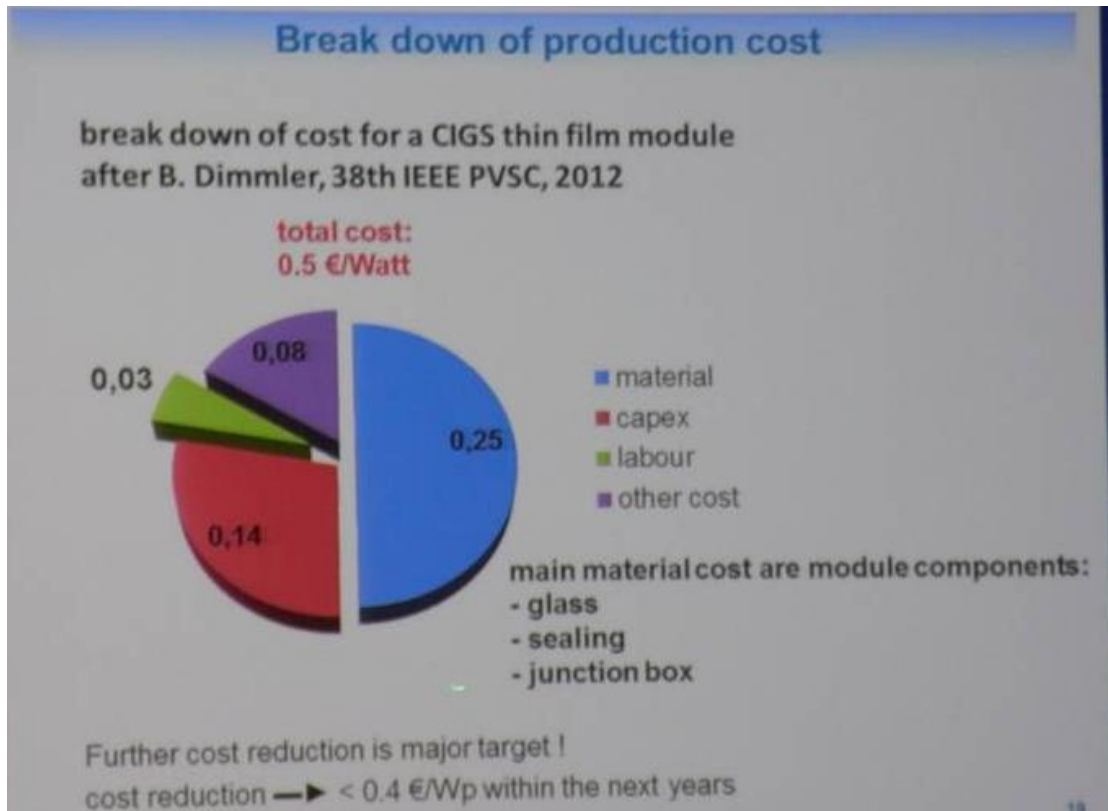


圖 3.84 CIGS 模組成本分析

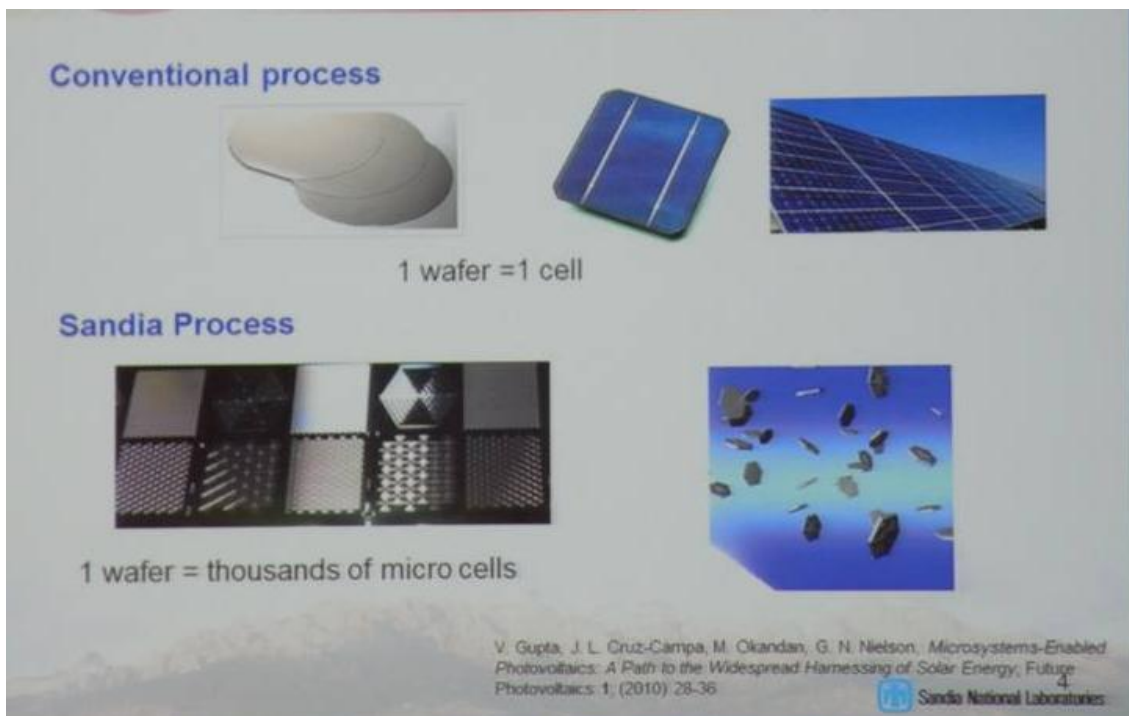


圖 3.85 超薄迷你模組與傳統晶片模組比較



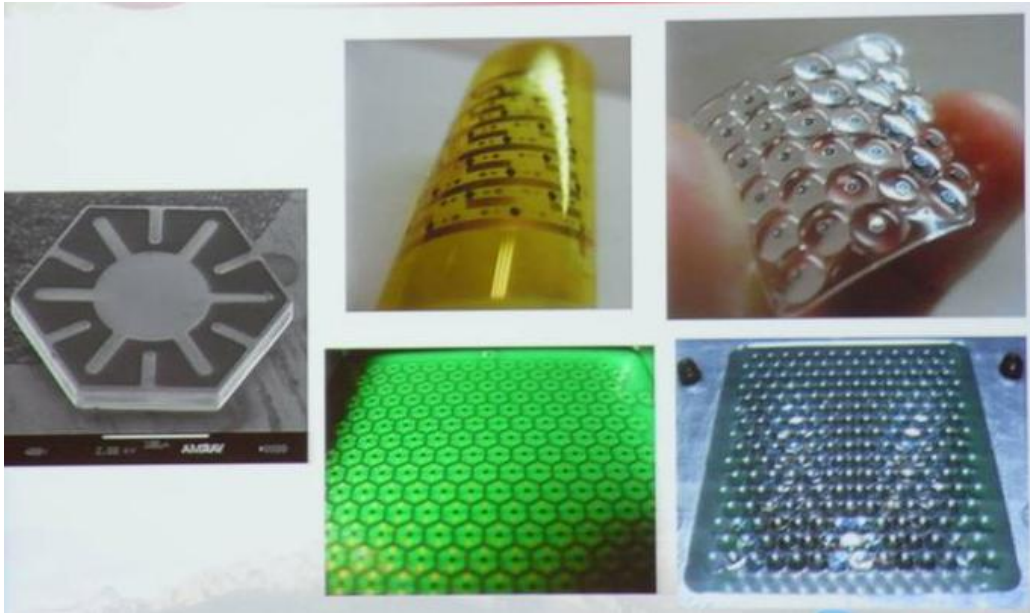


圖 3.86 超薄迷你模組外觀

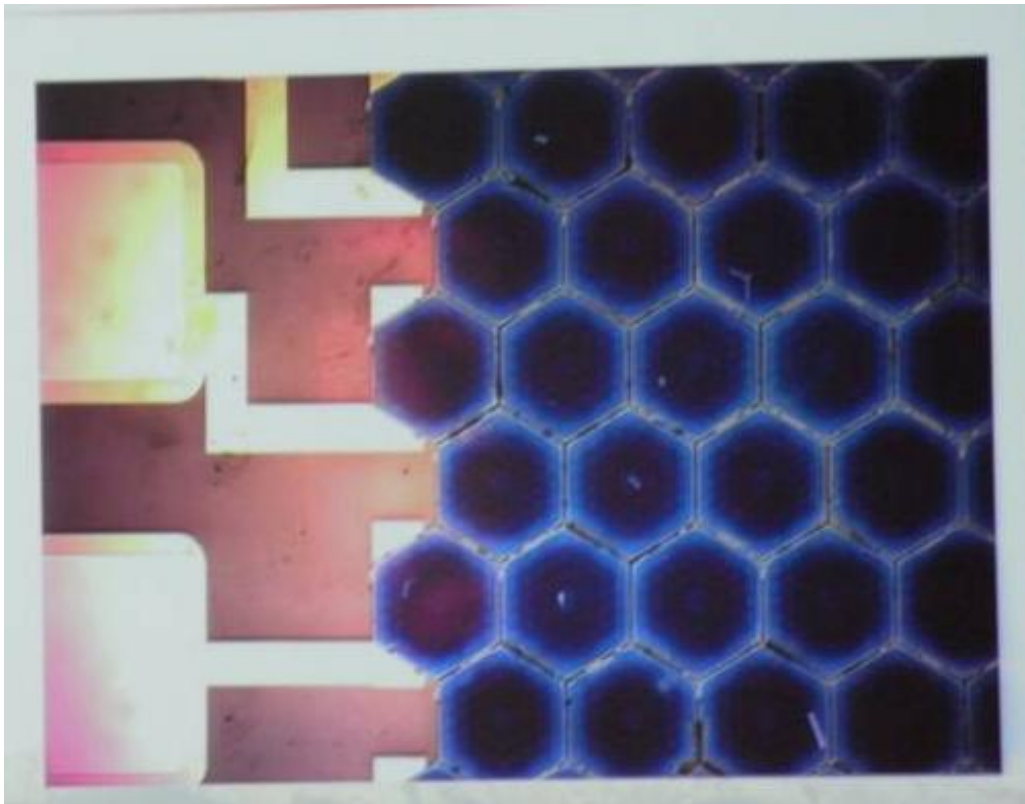


圖 3.87 超薄迷你模組設計(如同 IC 設計)

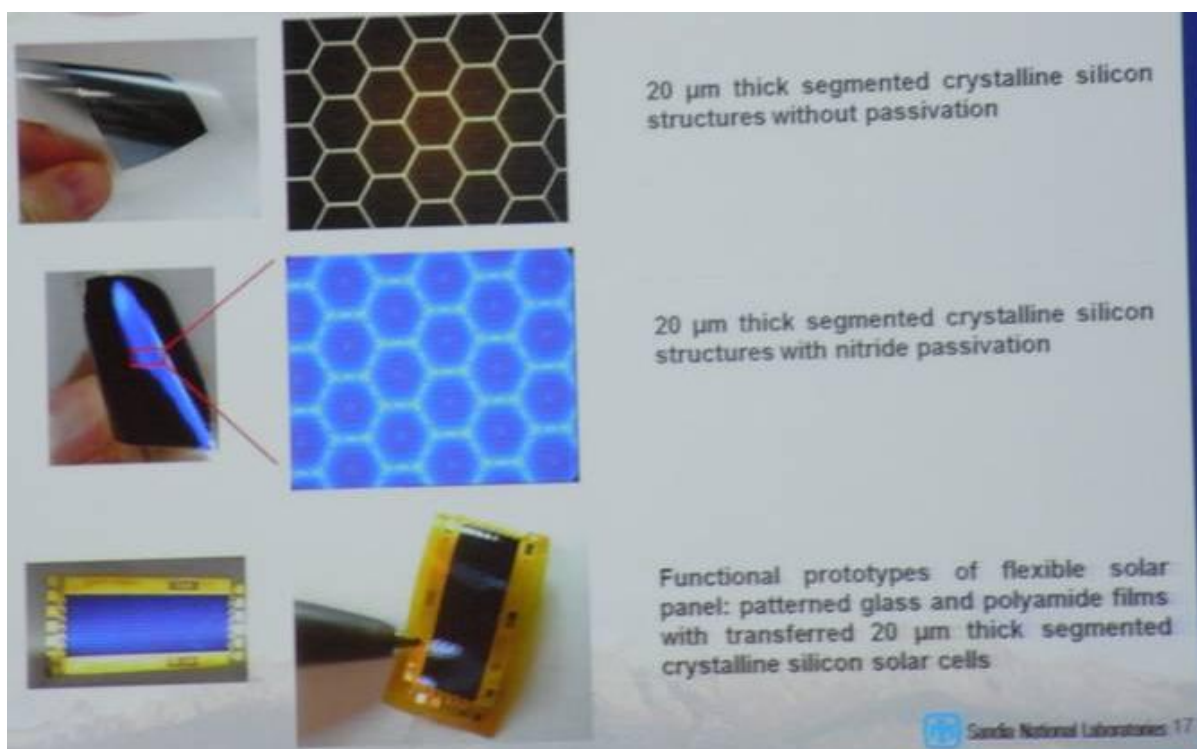


圖 3.88 超薄迷你模組之外觀變化(製程中)

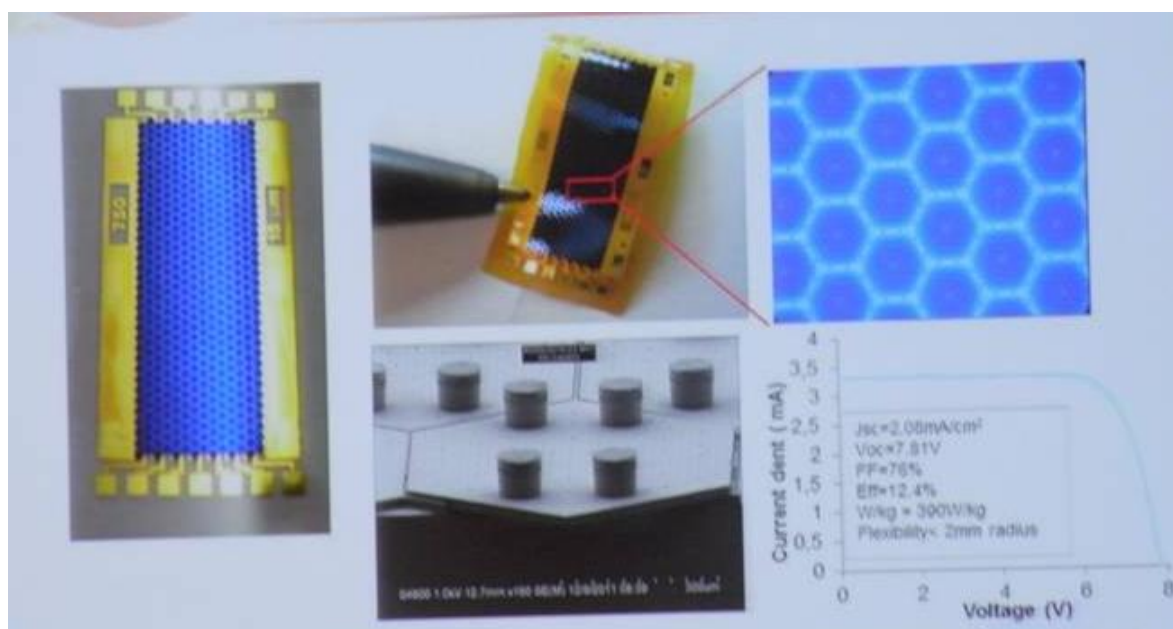


圖 3.89 超薄迷你模組之可撓性展現

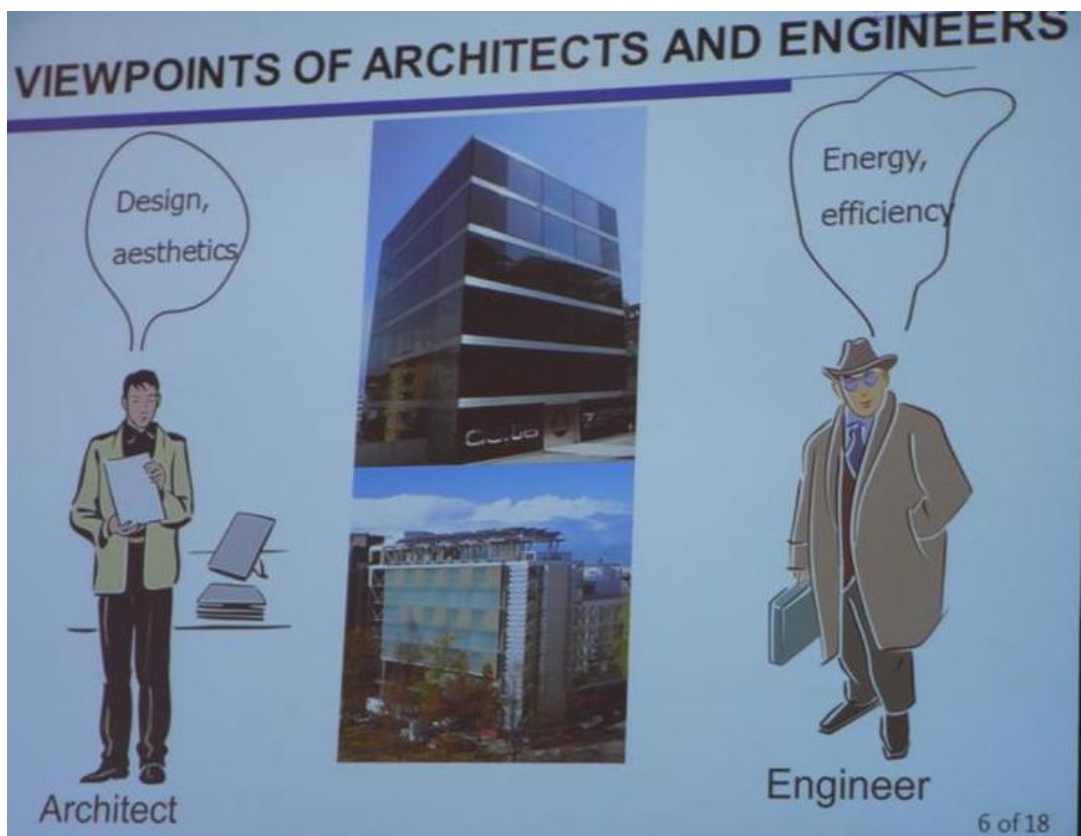


圖 3.90 工程師與建築師思維差異



圖 3.91 PV 相關之建物應用結合產品-I



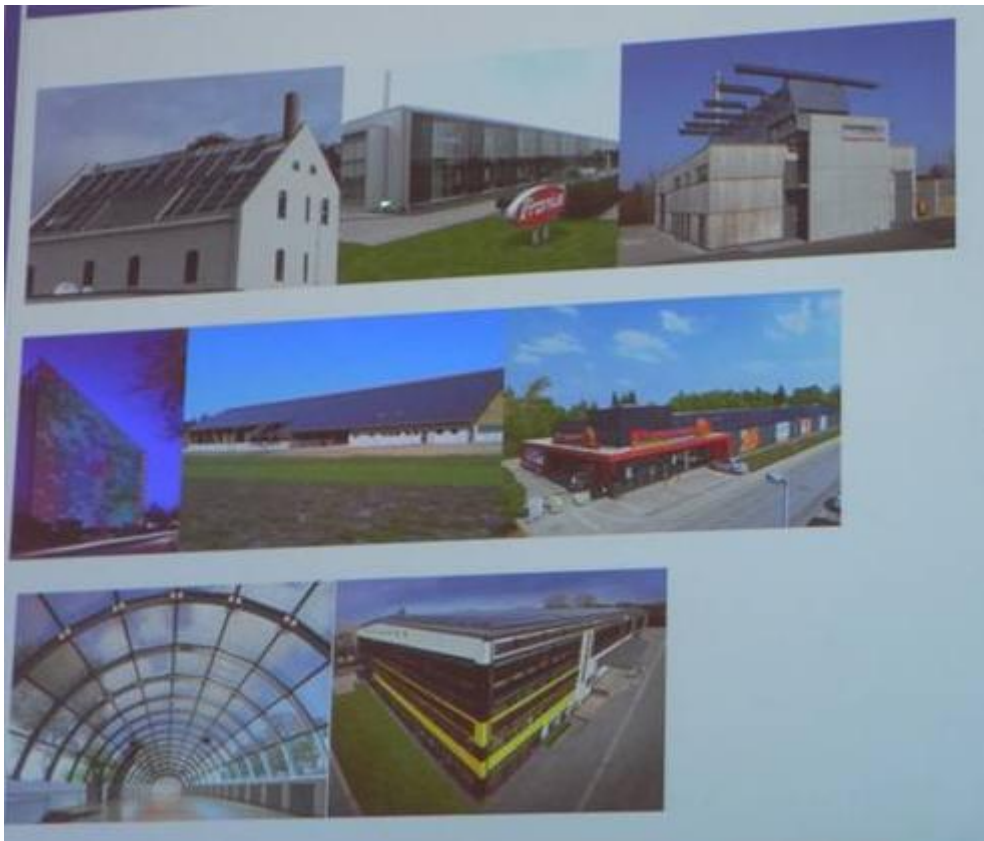


圖 3.92 PV 相關之建物應用結合產品-II



圖 3.93 PV 產品與隔音牆之結合



圖 3.94 建物整合太陽能科技(PV+solar thermal)

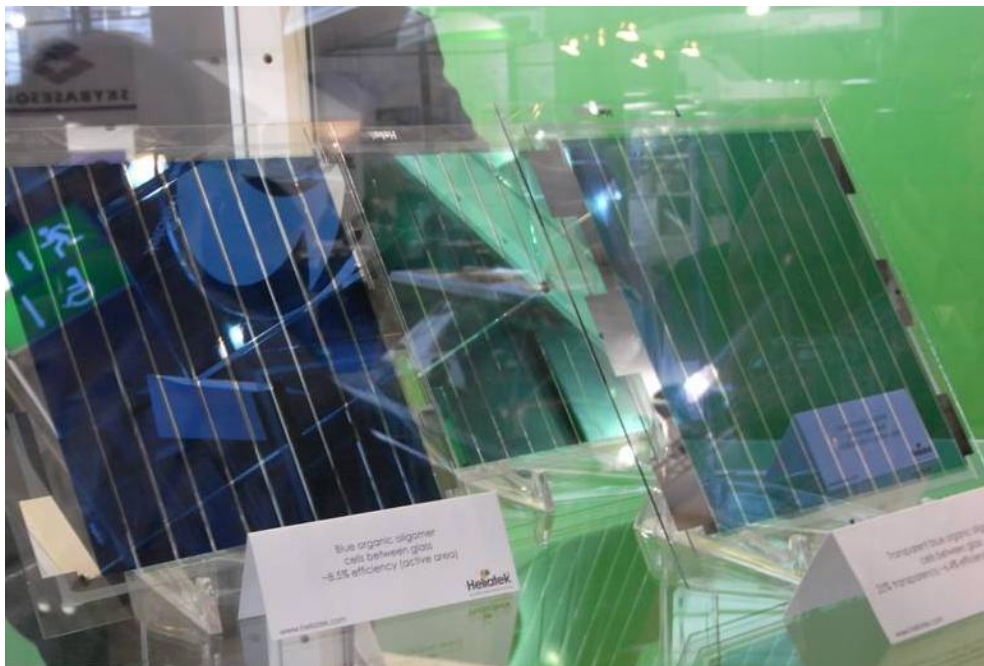


圖 3.95 玻璃基板不透明 OPV





圖 3.96 玻璃基板半透明 OPV



圖 3.97 塑膠基板 OPV



圖 3.98 塑膠基板半透明 OPV

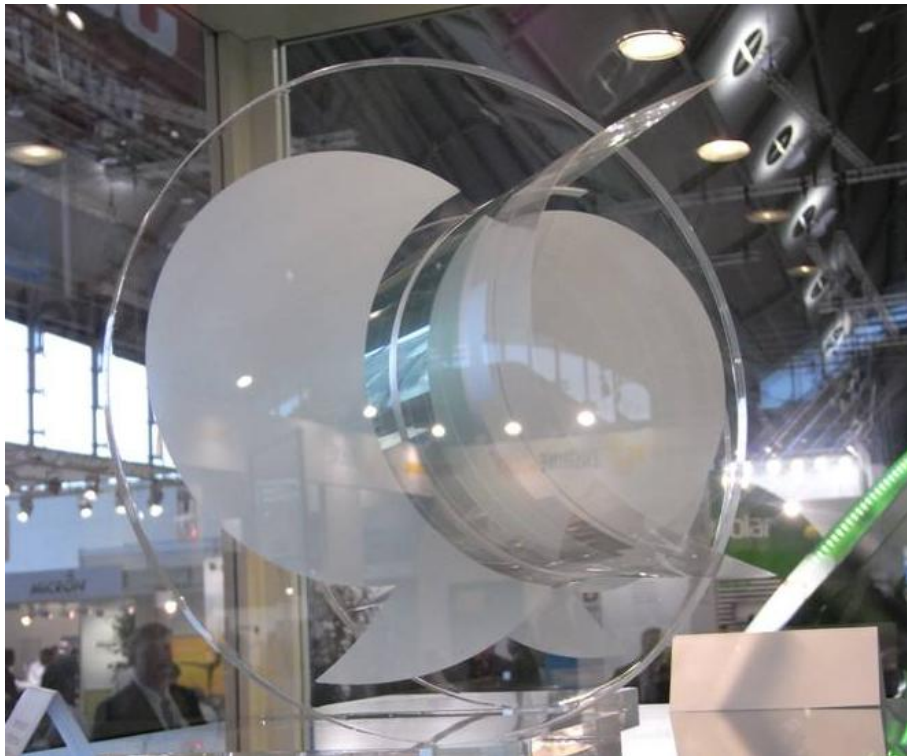


圖 3.99 塑膠基板半透明 OPV 之可撓性展現



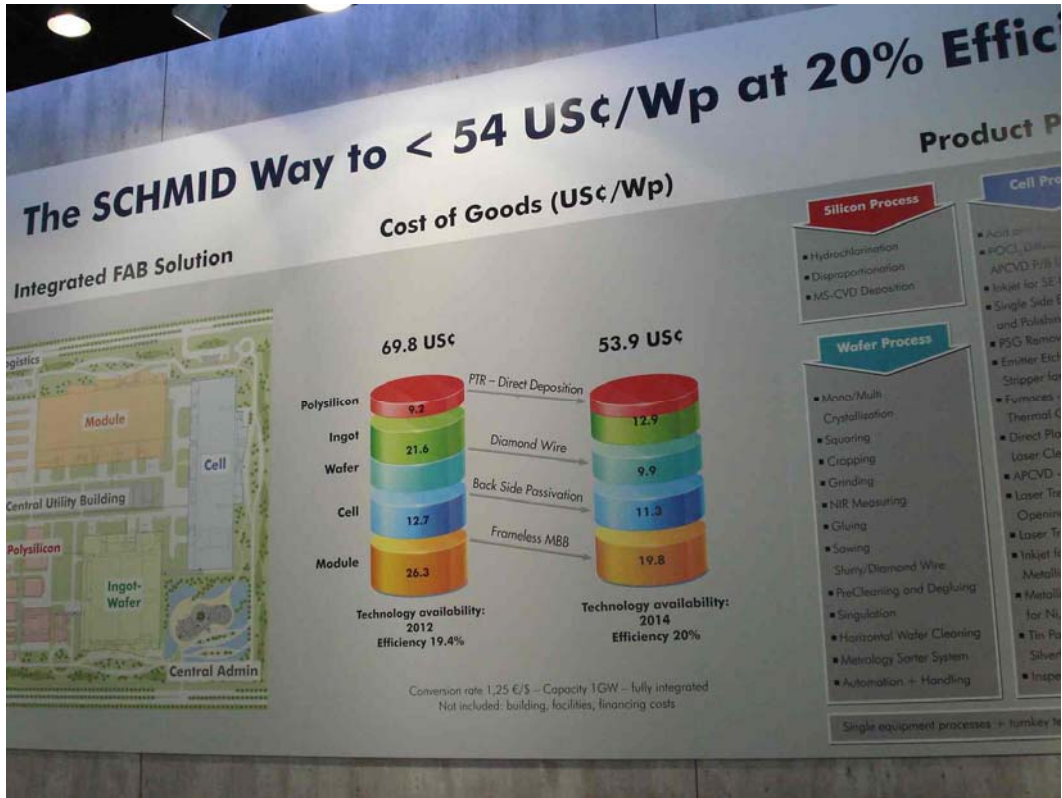


圖 3.100 矽晶太陽電池製作成本預估(Schmid 公司資料)

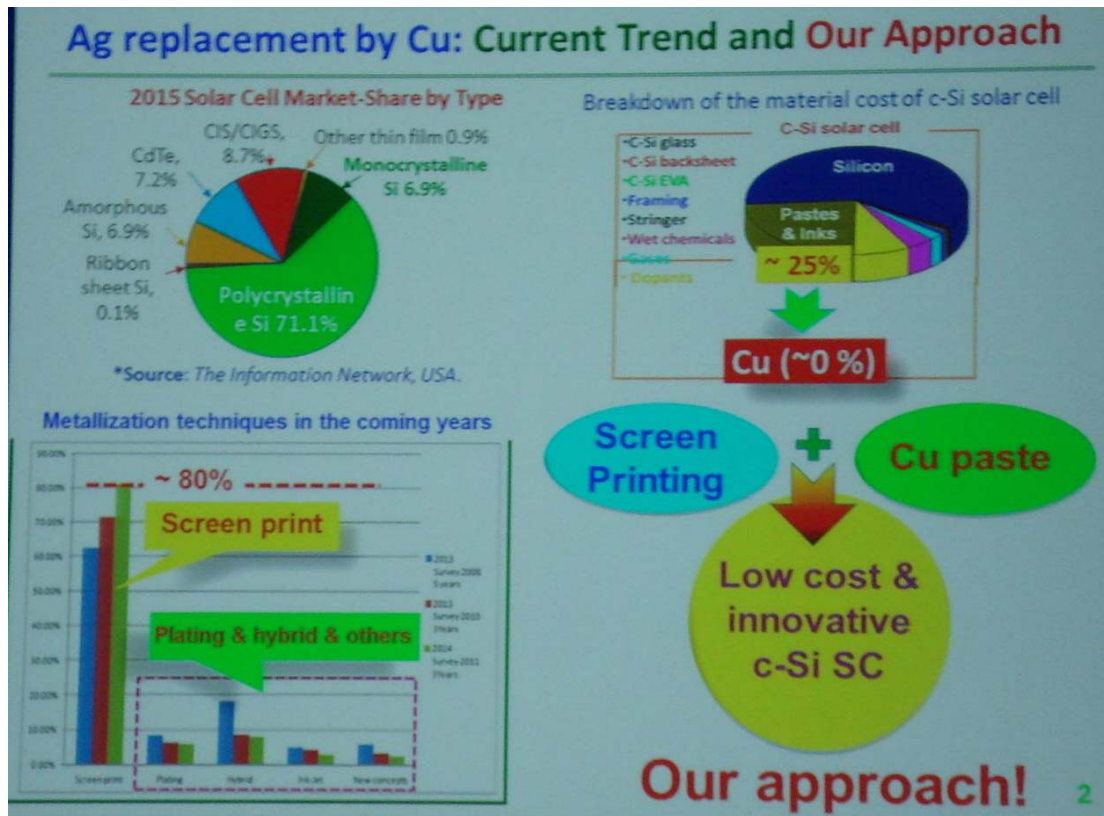


圖 3.101 Ag pastes & inks 佔整個 Si Solar cell 成本與發展 Cu pastes 需克服點

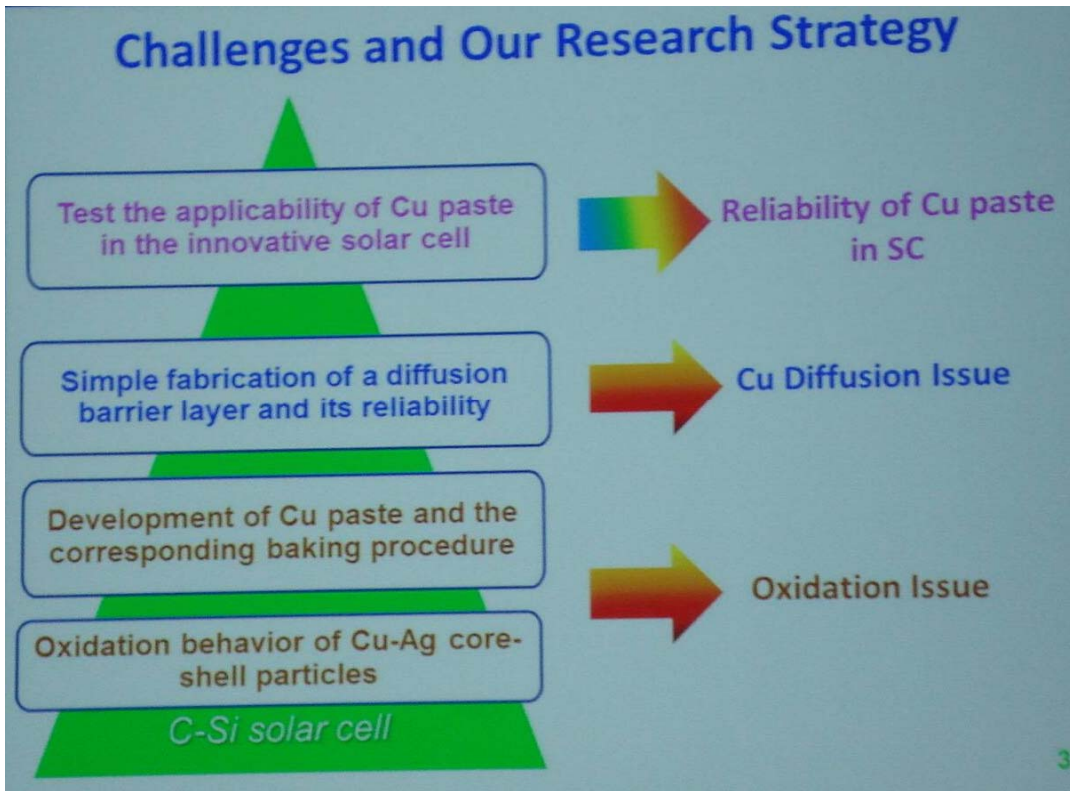


圖 3.102 使用 Cu pastes 之策略及挑戰

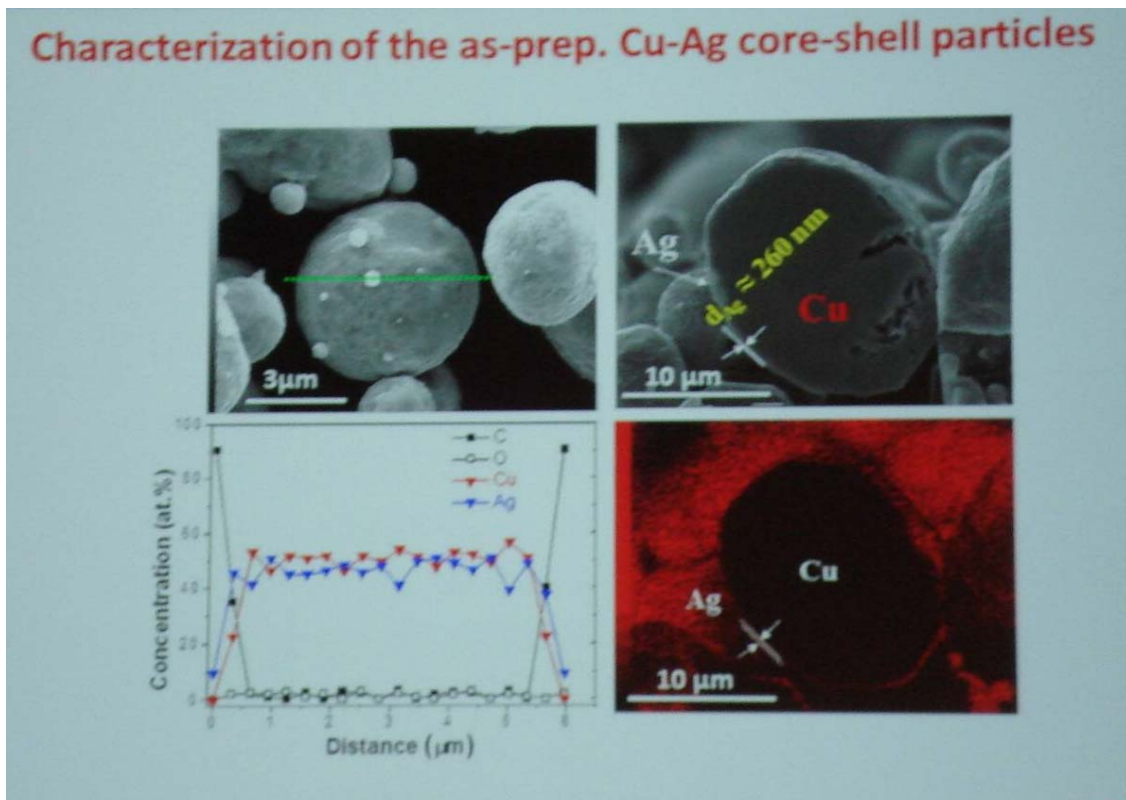


圖 3.103 製備 Cu-Ag Core-Shell particles 之特性分析



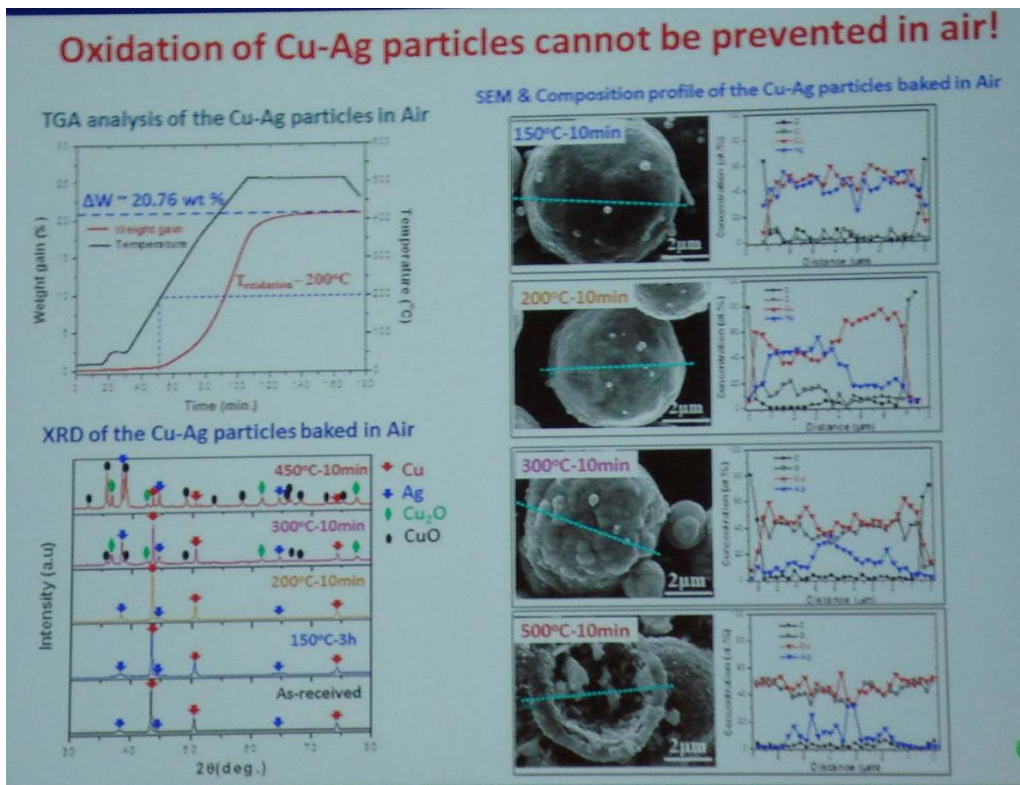


圖 3.104 Cu-Ag Core-Shell particles，在空氣中會有氧化現象發生

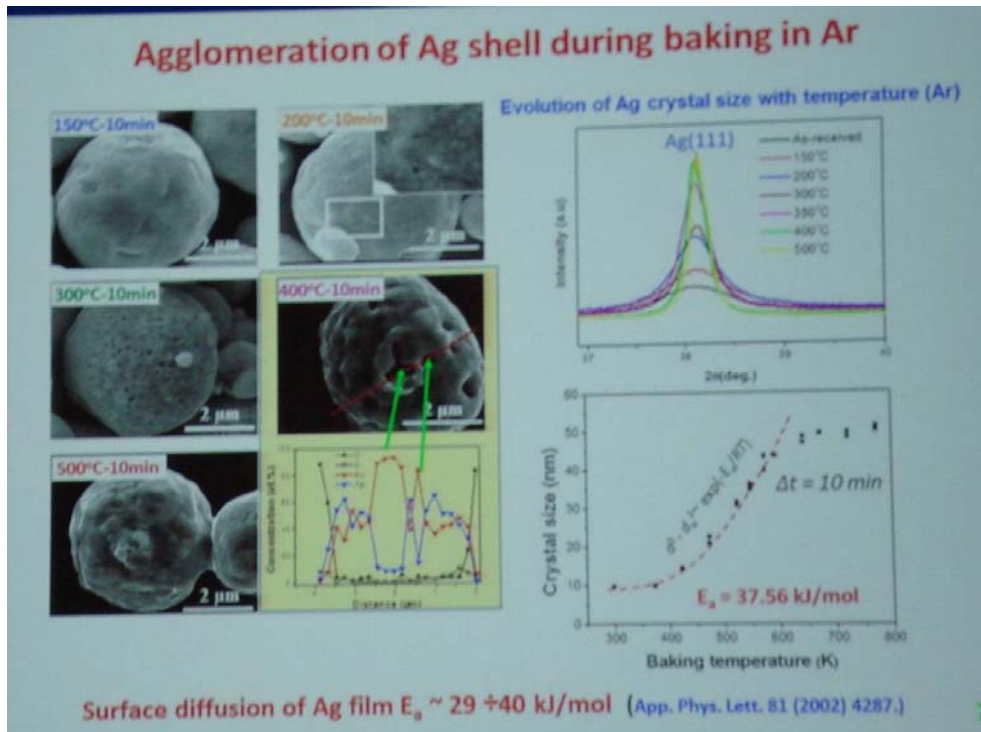


圖 3.105 Cu-Ag Core-Shell particles，在空氣中會有聚集現象



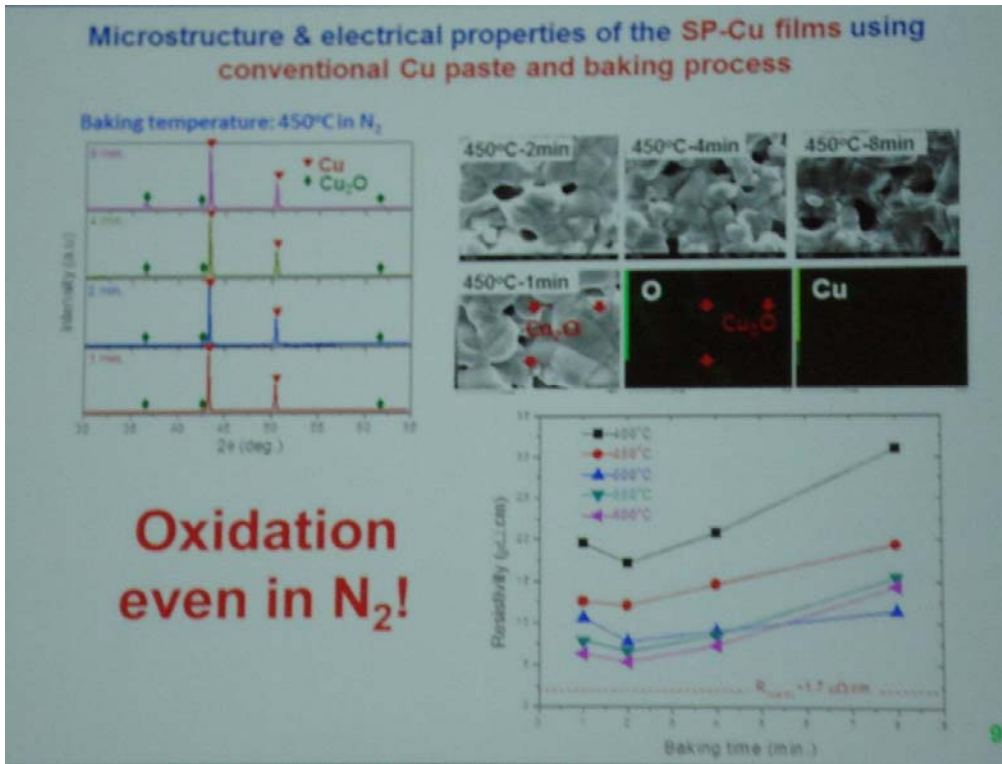


圖 3.106 傳統 Cu pastes 製備之薄膜，在氮氣中也會氧化

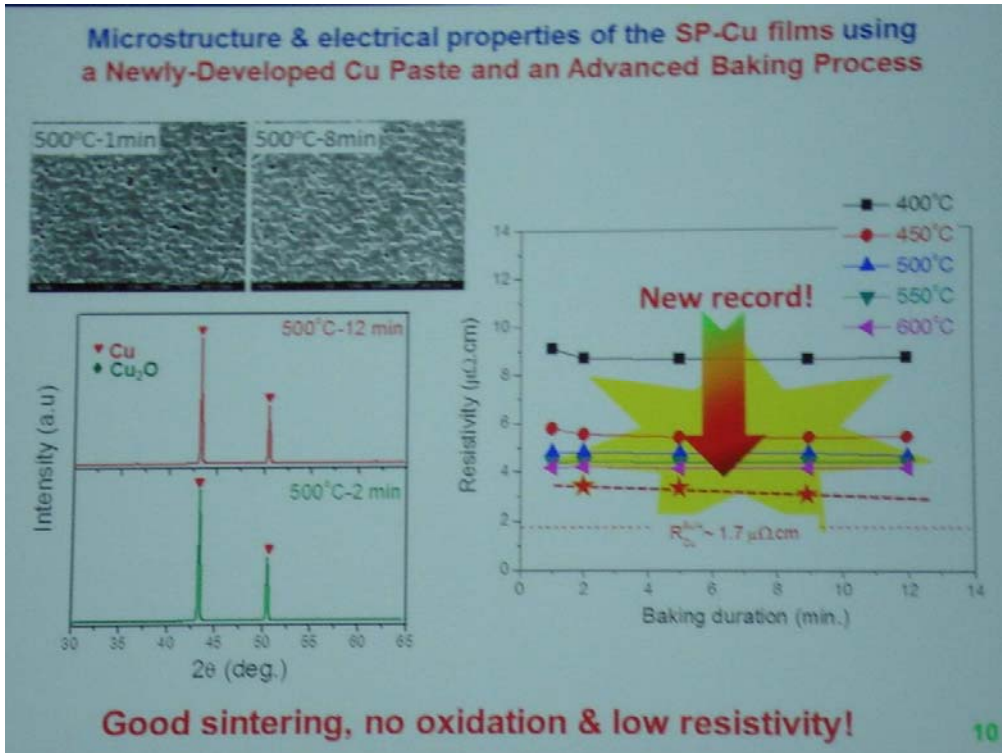


圖 3.107 日本 Tohoku University 宣稱已發展出易燒結、不易氧化與低電阻之新的 Cu pastes

## Barrier and electrical properties of Si/barrier/Cu contact

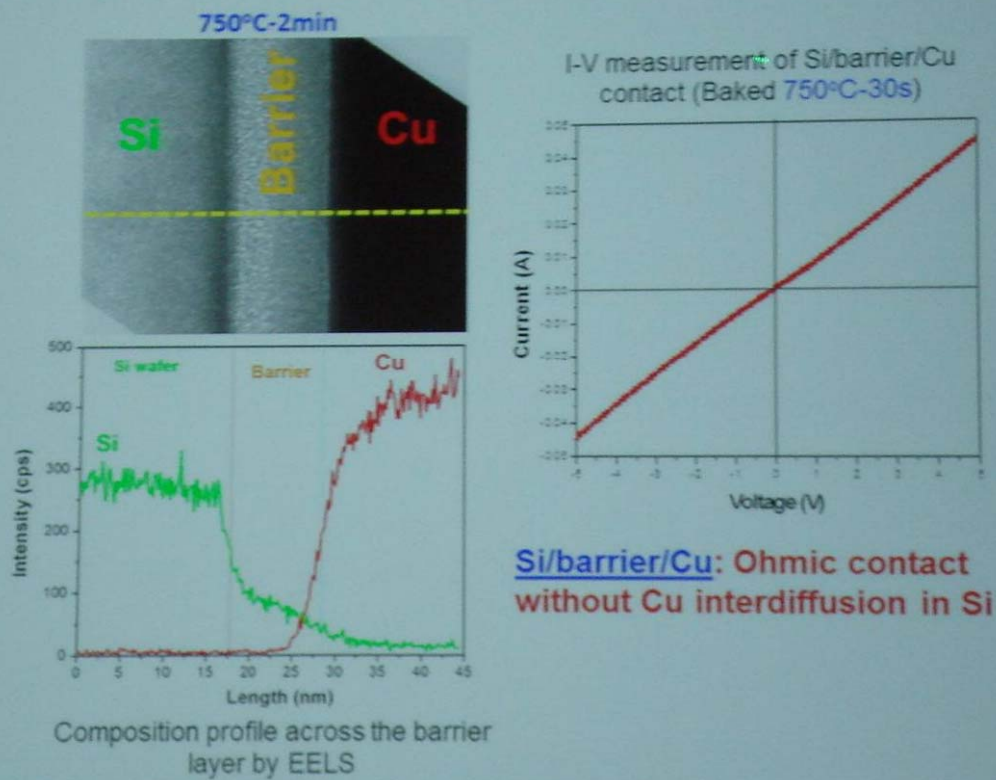


圖 3.108 日本 Tohoku University 亦發展出 barrier 可以阻止 Cu 擴散至 Si 且有很好的 ohmic contact