

# 溶劑添加劑對室內光下有機光伏之影響

## Effect of solvent additive on the indoor performance of organic photovoltaics

李嘉峰

鍾嗣永

查厚錦

黃裕清\*

明志科大材料工程系

明志科大材料工程系

明志科技大學工程學院

明志科大材料工程系

明志科大電漿薄膜中心

明志科大電漿薄膜中心

明志科大電漿與薄膜中心

### 摘要

隨著柔性穿戴電子與物聯網(Internet of things, IoT)技術的更迭, 室內環境下的能源自給需求日益顯著。有機光伏(Organic photovoltaics, OPVs)因其在弱光下表現出優於傳統無機太陽電池的轉換效率, 成為室內光光應用的能源的首選。本研究採用低能隙高分子 Poly [[4,8-bis[(2-ethylhexyl)oxy]benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene-2,6-diyl][3-fluoro-2-[(2-ethylhexyl)carbonyl]thieno[3,4-b]thiophenediyl ]] (PTB7)與富勒烯衍生物(6,6)-Phenyl C71 butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM)製備反式結構之有機光伏, 並探討加工添加劑二碘辛烷(1,8-diiodooctane, DIO)對主動層形貌及電荷動力學之影響。結果顯示, 在主動層中引入3 vol%的DIO, 能顯著優化激子解離與載子傳輸效率。在標準模擬太陽光(AM 1.5G)下, 元件光電轉換效率(Power conversion efficiency, PCE)可達8%以上; 而在室內光源照射下, 其光電轉換效率進一步提升至14%以上。此外, 本研究結合主動層微觀分析, 闡明了添加劑含量對不同光強度下元件工作機制的調節作用, 進而確立了適用於室內光環境的高效塊狀異質結構(Bulk heterojunction, BHJ)形貌優化策略。

關鍵詞: 有機光伏、室內光、塊狀異質結構、添加劑、載子行為

### Abstract

Recently, with the rapid development of self-sustaining electronics technologies, the demand for self-sustaining energy solutions in indoor environments has increased significantly. Organic photovoltaics (OPVs) have emerged as promising energy sources for indoor light harvesting, owing to their superior power conversion efficiency under low-light conditions. In this study, we systematically investigate the influence of the additive 1,8-diiodooctane (DIO) on the active-layer morphology and charge transport properties. The results demonstrate that incorporating 3 vol% DIO into the active layer significantly enhances exciton dissociation and charge carrier transport. As a result, the optimized device achieves a power conversion efficiency (PCE) exceeding 8% under 1-sun illumination, which further increases to over 14% under indoor light conditions. Furthermore, this work elucidates the role of additive concentration in modulating device operation across varying light intensities and establishes bulk heterojunction (BHJ) systems tailored to indoor light environments.

Keywords: organic photovoltaic, indoor, bulk heterojunction, additives, charge behavior

### 1. 介紹

有機光伏(Organic photovoltaics, OPVs)憑藉其輕量化、機械柔韌性、半透明性以及低製造

成本等優勢, 在可穿戴電子設備、建築整合光伏(Building-integrated photovoltaics, BIPVs)及離網供電領域展現出巨大的應用潛力。[1-3] 隨著有機材料的突破性發展, OPVs 的能量轉換效率(Power

conversion efficiency, PCE)已成功超越18%。[4-6] 近年來，隨著物聯網(Internet of things, IoT)技術的興起，無線感測器與路由器節點等低功耗電子元件可藉由室內弱光產生的微小能量驅動，為 OPVs 創造了獨特的利基市場。研究指出，由於 OPVs 具有高度可調的光吸收特性與較低的漏電流，其在室內環境的 PCE 已可達到30%以上。[7, 8]室內人工光源(如 LED、螢光燈)與戶外陽光的主要差異在於：室內光譜集中於可見光區，且光強度極低。因此，高效率室內 OPVs 的關鍵在於如何精準調控吸收光譜以匹配室內人工光源，並有效提升開路電壓(Open-circuit voltage,  $V_{OC}$ )與分路電阻(Shunt resistance,  $R_{SH}$ )。[9, 10]

在室內弱光下，由於電荷載子濃度較低，陷阱輔助複合(Trap-assisted recombination)與漏電流對效率的負面影響比在強光下更為顯著。在我們先前研究已經比較了富勒烯與非富勒烯兩種不同受體材料的主動層對元件性能的影響。在室內光照條件下，非富勒烯型有機光伏(PBDB-T:ITIC)的最佳主動層厚度為140 nm，其 PCE 可達19.74%；相比之下，富勒烯型元件(PBDB-T:PC<sub>71</sub>BM)的最佳厚度為100 nm，PCE 為 16.22%。我們進一步系統性地比較了不同主動層材料在 1-Sun 與室內光照下的電性特徵與載子傳輸行為。結果顯示，非富勒烯體系在室內光下對厚度較不敏感，主要因其在較厚薄膜中仍維持良好的電阻特性並抑制載子復合。[11]除此之外，BongSoo Kim 等人，開發了含噻啉類單元的三元高分子材料 (PB2FQxn)。其中，PB2FQx15 的高分子衍生物憑藉其較深能階與良好的混合相形貌，與 L8-BO 結合後在 1000 lx 室內光源下達到逾 30% 的轉換效率。此結果強調了三元高分子結構在優化室內光伏性能中的關鍵作用。[12]

此外，添加劑作為形貌調控劑，添加劑可延緩溶劑揮發，促進分子有序排列。同時，能有效抑制高分子的過度聚集，將相分離尺度控制於激子擴散長度，從而優化激子解離與電荷傳輸通道，最終提升元件性能。[13] 常用的添加劑通常為液態類型，例如1,8-二碘辛烷 (1,8-diiodooctane, DIO)和1-氯萘 (1-Chloronaphthalene, CN)，由於其對小分子具有選擇性溶解度，能夠有效調控相分離行為。[14, 15] 然而，這些液態添加劑具有低揮發性與高沸點的特性，導致其在熱

退火過程後仍可能部分殘留在主動層中。[16] 殘留的添加劑加速主動層及添加劑本身的降解以及改變表面形貌，進而對元件性能產生不利影響。然而，研究指出適當的熱處理不僅能移除大部分 DIO，還能誘導施/受體分子進一步有序排列，從而抵消殘留添加劑對長期穩定性的影響。[17] 另外，DIO 誘導形成的互穿網絡結構，在初始階段能有效抑制受體材料的過度熱聚集，這對維持元件的形貌穩定性具有極大作用。[18]

儘管如此，多數文獻仍聚焦於優化1-Sun 下的 PCE，對於室內光下光電轉換機制的深入探討相對匱乏，特別是主動層的表面形貌在室內光下的載子行為差異仍未完全明晰。因此，本研究利用反式有機光伏，探討不同 DIO 添加量有機光伏對標準太陽光下與室內光 TL84 螢光燈下之效率差異，進一步針對 PTB7:PC<sub>71</sub>BM 主動層表面形貌與激子解離對於室內光下之影響，了解有機光伏在室內光下的發電機制。

## 2. 實驗方法

### 2-1 樣品材料與溶液製備

主動層材料 PTB7 由 1-Materials 提供，PC<sub>71</sub>BM 由 Solenne b.v. 提供。電子傳輸層材料醋酸鋅、乙醇胺、乙二醇甲醚由 Sigma Aldrich 提供；氫氧化鋰由 Alfa Aesar 提供。將 4.4 g 的二水醋酸鋅加入酒精中，攪拌數分鐘後置於超音震盪機 30 分鐘後，添加 1.11 g 的氫氧化鋰，於 60 度的水浴中攪拌 30 分鐘後進行冷卻，最後分別裝入離心管中，以每分鐘 3000 轉速度，旋轉離心 3 分鐘後，將上層酒精去除，所剩下的殘留物即是氧化鋅奈米粒子 (ZnO NPs)。最後，再以異丙醇為溶劑分散所得之氧化鋅奈米粒子，並添加分散劑乙醇胺 (Ethanolamine, MEA)，震盪 90 分鐘後靜置隔夜後再進行過濾，即完成氧化鋅奈米粒子電子傳輸層溶液。本研究中使用低能隙高分子 PTB7 為施體材料，以及富勒烯衍生物 PC<sub>71</sub>BM 為受體材料，其材料化學結構如圖 1(a)，將材料以比例為 1:1.5 溶於氯苯中，總濃度為 25 mg/ml，再根據實驗設計添加不同添加劑 (DIO) 之添加量，於 70°C 下攪拌 12 小時後即可完成 PTB7:PC<sub>71</sub>BM 主動層溶液。

### 2-2 元件製作

該研究所使用結構為反式有機光伏，其元件

結構為 ITO/ZnO/PTB7:PC<sub>71</sub>BM/MoO<sub>3</sub>/Ag，如圖1(b)所示。首先將ITO玻璃依序經清洗液、去離子水、丙酮、異丙醇各震盪15分鐘。接著，利用旋塗法以3000 rpm 之轉速將電子傳輸層氧化鋅溶液塗佈於基板表面，並退火100°C/10分鐘。隨後，將主動層 PTB7:PC<sub>71</sub>BM 以2000 rpm 旋塗於電子傳輸層之上，並放置於真空環境下進行抽乾處理以排除殘留溶劑。緊接著在5 x 10<sup>-6</sup> torr 下進行蒸鍍電洞傳輸層(MoO<sub>3</sub>)，以0.1 Å/s，鍍5 nm，最後蒸鍍上電極銀，以1.5 Å/s，鍍100 nm，即完成反式結構有機光伏。

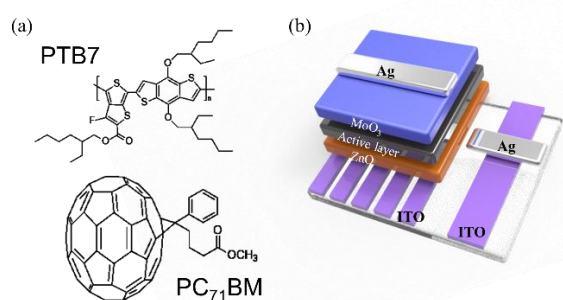


圖1、(a)實驗中有機材料化學結構圖；(b)有機光伏之元件結構圖。

### 2-3 元件量測及主動層混摻膜分析

製作完成反式有機光伏，即可以利用 AM 1.5G 模擬器 (Enlitech, SSX100R AAA) 測量元件在1-Sun 下的電流密度-電壓(J-V)特性，並透過工研院 (Industrial Technology Research Institute, ITRI) 建置的室內光環境下的量測系統量測元件在室內光下之性能表現；室內光源量測以 TL84作為光源，其光譜分布符合相關標準規範，並透過 SRI-2000光譜儀(尚澤光電)進行光強度校準。同時，元件有效面積控制為0.04 cm<sup>2</sup>。在薄膜性質表徵方面，薄膜表面形貌由原子力顯微鏡 (Atomic force microscopy, AFM, Bruker, Innova) 進行影像擷取。

### 3. 結果與討論

本研究首先以 PTB7:PC<sub>71</sub>BM 作為主動層體系中，其主動層厚度控制在100 nm 在光吸收與電荷傳輸之間取得平衡下，系統性調整 1,8-二碘辛烷 (DIO) 添加比例為0, 3, 5, 10, 15 vol%，並分別於

標準 AM 1.5G 太陽光與室內光源(TL84, 200 lx) 下量測元件性之效率曲線，如圖2(a)及圖2(b)所示，各元件特性列於表1中。結果顯示，當 DIO 添加量為3 vol% 時，元件在太陽光下展現最佳光電轉換效率8.16%，其開路電壓 (V<sub>oc</sub>) 為0.73 V、短路電流密度 (J<sub>sc</sub>) 為16.19 mA/cm<sup>2</sup>、填充因子(FF) 為69.26%。相較之下，未添加 DIO 的元件效率僅為4.89%，主要歸因於較低的 J<sub>sc</sub> 與 FF，顯示添加劑在調控元件光電性能上扮演關鍵角色。在室內光條件下，元件亦呈現相似的最佳化行為：於3 vol% DIO 時達到最高室內光效率 14.00%，對應 V<sub>oc</sub> 為0.53 V、J<sub>sc</sub> 為19.19 μA/cm<sup>2</sup>、FF 為76.61%。整體而言，室內光下的效率變化趨勢與太陽光下高度一致。

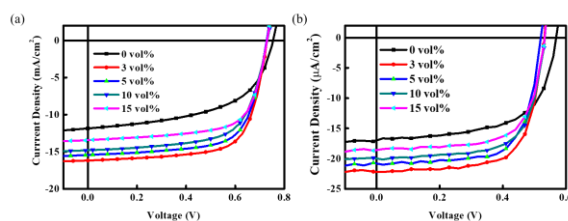


圖2 不同1,8-二碘辛烷 (DIO) 添加量之有機光伏元件於 (a) 太陽光及 (b) 室內光 (TL84 200 lx) 下之 J-V 曲線。

表1、不同 DIO 添加量之有機光伏元件於太陽光及室內光下之元件特性。

光源	AM1.5G (100 mW/cm <sup>2</sup> )				
	Amount (%)	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	PCE (%)
0	0	0.74	11.86	54.71	4.89
		(0.74 ± 0.02)	(11.48 ± 0.24)	(54.49 ± 1.56)	(4.60 ± 0.22)
3	3	0.73	16.19	69.26	8.16
		(0.73 ± 0.00)	(15.90 ± 0.39)	(68.71 ± 2.17)	(7.95 ± 0.22)
5	5	0.73	15.42	68.34	7.67
		(0.73 ± 0.00)	(15.22 ± 0.12)	(67.45 ± 1.55)	(7.46 ± 0.19)
10	10	0.73	14.79	65.87	7.11
		(0.73 ± 0.00)	(14.64 ± 0.13)	(64.71 ± 0.61)	(6.93 ± 0.09)
15	15	0.73	13.43	68.03	6.66
		(0.73 ± 0.00)	(13.28 ± 0.11)	(67.73 ± 0.36)	(6.55 ± 0.07)
光源	TL84 (0.058 mW/cm <sup>2</sup> )				
	Amount (%)	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (μA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	PCE (%)
0	0	0.57	16.60	62.80	10.22
		(0.56 ± 0.02)	(17.07 ± 0.66)	(56.51 ± 8.89)	(9.26 ± 1.36)
3	3	0.53	19.19	76.61	14.00
		(0.53 ± 0.00)	(19.69 ± 0.44)	(75.92 ± 3.46)	(13.66 ± 0.36)
5	5	0.52	19.28	74.38	12.86
		(0.52 ± 0.00)	(18.76 ± 0.74)	(73.50 ± 1.25)	(12.35 ± 0.72)
10	10	0.53	20.32	67.14	12.53
		(0.53 ± 0.00)	(20.13 ± 0.22)	(67.65 ± 0.66)	(12.50 ± 0.03)
15	15	0.53	18.63	67.56	11.56
		(0.53 ± 0.00)	(18.09 ± 0.65)	(67.47 ± 1.38)	(11.23 ± 0.58)

為進一步釐清主動層表面形貌與並聯電阻對元件效率的影響，本研究採用原子力顯微鏡

(Atomic force microscope, AFM)分析不同 DIO 添加比例下主動層薄膜之表面特性，結果如圖3所示。當 DIO 添加量由 0 增加至 15 vol%時，主動層的均方根粗糙度(Root-mean-square roughness, RMS)分別為3.37、1.37、1.74、4.02與10.74 nm。未添加 DIO 的薄膜表面呈現明顯的相分離結構(圖3(a))，導致表面粗糙度較高。當引入3 vol% DIO 時，施體與受體材料的形態分佈得到有效調控，使表面變得更加平整且均勻，粗糙度顯著降低。然而，當 DIO 添加量進一步增加時，薄膜中開始出現新的團聚結構，導致表面粗糙度再次上升，顯示過量添加劑反而不利於薄膜形貌的最佳化。因此，較低的表面粗糙度對元件性能具有多方面的正面影響：(1)可改善主動層與相鄰功能層之間的界面接觸，提升有效接觸面積，有利於載子傳輸並降低電荷復合損失；(2)有助於抑制暗電流，同時降低串聯電阻並提升並聯電阻，進而改善整體電學特性與光電轉換效率。

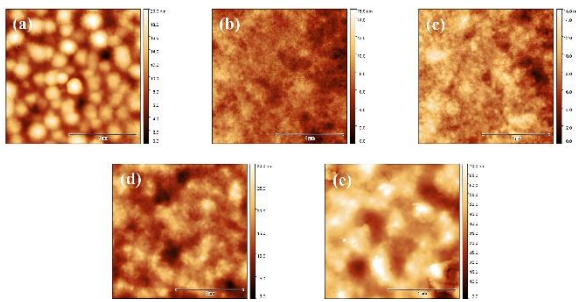


圖3、PTB7:PC<sub>71</sub>BM 不同 DIO 添加量之主動層表面形貌。(a) 0 vol%、(b) 3 vol%、(c) 5 vol%、(d) 10 vol%與 (e) 15 vol%。

根據既有研究報導，有機光伏元件在室內光條件下的效率對並聯電阻高度敏感。因此，我們進一步探討主動層表面形貌變化如何影響薄膜內部電阻特性，並進而影響元件在太陽光與室內光下的整體表現。我們彙整不同 DIO 添加比例下主動層的表面粗糙度，以及對應元件的串聯電阻與並聯電阻，並將其與太陽光及室內光效率之關聯整理成圖4，其詳細的數值列於表2。結果顯示，在標準太陽光與室內光條件下，元件效率對表面粗糙度、串聯電阻與並聯電阻的趨勢基本一致。當主動層薄膜具有較低的表面粗糙度時，元件同時呈現較低的串聯電阻與較高的並聯電阻，此時

無論在太陽光或室內光下皆可達到最佳效率。相反地，隨著表面粗糙度增加，並聯電阻逐漸下降，導致載子復合與漏電流增加，進而使太陽光與室內光效率同步劣化。值得注意的是，先前文獻指出在有機光伏元件中，當並聯電阻高於85 kΩ·cm<sup>2</sup>時，即可獲得良好的室內光效率。[19] 然而，研究結果顯示，當 DIO 添加量提高至15 vol%時，元件的並聯電阻達到546.1 kΩ·cm<sup>2</sup>，雖然遠高於文獻建議值，但其室內光效率仍較低於3 vol%的元件(R<sub>sh</sub>=714.2 kΩ·cm<sup>2</sup>)降低約18%。此結果顯示，單純提升並聯電阻並不足以保證高室內光效率，主動層表面形貌仍扮演關鍵角色。我們的結果證實主動層表面形貌會顯著影響元件的並聯電阻，而即使並聯電阻高於85 kΩ·cm<sup>2</sup>，其數值變化與薄膜形貌仍會對有機光伏的室內光效率產生顯著影響。

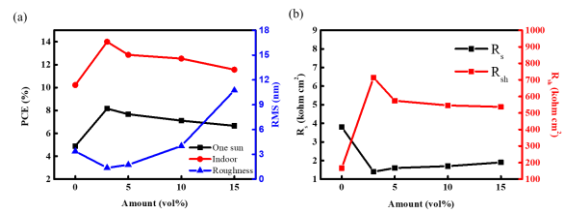


圖4、(a) 不同 DIO 添加量之主動層之粗糙度對太陽光及室內光下效率之變化圖，(b)不同 DIO 添加量之室內光下元件串聯電阻與並聯電阻之變化圖。

表2、不同 DIO 添加量之有機光伏元件於太陽光及室內光下之元件的串聯電阻(R<sub>s</sub>)和並聯電阻 (R<sub>sh</sub>)。

光源	AM1.5G (100 mW/cm <sup>2</sup> )		TL84 (0.058 mW/cm <sup>2</sup> )	
	Amount (%)	R <sub>s</sub> (Ω cm <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω cm <sup>2</sup> )	R <sub>sh</sub> (kΩ cm <sup>2</sup> )
	0	9.9	0.36	166.7
	3	5.9	0.73	714.2
	5	7.2	0.71	574.1
	10	8.2	0.66	546.1
	15	8.2	0.49	537.1

為更深入釐清主動層表面粗糙度及並聯電阻對元件性能的影響，本研究進一步透過光電流與激子解離概率對有效偏壓的關係，分析不同 DIO 添加比例對光電轉換行為的影響。[20]分別在標準太陽光與室內光條件下量測光電流-有效電壓曲線，如圖5(a)與圖5(c)所示。量測電壓範圍設定為-3 至 +1 V，以呈現光電流對有效電壓的依賴特

性。可透過該公式  $J_{sat}=qG_{max}L$  計算出最大激子生成速率( $G_{max}$ )，在這  $q$  為電子伏特、 $L$  為主動層厚度。本研究將在有效偏壓下+2V 時所產生光電流設定為飽和電流，並透過公式估算不同 DIO 添加比例(0、3、5、10、15 vol%)下，在太陽光下最大激子生成速率分別為 $7.75 \times 10^{27}$ 、 $9.38 \times 10^{27}$ 、 $9.20 \times 10^{27}$ 、 $8.85 \times 10^{27}$ 、 $8.25 \times 10^{27}$ ，而在室內光下最大激子生成速率分別為 $1.17 \times 10^{25}$ 、 $1.41 \times 10^{25}$ 、 $1.27 \times 10^{25}$ 、 $1.21 \times 10^{25}$ 、 $1.15 \times 10^{25}$ 。由於光強度差異，室內光下的激子生成速率較太陽光低約兩個數量級，但不同 DIO 添加量之間的變化趨勢與太陽光條件基本一致。但在不同添加劑之間與太陽光趨勢並無太大差異。隨後，我們進一步分析激子解離概率[P(E,T) 其與電場 (E)及溫度 (T)有關聯，對有機光伏而言，光吸收後產生的激子僅有部分能成功解離為自由載子。根據關係式  $J_{ph}=qG_{max}P(E,T)L$ ，可將歸一化光電流 ( $J_{ph}/J_{sat}$ )對  $V_{eff}$  作圖，以獲得不同偏壓下的 P(E,T)。圖5(b)及圖5(d)分別呈現不同 DIO 添加量在太陽光與室內光條件下的激子解離概率對有效電壓之關係，其中所有系統皆以 ( $V_a=V_0$ )作為參考電壓。進一步將太陽光與室內光下的最大激子生成速率、激子解離概率及元件效率進行歸一化比較(表3與表4)。結果顯示，在兩種光源條件下，激子解離概率對元件效率的影響相對有限，而最大激子生成速率對效率的影響更為顯著。綜合上述結果，我們認為主動層表面形貌的改變不僅會調控元件的並聯電阻，亦會影響最大激子生成速率；同時，適當的添加量可以形成最佳的相分離微觀結構與激子解離及電荷收集之間存在顯著的相互效應，進而共同決定元件的光電性能。

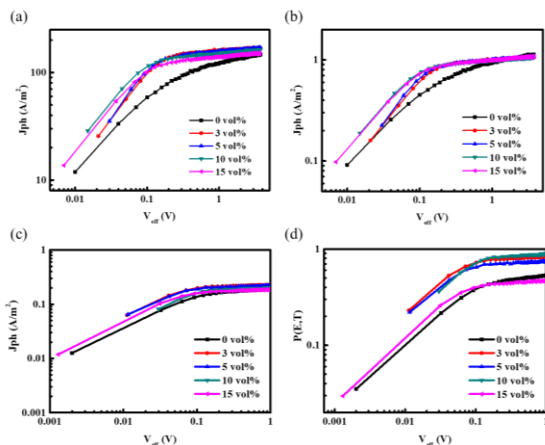


圖5、不同 DIO 添加量0、3、5、10與15 vol%於太陽光下之(a)光電流密度與(b)激子解離概率[P(E,T)]對有效偏壓的曲線圖；室內光下之(c)光電流密度與(d)激子解離概率[P(E,T)]對有效偏壓的曲線圖。

表3、不同 DIO 添加量0、3、5、10與15 vol%於太陽光下計算出最大激子生成速率、激子解離概率、效率對應主動層之表面形貌之變化。

Amount (%)	AM 1.5G				Normalized		
	$R_{ms}$ (nm)	$G_{max}$ ( $m^{-2}s^{-1}$ )	P(E,T) (%)	PCE (%)	$G_{max}$ ( $m^{-2}s^{-1}$ )	P(E,T) (%)	PCE (%)
0	3.37	$7.75 \times 10^{27}$	86.11	4.89	0.82	0.89	0.59
3	1.37	$9.38 \times 10^{27}$	95.71	8.16	1	1	1
5	1.74	$9.20 \times 10^{27}$	94.57	7.67	0.98	0.98	0.93
10	4.02	$8.85 \times 10^{27}$	94.76	7.11	0.94	0.99	0.87
15	10.74	$8.25 \times 10^{27}$	93.93	6.66	0.87	0.98	0.82

表4、不同 DIO 添加量0、3、5、10與15 vol%於室內光下計算出最大激子生成速率、激子解離概率、效率對應主動層之表面形貌之變化。

Amount (%)	TL84 200 lx				Normalized		
	$R_{ms}$ (nm)	$G_{max}$ ( $m^{-2}s^{-1}$ )	P(E,T) (%)	PCE (%)	$G_{max}$ ( $m^{-2}s^{-1}$ )	P(E,T) (%)	PCE (%)
0	3.37	$1.17 \times 10^{25}$	80.49	10.22	0.82	0.83	0.73
3	1.37	$1.41 \times 10^{25}$	89.98	14.00	1	0.93	1
5	1.74	$1.27 \times 10^{25}$	96.55	12.86	0.90	1	0.92
10	4.02	$1.21 \times 10^{25}$	92.09	12.53	0.85	0.95	0.89
15	10.74	$1.15 \times 10^{25}$	91.08	11.56	0.81	0.94	0.83

## 結論

本研究系統性探討溶劑添加劑對 PTB7:PC<sub>71</sub>BM 有機光伏元件在太陽光與室內光條件下之光電性能影響。結果顯示，適當添加3 vol% DIO 可優化主動層表面形貌，降低表面粗糙度，改善界面接觸特性，並有效降低串聯電阻與提升並聯電阻，進而同步提升元件在太陽光與室內光下的光電轉換效率。相反地，過量的 DIO ( $\geq 10$  vol%) 則導致薄膜形貌劣化、粗糙度增加及並聯電阻下降，使元件效率明顯衰退。我們進一步透過光電流與激子解離分析發現，不同 DIO 添加量對激子解離概率影響有限，而最大激子生成速率對元件效率具有更關鍵的貢獻，顯示主動層微結構不僅影響電阻特性，也會改變光生載子產生與收集行為。此外，本研究亦證實，儘管高並聯電阻通常有利於室內光性能，但單純提高並聯電阻並不能保證高效率，主動層表面形貌仍扮演決定性角色。因此，本研究建立了主動層形貌對於元件性能與電荷行為之間的關聯，為高效室內光與太陽光有機光伏元件之材料與製程優化提供重要見解。

## 參考文獻

- [B. Lee, L. Lahann, Y. Li, S.R. Forrest, Cost estimates of production scale semitransparent organic photovoltaic modules for building integrated photovoltaics, *Sustainable Energy & Fuels* 4(11) (2020) 5765-5772.
- Y. Sun, L. Meng, X. Wan, Z. Guo, X. Ke, Z. Sun, K. Zhao, H. Zhang, C. Li, Y. Chen, Flexible High-Performance and Solution-Processed Organic Photovoltaics with Robust Mechanical Stability, *Advanced Functional Materials* 31(16) (2021) 2010000.
- Y.-M. Sung, M.-Z. Li, D. Luo, Y.-D. Li, S. Biring, Y.-C. Huang, C.-K. Wang, S.-W. Liu, K.-T. Wong, A micro-cavity forming electrode with high thermal stability for semi-transparent colorful organic photovoltaics exceeding 13% power conversion efficiency, *Nano Energy* 80 (2021) 105565.
- Q. Liu, Y. Jiang, K. Jin, J. Qin, J. Xu, W. Li, J. Xiong, J. Liu, Z. Xiao, K. Sun, S. Yang, X. Zhang, L. Ding, 18% Efficiency organic solar cells, *Science Bulletin* 65(4) (2020) 272-275.
- J. Wang, Y. Cui, Y. Xu, K. Xian, P. Bi, Z. Chen, K. Zhou, L. Ma, T. Zhang, Y. Yang, A new polymer donor enables binary all-polymer organic photovoltaic cells with 18% efficiency and excellent mechanical robustness, *Advanced Materials* 34(35) (2022) 2205009.
- L. Zhu, M. Zhang, J. Xu, C. Li, J. Yan, G. Zhou, W. Zhong, T. Hao, J. Song, X. Xue, Z. Zhou, R. Zeng, H. Zhu, C.-C. Chen, R.C.I. MacKenzie, Y. Zou, J. Nelson, Y. Zhang, Y. Sun, F. Liu, Single-junction organic solar cells with over 19% efficiency enabled by a refined double-fibril network morphology, *Nature Materials* 21(6) (2022) 656-663.
- C. Lee, J.H. Lee, H.H. Lee, M. Nam, D.H. Ko, Over 30% Efficient Indoor Organic Photovoltaics Enabled by Morphological Modification Using Two Compatible Non-Fullerene Acceptors, *Advanced Energy Materials* 12(22) (2022) 2200275.
- P. Bi, C. An, T. Zhang, Z. Chen, Y. Xu, Y. Cui, J. Wang, J. Li, Y. Wang, J. Ren, X. Hao, S. Zhang, J. Hou, Achieving 31% efficiency in organic photovoltaic cells under indoor light using a low energetic disorder polymer donor, *Journal of Materials Chemistry A* 11(2) (2023) 983-991.
- H.K.H. Lee, Z. Li, J.R. Durrant, W.C. Tsoi, Is organic photovoltaics promising for indoor applications?, *Applied Physics Letters* 108(25) (2016) 5.
- S.S. Yang, Z.C. Hsieh, M.L. Keshtov, G.D. Sharma, F.C. Chen, Toward high-performance polymer photovoltaic devices for low-power indoor applications, *Solar RRL* 1(12) (2017) 1700174.
- Y.-C. Huang, C.-F. Li, Insights into the photovoltaic mechanism of organic photovoltaics under solar and artificial light, *Journal of Materials Chemistry C* 11(41) (2023) 14079-14087.
- H. Choi, G.M. Lee, J. Kang, M.A. Saeed, G. Ham, H. Ahn, J.H. Hwang, D. Lee, S. Cho, E. Lee, H. Cha, J.W. Shim, B. Kim, Impact of Quinoxaline Units in Random Terpolymers on Enhancing Indoor Organic Photovoltaics: Lowering HOMO Level and Improving Miscibility, *Small* 21(47) (2025) e04603.
- Z. Li, X. Kong, Y. Liu, H. Qiu, L. Zhan, S. Yin, Progress of additives for morphology control in organic photovoltaics, *Chinese Chemical Letters* 35(6) (2024) 109378.
- J. Liu, Y. Zhang, X. Liu, L. Wen, L. Wan, C. Song, J. Xin, Q. Liang, Solution Sequential Deposition Pseudo-Planar Heterojunction: An Efficient Strategy for State-of-Art Organic Solar Cells, *Small Methods* 8(12) (2024) 2301803.
- J. Zhang, Z. Li, X. Jiang, L. Xie, G. Pan, A. Buyan-Arivjikh, T. Baier, S. Tu, L. Li, M. Schwartzkopf, S.K. Vayalil, S.V. Roth, Z. Ge, P. Müller-Buschbaum, Revealing the Effect of Solvent Additive Selectivity on Morphology and Formation Kinetics in Printed Non-fullerene Organic Solar Cells at Ambient Conditions,

- Advanced Energy Materials 15(17) (2025) 2404724.
16. I.E. Jacobs, F. Wang, Z.I. Bedolla Valdez, A.N. Ayala Oviedo, D.J. Bilsky, A.J. Moulé, Photoinduced degradation from trace 1,8-diiodooctane in organic photovoltaics, *Journal of Materials Chemistry C* 6(2) (2018) 219-225.
  17. R.C. Kilbride, E.L.K. Spooner, E.J. Cassella, M.E. O’Kane, K. Doudin, D.G. Lidzey, R. Jones, A.J. Parnell, Exploring the Impact of 1,8-Diiodooctane on the Photostability of Organic Photovoltaics, *ACS Applied Energy Materials* 7(19) (2024) 8401-8411.
  18. S. Xiong, Y. Zhu, Y. Wang, M. Li, H. Li, X. Lai, F. He, Controlling Morphology and Improving Stability with High-Boiling-Point Additive for Efficient Organic Solar Cells, *ACS Applied Materials & Interfaces* 17(12) (2025) 18473-18481.
  19. J.S. Goo, S.-C. Shin, Y.-J. You, J.W. Shim, Polymer surface modification to optimize inverted organic photovoltaic devices under indoor light conditions, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 184 (2018) 31-37.
  20. J.-L. Wu, F.-C. Chen, Y.-S. Hsiao, F.-C. Chien, P. Chen, C.-H. Kuo, M.H. Huang, C.-S. Hsu, Surface Plasmonic Effects of Metallic Nanoparticles on the Performance of Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells, *ACS Nano* 5(2) (2011) 959-967.