

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

高驅動電壓有機元件之研究
High Voltage Organic Photovoltaic Research

計畫編號：1062001INER005

受委託機關(構)：國立台灣大學嚴慶齡工業發展基金會合設工業研究中心

計畫主持人：林唯芳

聯絡電話：02-33664078

E-mail address：suwf@ntu.edu.tw

協同主持人：

研究期程：中華民國 106 年 04 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 46 萬元

核研所聯絡人員：李敬郁

報告日期：106 年 12 月 14 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	4
貳、研究方法與過程	6
一、 ZnO 奈米粒子溶液製備	6
二、鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池之製備程序	7
(一)基材清洗	7
(二)P3HT:ICBA 主動層之製備	7
(三)保護層之製備	7
(四)鈣鈦礦修飾層之製備	8
參、主要發現與結論	9
一、以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太 陽能電池	9
二、以 PEDOT:PSS(CPP)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太 陽能電池	13
三、以 MoO_3 作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太 陽能電池	16
四、應用示範	19
五、結 論	21
六、建 議	22
肆、參考文獻	23

高驅動電壓有機元件之研究

1062001INER005

林唯芳

國立台灣大學 材料科學與工程學系暨研究所

摘要

P3HT:ICBA 有機高分子太陽能電池由於效率高、穩定性佳且單體結構簡單，故已被廣泛的研究。而有機-無機鈣鈦礦材料由於具有雙極特性，在經過照光後此材料能夠自行產生電壓。故本研究結合了 P3HT:ICBA 有機高分子與鈣鈦礦系統，藉由導入鈣鈦礦高動電壓材以提升 P3HT:ICBA 太陽能電池的電壓表現。在此修飾型元件中，我們採用全無退火的中間層、鈣鈦礦前驅物與用以輔助鈣鈦礦的電洞傳導層製程。目的除了能減少製程的耗能與成本，還能增加主動層材料的選擇性。結果顯示中間層採用 3 nm MoO_3 的 P3HT:ICBA 太陽能電池標準片做比較，開路電壓由 0.86 V 提升至 1.60 V ;效率由 3.34 % 提升至 4.35 %。

最後我們證實在實際應用上，不管是在一顆太陽或弱光下，修飾型元件都能夠提供足夠的輸出電壓並成功驅動市售電器。

High Voltage Organic Photovoltaic Research

1062001INER005

Wei-Fang Su

Dept. of Materials Science and Engineering, National Taiwan
University, Taipei, Taiwan

Abstract

P3HT:ICBA polymer solar cell system has been extensively investigated in recent year because of its high efficiency, high stability and the ease of synthesis. On the other hand, organic-inorganic hybrid perovskites have the ambipolar property, which can produce voltage by themselves under light irradiation. In this work, we combine the P3HT:ICBA and perovskite system by introducing perovskite as high voltage driver into P3HT:ICBA solar cells to enhance their voltage performance. In order to reduce the energy consumption and increase more extensive choices of materials in active layers, we develop the whole non-annealing fabrication process, the interconnecting layers, perovskite layer and hole transporting layer of perovskite are process without annealing. Compared with the standard P3HT:ICBA solar cell, the $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -modified P3HT:ICBA solar cell with 3 nm MoO_3/ZnO interconnecting layers show significant enhancement in open circuit

voltage (V_{oc}) and power conversion efficiency(PCE), increase from 0.86 V to 1.60 V and 3.34 % to 4.35 % respectively.

Finally, for the practical application, we successfully prove that our modified solar cells can provide enough voltage output to drive commercial appliances no matter under one sun or dim light irradiation.

壹、計畫緣起與目的

本研究計畫之主要目標為，利用導電高分子及有機無機鈣鈦礦等可溶液製程之技術開發出具備高驅動電壓之新穎元件結構。隨著近年來太陽能電池這一領域的蓬勃發展，太陽能之各種應用也越趨增加。從早期的室外大型發電設備，到近年來提出的種種新穎概念包括室內光供電裝置甚至太陽能纖維等等[1,2]。實現這些有趣的創新概念靠的就是不斷被開發出來的新穎光伏材料。有機太陽能電池即是其中一種新穎的光伏材料系統。該系統主要以有機小分子或高分子作為光電轉換之主動層材料，由於不同的分子結構即可展現不同的光電特性，研究團隊們可以利用主鏈段上的推拉電子強度、主鏈的共平面度、支鏈的長短、支鏈的位置等等不同的參數，設計出理想的高效率光電材料，因此是一個非常有潛力的系統。此外，該系統還具有許多獨特的優勢，包括質輕、柔軟可撓曲、可溶液製程、可調色性高、以及可在弱光下使用等。有機無機鈣鈦礦太陽能電池則是另一類新穎的光伏材料。該系統源自於染料敏化太陽能電池，甫提出即被廣泛且深入的研究，因此也跟著開發出許多不同於傳統染料敏化太陽能電池的元件結構，且元件效率也快速提升至超過20%[3]。該系統主要的特色在於可溶液製程的低缺陷高品質結晶[4]，因此載子在鈣鈦礦中的壽命長、遷移率高、移動距離長[5]，且光激發產生的電子電洞對本身的束縛能也小(約為 50 meV)，因此可

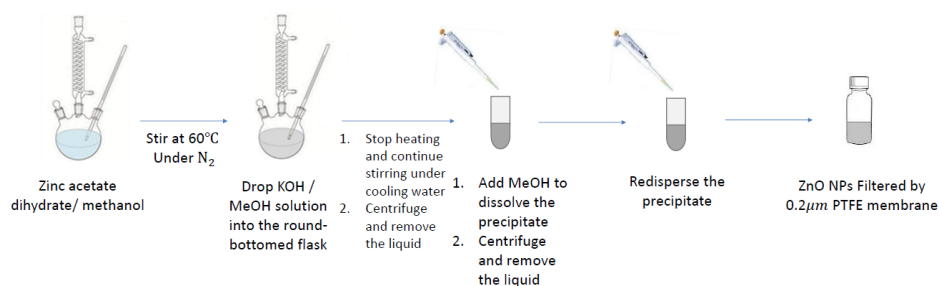
以相當有效的傳導至電極，進而表現出優異的光電轉換效率。

由於上述二者光伏材料皆屬於直接能隙的材料，因此在光強度較弱的情況下仍能夠維持良好之光伏反應。且二者之開路電壓皆比大多數之太陽能系統來的高。在太陽光模擬照射下，有機太陽能電池約 0.8 伏特，有機無機鈣鈦礦太陽能電池甚至可超過 1 伏特。本計畫之目標，即欲藉由有機太陽能電池與有機無機鈣鈦礦太陽能電池二者可操作於弱光環境與高光電壓的特性，再利用串疊型太陽能電池的結構，進一步提升光電壓，製備出在室內光照射下仍能表現出高光電壓的太陽能元件，以作為近年來蓬勃發展之穿戴式電子零件與低功耗電子元件之自主供電裝置。

貳、研究方法與過程

一、ZnO 奈米粒子溶液製備

我們將 ZnO 奈米粒子作為太陽能電池的電子傳導層。ZnO 奈米粒子的合成步驟，如圖一所示。在旋轉塗佈前，將 IPA 溶劑加入至過濾後的 ZnO 奈米粒子原液中，將其濃度稀釋成 10 mg ZnO 奈米粒子/1mL 的 IPA。另外關於 ZnO:聚乙炔亞胺 (PEIE)的配置為以下步驟。我們將 IPA 加入 50 μ l 的 40 wt% PEIE 至 5 mL，將其濃度稀釋成 0.4 wt%的 PEIE;再將 IPA 溶劑與 0.4 wt%的 PEIE 溶液加入至過濾後的 ZnO 奈米粒子原液中，將其濃度稀釋成 10 mg ZnO 奈米粒子/1mL 的 IPA。



圖一、ZnO 奈米粒子之合成步驟流程圖。

二、鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池之製備程序

(一) 基材清洗

元件基材是使用 ITO 導電玻璃，以下為 ITO 玻璃的清潔流程。首先將 ITO 試片浸泡於氨水、雙氧水以及去離子水的混和溶液中，並以超音波震盪三十分鐘；接著將 ITO 玻璃浸泡於異丙醇中，並以超音波震盪三十分鐘；最後以氧電漿清潔 ITO 試片表面十五分鐘，即完成清潔步驟。

(二) P3HT:ICBA 主動層之製備

將清潔完畢後的 ITO 試片送入手套箱。ZnO:PEIE 溶液以 3000 r.p.m、四十秒塗佈於 ITO 試片上，並以 150 °C 熱退火十分鐘，完成電子傳導層之製備。接著，將 P3HT:ICBA 溶液以 800 r.p.m、八十秒塗佈於電子傳導層上，以 150 °C 熱退火十分鐘，完成主動層之製備。

(三) 中間連接層(保護層)之製備

放置一天後，我們採用不同的保護層組合，其分別為 PEDOT:PSS(AI 4083)、PEDOT:PSS(CPP)與 2, 3, 7, 11 或 14 nm 之 MoO₃。並於保護層上塗佈 ZnO 奈米粒子，以 3000 r.p.m 塗佈四十秒，以 150 °C 熱退火 10 分鐘或真空乾燥兩個小時。

1. PEDOT:PSS(AI 4083)作為保護層

將 PEDOT:PSS(AI 4083)溶液塗佈在主動層上，以 150°C 熱退火 10 分鐘。無退火製程則是真空乾燥兩個小時。

2. PEDOT:PSS(CPP)作為保護層

將 PEDOT:PSS(CPP)溶液塗佈在主動層上，以 150 °C 熱退火 5 分鐘。無退火製程則是真空乾燥兩個小時。

3. MoO₃ 作為保護層

MoO₃ 則是使用熱蒸鍍法，將厚度分別控制在 2, 3, 7, 11 或 14 nm。

(四) 鈣鈦礦修飾層之製備

我們以兩步驟法製備鈣鈦礦薄膜，先將 PbI₂ 以 3000 r.p.m 十五秒塗佈於試片上，並真空乾燥半小時。MAI 以 6000 r.p.m 三十秒塗佈於試片，與 PbI₂ 反應形成鈣鈦礦薄膜，並靜置在手套箱乾燥一個小時。在此，以 spiro-OMeTAD 溶液作為電洞傳導材，並以 4000 r.p.m 三十秒塗佈於鈣鈦礦薄膜上。最後用熱蒸鍍法，沉積上 100 nm 金電極，即完成元件之製備。

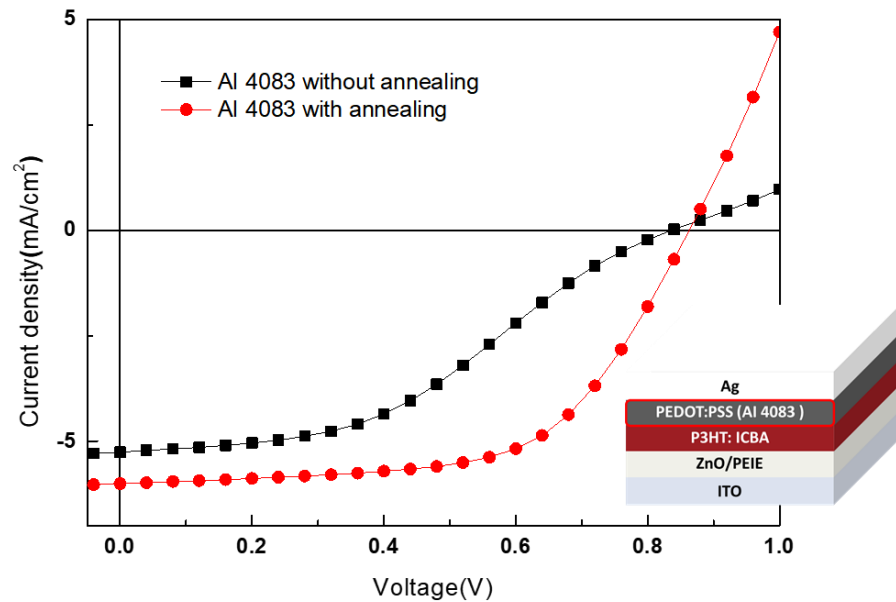
參、主要發現與結論

為了增加高分子太陽能電池商業化的可行性及提升元件之光電轉換效率，我們採用串疊型元件結構達到充分利用太陽光譜的目標，進而提升元件效率。由於有機無機鈣鈦礦與高分子同樣具有可溶液製程之特性，加上其高開路電壓與高短路電流之特性，我們選擇有機無機鈣鈦礦作為高分子太陽能電池之高驅動電壓材。

一、以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池

我們以 P3HT:ICBA 與 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 作為示範，根據本團隊過去委託計畫得到的經驗，開發出最適當之保護層。首先我們以 PEDOT (AI 4083)作為保護層。目前實驗結果 P3HT:ICBA 元件可達開路電壓 0.86 V，元件效率可達 3.11%，填滿因子約 60.04%，如圖二及表一所示。然而保護層之熱退火製程，會影響到 P3HT:ICBA 主動層之表面形態，進而造成效率表現不佳。故熱退火條件相當關鍵，最佳的熱退火條件為 PEDOT:PSS(AI 4083)無退火及 ZnO 有退火。主要原因為對 ZnO 進行熱退火時，同時也可以對 PEDOT:PSS(AI 4083)熱退火進而去除水分。然而若對 PEDOT:PSS(AI 4083)及 ZnO 都各自進行熱退火的話，熱退火次數過多可能會造成 P3HT:ICBA 主動層表現形態過度相分離，導致元件效率表現不佳。經過熱退火條件優化後，以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池開路電壓可達 1.20 V，效率可達 3.03%，填滿因子約 41.40%，

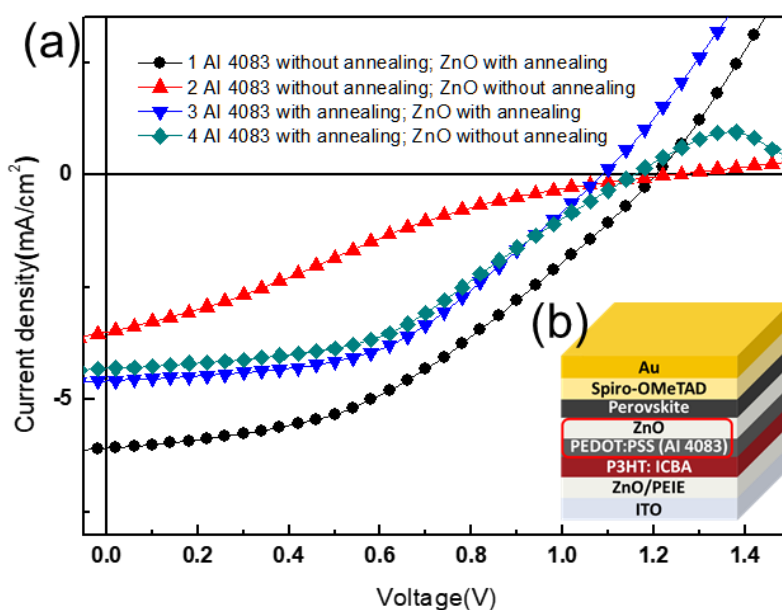
如圖三及表二所示。



圖二、(a)以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為電洞傳導層在有無熱退火條件下對 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池之 I-V 曲線。(b)以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為電洞傳導層之 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池元件結構示意圖。

表一、以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為電洞傳導層在有無熱退火條件下對 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池之元件表現關係。

HTL	Annealing	V_{oc} (volts)	J_{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor(%)	PCE(%)
AI 4083	X	0.84	5.26	40.44	1.78
	V	0.86	6.01	60.04	3.11



圖三、(a)PEDOT:PSS(AI 4083)保護層與 ZnO 奈米粒子熱退火條件與元件表現關係之 I-V 曲線。(b) 以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池的元件結構示意圖。

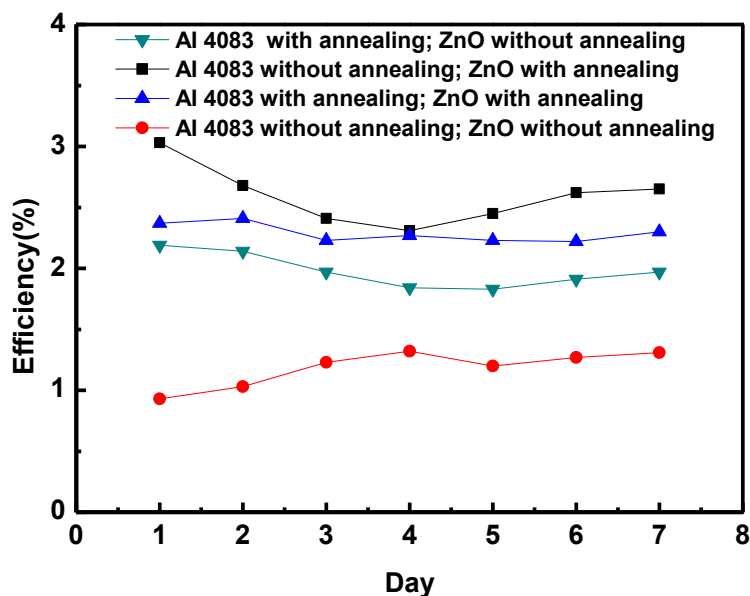
表二、PEDOT:PSS(AI 4083)保護層與 ZnO 奈米粒子熱退火條件與元件表現之關係。

Sample	AI 4083 annealing	ZnO annealing	V _{oc} (volts)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor(%)	PCE(%)
Tandem 1	X	V	1.20	6.07	41.40	3.03
Tandem 2	X	X	1.24	3.49	21.39	0.93
Tandem 3	V	V	1.09	4.58	47.65	2.37
Tandem 4	V	X	1.16	4.31	43.94	2.19

此結果顯示本團隊使用中間連接層成功製作出高分子-鈣鈦礦串疊型太陽能電池。然而，串疊型元件之效率未達單顆 P3HT:ICBA

元件之效率，主要原因是中間層材料 PEDOT:PSS (AI 4083)是水相溶液，導致其在疏水的 P3HT:ICBA 上不易塗佈，因此層與層之間的連接較差。此外水相的 PEDOT:PSS (AI 4083)可能會殘留水份，進而影響到 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的成膜性。

有鑑於有機-無機鈣鈦礦材料常有穩定性不良的爭論，我們有對中間層採用有無退火 PEDOT:PSS(AI 4083)/ZnO 的鈣鈦礦修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池做七天的穩定性測試，以檢驗將不穩定的鈣鈦礦材料引進至 P3HT:ICBA 太陽能電池系統中，系統是否依然能保持穩定的表現。圖四記錄元件的光電轉換效率表現。從結果中可以看出，即使導入鈣鈦礦作為修飾層，經過七天後其效率也沒有明顯的下降。證明了導入鈣鈦礦材料系統仍可以維持穩定表現。

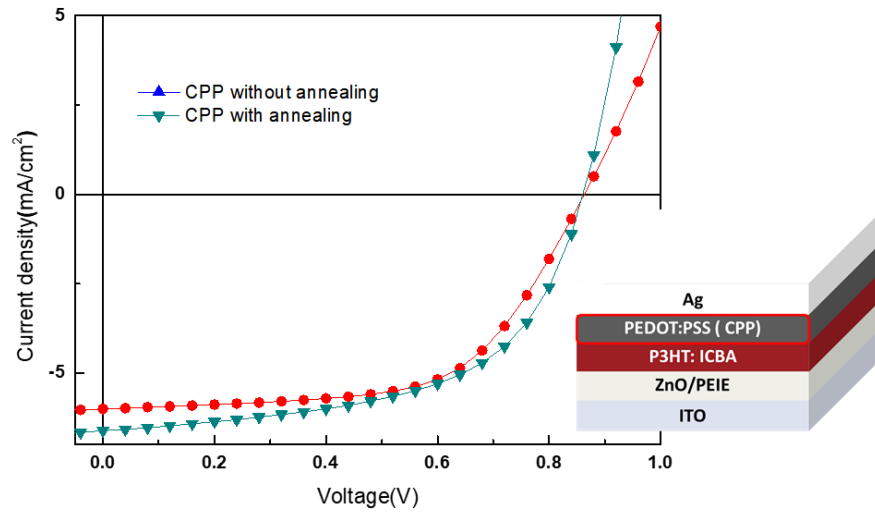


圖四、以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池的元件穩定性。

二、以 PEDOT:PSS(CPP)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池

將水相的 PEDOT:PSS (AI 4083)換成對於疏水材料有較好附著性的 PEDOT:PSS(CPP)，進而改善 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池之元件表現。實驗結果顯示使用 PEDOT:PSS (CPP)取代 PEDOT:PSS(AI 4083)，層與層之間的接觸較佳，進而減少漏電流的現象，使填充因子以及元件表現有明顯的改善，此外 PEDOT:PSS(CPP)本身的導電性較好，因此電流也有所提升，如圖五及表三所示。接著以 PEDOT:PSS(CPP)作為保護層製作鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池。經過熱退火條件之優化後，以 PEDOT:PSS(CPP) 作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池開路電壓可達 1.64 V，短路電流達 7 mA/cm²，填滿因子約 55.40 %，效率可達 6.35 %，如圖六及表四所示。此結果顯示本團隊改良了中間連接層，大幅改善鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池之表現。

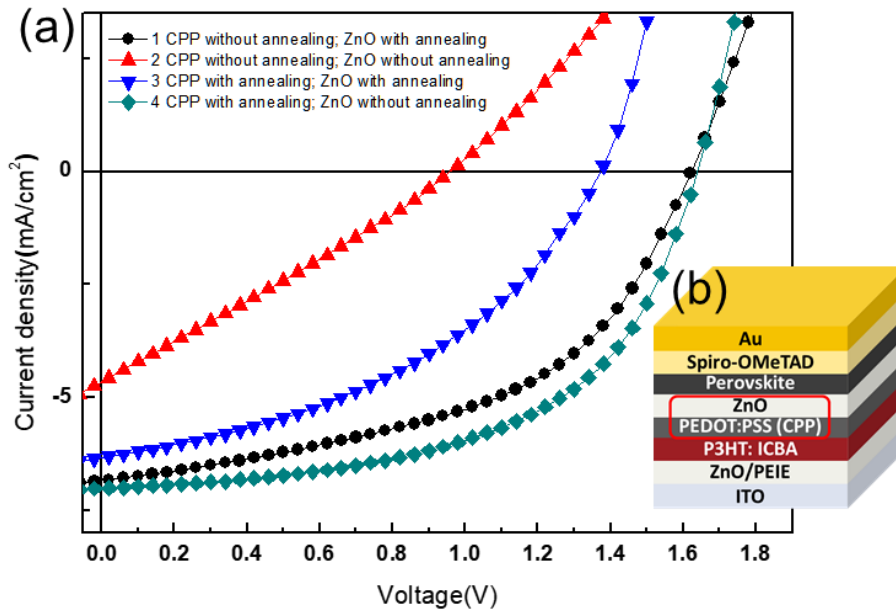
有鑑於有機-無機鈣鈦礦材料常有穩定性不良的爭論，我們有對中間層採用有無退火 PEDOT:PSS(CPP)/ZnO 的鈣鈦礦修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池做七天的穩定性測試，以檢驗將不穩定的鈣鈦礦材料引進至 P3HT:ICBA 太陽能電池系統中，系統是否依然能保持穩定的表現。圖七記錄元件的光電轉換效率表現。從結果中可以看出，即使導入鈣鈦礦作為修飾層，經過七天後其效率也沒有明顯的下降。證明了導入鈣鈦礦材料系統仍可以維持穩定表現。



圖五、(a)以 PEDOT:PSS(CPP)作為電洞傳導層在有無熱退火條件下對 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池之 I-V 曲線。(b)以 PEDOT:PSS(CPP)作為電洞傳導層之 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池元件結構示意圖。

表三、以 PEDOT:PSS(AI 4083)作為電洞傳導層在有無熱退火條件下對 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池之元件表現關係。

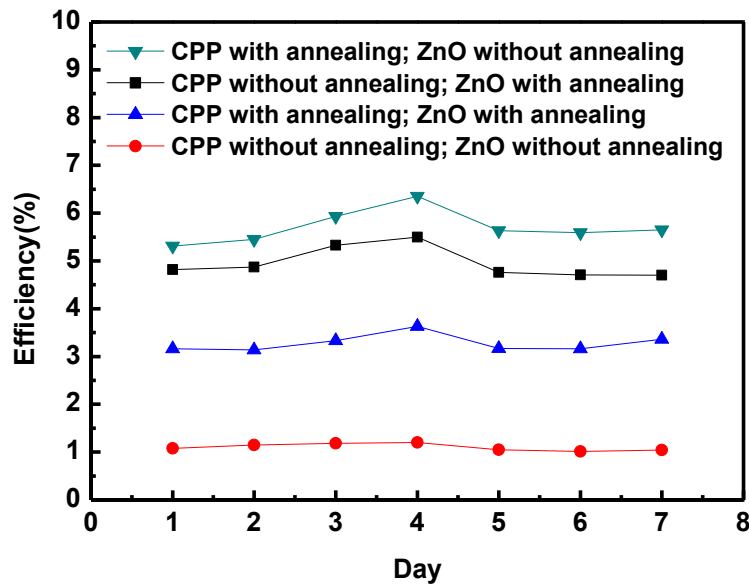
HTL	Annealing	V_{oc} (volts)	J_{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor(%)	PCE(%)
CPP	X	0.86	6.13	45.94	2.42
	V	0.86	6.61	56.80	3.23



圖六、(a)PEDOT:PSS(CPP)保護層與 ZnO 奈米粒子熱退火條件與元件表現關係之 I-V 曲線。(b) 以 PEDOT:PSS(CPP)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池的元件結構示意圖。

表四、PEDOT:PSS(AI 4083)保護層與 ZnO 奈米粒子熱退火條件與元件表現之關係。

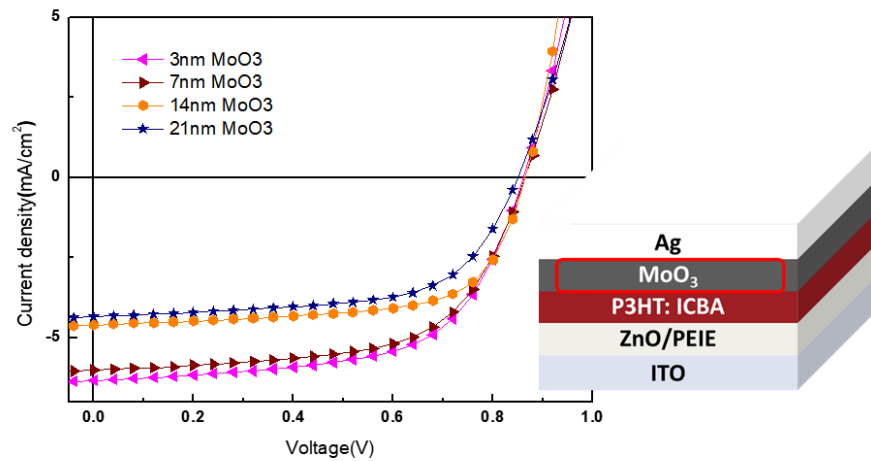
Sample	CPP annealing	ZnO annealing	V _{oc} (volts)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor(%)	PCE(%)
Tandem 1	X	V	1.62	6.83	49.61	5.50
Tandem 2	X	X	0.96	4.65	26.97	1.20
Tandem 3	V	V	1.37	6.32	41.87	3.63
Tandem 4	V	X	1.64	7.00	55.40	6.35



圖七、以 PEDOT:PSS(CPP)作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池的元件穩定性。

三、以 MoO_3 作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池

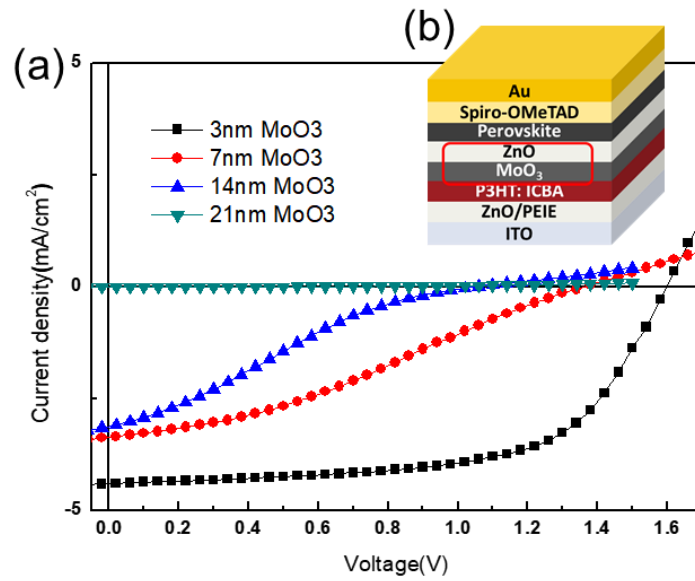
並不是所有導電高分子都能夠承受熱退火的製程，因為可能會造成相分離而使元件表現不彰。為了讓主動層的材料選擇性更加廣泛，我們將以無須熱退火的 MoO_3 取代 PEDOT:PSS (CPP)，以符合研究目標。在 MoO_3 厚度最佳化測試中，元件的 V_{oc} 在 3 nm 的 MoO_3 表現最佳，其值為 1.60 V。而隨著 MoO_3 厚度增加，其表現越差，如圖八與表五所示。可能的原因為 MoO_3 厚度太厚會影響元件整體之串聯電阻以及並聯電阻。將 MoO_3 厚度採用 3 nm 的鈣鈦礦修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池與 P3HT:ICBA 標準片做比較，我們可以看到開路電壓從 0.86 V 提升至 1.60 V，光電轉換效率則由 3.34 % 提升至 4.35 %，如圖九與表六。



圖八、(a)以 MoO_3 作為電洞傳導層在不同厚度下對 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池之 I-V 曲線。(b) 以 MoO_3 作為電洞傳導層之 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池元件結構示意圖。

表五、以 MoO_3 作為電洞傳導層在不同厚度下對 P3HT:ICBA 高分子太陽能電池之元件表現關係。

Thickness of MoO_3 (nm)	V_{oc} (volts)	J_{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor(%)	PCE(%)
3	0.86	6.34	61.16	3.34
7	0.86	6.02	61.40	3.19
14	0.86	4.61	65.87	2.62
21	0.85	4.35	62.27	2.30



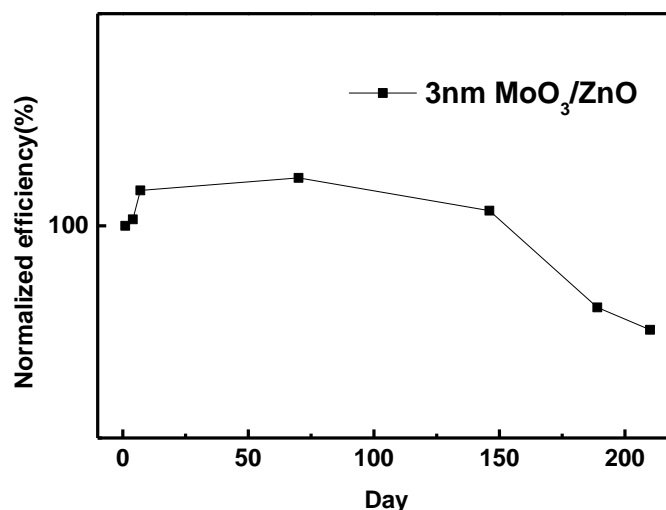
圖九、(a)不同厚度 MoO_3 保護層元件表現關係之 I-V 曲線。(b) 以 MoO_3 作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池的元件結構示意圖。

表六、不同厚度 MoO_3 保護層元件表現之關係。

Sample	Thickness of MoO_3 (nm)	V_{oc} (volts)	J_{sc} (mA/cm^2)	Fill Factor(%)	PCE(%)
Tandem 1	3	1.60	4.41	61.76	4.35
Tandem 2	7	1.36	3.37	32.11	1.47
Tandem 3	14	1.05	3.12	22.90	0.75
Tandem 4	21	0.02	0.01	40.58	0.01

有鑑於有機-無機鈣鈦礦材料常有穩定性不良的爭論，我們有對保護層採用 MoO_3 的鈣鈦礦修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池做 210 天的穩定性測試，以檢驗將不穩定的鈣鈦礦材料引進至 P3HT:ICBA 太陽能電池系統中，系統是否依然能保持穩定的表現。圖十記錄元件的光電轉換效率表現。從結果中可以看出，與第一天相比，在第 210

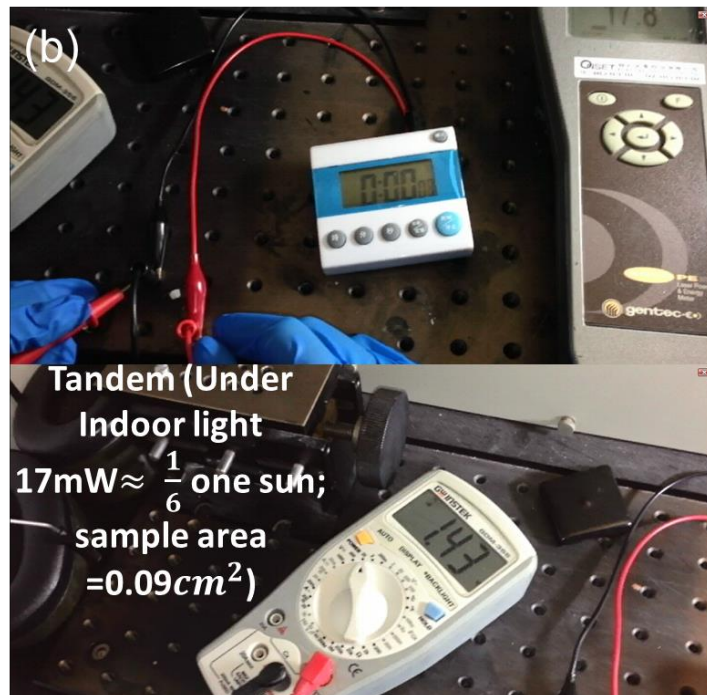
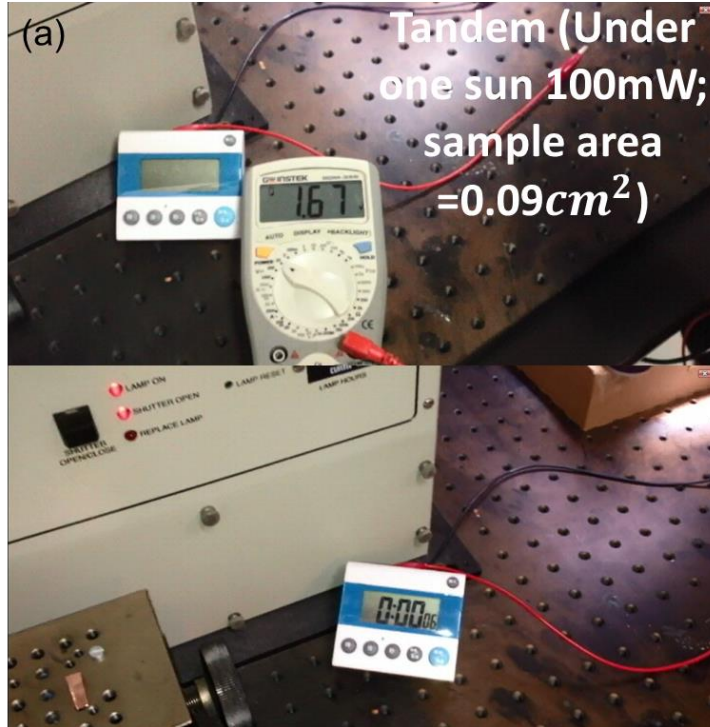
天(5040 小時)的量測下，我們可以觀察到該元件的光電轉換效率衰退了 25%，仍呈現 3.25%的水平，印證了引入鈣鈦礦材料，系統仍可以呈現穩定的表現。



圖十、以 MoO_3 作為保護層之鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池的元件穩定性。

四、應用示範

圖十一(a)為在一顆太陽光下($\sim 100 \text{ mW/cm}^2$)的元件應用示範，而圖十一(b)為在弱光下($17 \text{ mW/cm}^2 \sim 1/6 \text{ one sun}$)的元件應用示範。在一顆太陽光與弱光分別作為光源時，驅動電壓的元件操作電壓分別為 1.67 V 與 1.43V。結果顯示，不管在一顆太陽光下或是在弱光下，鈣鈦礦高驅動電壓材修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池能成功驅動市售電器，因此該修飾型太陽能電池有極高的潛力，能夠擴展其應用在其他類型的市售簡易電器中。



圖十一、(a)在一顆太陽光下($\sim 100 \text{ mW/cm}^2$)的鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池應用示範。(b)在弱光下($17 \text{ mW/cm}^2 \sim 1/6 \text{ one sun}$)的鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池應用示範。

五、 結論

鈣鈦礦高驅動電壓材修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池的保護層採用無退火 PEDOT:PSS (AI 4083)/退火 ZnO 時，有最佳的電壓 1.20 V。與無退火 PEDOT:PSS (AI 4083)的 P3HT:ICBA 太陽能電池標準片相比，其開路電壓提升效果不顯著，因此我們將高導電性的 PEDOT:PSS (CPP)取代 PEDOT:PSS (AI 4083)。鈣鈦礦高驅動電壓材修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池的保護層採用退火 PEDOT:PSS (CPP)/無退火 ZnO 時，有最佳的電壓 1.63 V。與退火 PEDOT:PSS (CPP)的 P3HT:ICBA 太陽能電池標準片的開路電壓 0.86 V 相比其電壓明顯獲得改善(約提升兩倍)。然而，該元件的保護層仍需要在退火的條件下製備才有較佳的電壓表現。

許多高效率高分子太陽能電池具有不能退火的特性，因為退火後會造成表面形貌相分離的情況更明顯，而造成元件效率表現不佳。故為了讓主動層的材料選擇更加廣泛，我們將無須退火的 MoO_3 引入，以符合本研究目標。保護層 3 nm MoO_3/ZnO 在全無退火製程下，鈣鈦礦高驅動電壓材修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池可以達到 1.60 V 與光電轉換效率 4.35 %，優於電洞傳導層採用 3 nm MoO_3 的 P3HT:ICBA 太陽能電池標準片原件電壓 0.86 V 與光電轉換效率 3.34 %。

在實際應用上，不管是在一顆太陽光或是弱光下，保護層採

用 3 nm MoO₃/ZnO 的鈣鈦礦高驅動電壓材修飾 P3HT:ICBA 太陽能電池都能夠提供足夠的電壓輸出並成功驅動市售電器。

六、建議

為了能大幅提升有機高分子太陽能電池的電壓，未來在我們的元件系統中能嘗試採用 MAPbI_{3-x}Cl_x 或是 MAPbBr₃ 來取代本研究中的 MAPbI₃ 作為高電壓修飾材。因為此兩種材料在單接面太陽能電池的電壓表現都優於採用 MAPbI₃ 時，最高由 0.99 V 分別提升至 1.13 V[6]與 1.50 V[7]。另外，在我們的系統中，元件電流受限於高分子太陽能電池，而現今已有許多高效率高分子太陽能電池，因此我們預期，若能引入其他高效率高分子太陽能電池於我們的系統中，將能夠得到更高效率及更高輸出電壓的鈣鈦礦修飾高分子太陽能電池元件。

肆、参考文献

1. J. Deng, L. Qiu, X. Lu, Z. Yang, G. Guan, Z. Zhang and H. Peng, *J. Mater. Chem. A*, **2015**, 3, 21070.
2. F. Machui, M. Hosel, N. Li, G. D. Spyropoulos, T. Ameri, R. R. Søndergaard, M. Jørgensen, A. Scheel, D. Gaiser, K. Kreul, D. Lenssen, M. Legros, N. Lemaitre, M. Vilkmann, M. Valimaki, S. Nordman, C. J. Brabec and F. C. Krebs, *Energy Environ. Sci.*, **2014**, 7, 2792.
3. W. S. Yang, J. H. Noh, N. J. Jeon, Y. C. Kim, S. Ryu, J. Seo, and S. I. Seok, *Science*, **2015**, 348, 1234.
4. J. Huang, Y. Shao, and Q. Dong, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2015**, 6, 3218
5. S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. P. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, H. J. Snaith, *Science*, **2013**, 342, 341.
6. H. Zhou, Q. Chen, G. Li, S. Luo, T.-B. Song, H.-S Duan, Z. Hong, J. You, Y. Liu, Y. Yang, *Science*, **2014**, 345, 542.
7. E. Edri, S. Kirmayer, M. Kulbak, G. Hodes, D. Cahen, *J Phys. Chem. Lett.*, **2014**, 5, 429