

圖 4-16：PT6TPD/PCBM 與 PT6TPD/PC₇₁BM 混摻比例為 1:1 之 EQE 曲線圖

4-3-2 PT8TPD 之元件

由於 PT8TPD 與 PT6TPD 的差異僅在於 Thipohene 上碳鏈的碳數由 6 個改為 8 個，且兩者在分子量、熱性質、吸收光譜、能隙等性質皆十分相近，因此本章節的元件製作同樣採用 DCB 作為溶劑來製備旋塗主動層所用之溶液，在熱處理方面也採用 90°C 下預退火 20 分鐘。首先我們以 PT8TPD：PCBM 由 1:1 到 1:4 的比例製作元件，以得知最適合的混摻比例，量測得 $J-V$ 曲線圖與結果整理於圖 4-17 及表 4-10 中。

由結果可以得知，當 PCBM 的含量由 50% 升為 80% 時， J_{sc} 有由 4.85 mA/cm² 降至 0.46 mA/cm² 之明顯變化，與 PT6TPD 的趨勢雷同，推測也是由

於主動層表面型態的改變而造成。圖4-18為PT8TPD:PCBM 在不同主動層混摻比例下之AFM圖，由圖中可以看出，當PCBM含量50%時表面最為平滑，可能同樣是因為PT8TPD與PCBM的互溶性不佳，因此隨著PCBM含量上升，PCBM團聚形成PCBM cluster，進而阻礙了自由電荷載子的傳輸，使電流密度大幅下降。至於 V_{oc} 及FF的變化，大致隨PCBM的含量改變略有趨勢呈現，但變動幅度不大，因此影響光電轉換效率的程度不顯著。綜合以上各項指標，PCBM含量50%、66%、75%、80%時，能量轉換效率依序為1.65%、0.49%、0.30%、0.17%，故最佳混摻比例也為1:1。

表 4-10：不同 PT8TPD：PCBM 混摻比例之元件特性

PT8TPD:PCBM	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	PCE (%)	Thickness (nm)
1:1	0.86	4.85	0.40	1.65	108
1:2	0.83	1.43	0.42	0.49	111
1:3	0.83	0.64	0.57	0.30	109
1:4	0.8	0.46	0.45	0.17	105

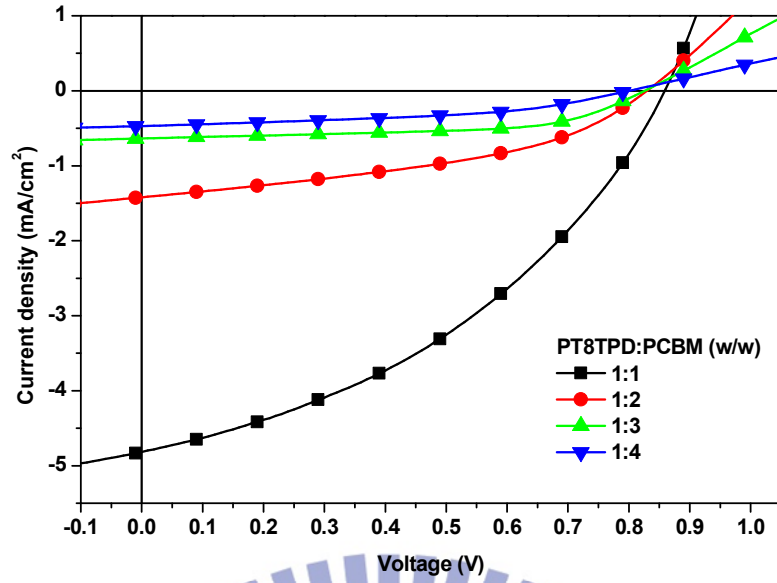


圖 4-17：不同 PT8TPD：PCBM 混摻比例之 $J-V$ 特性圖

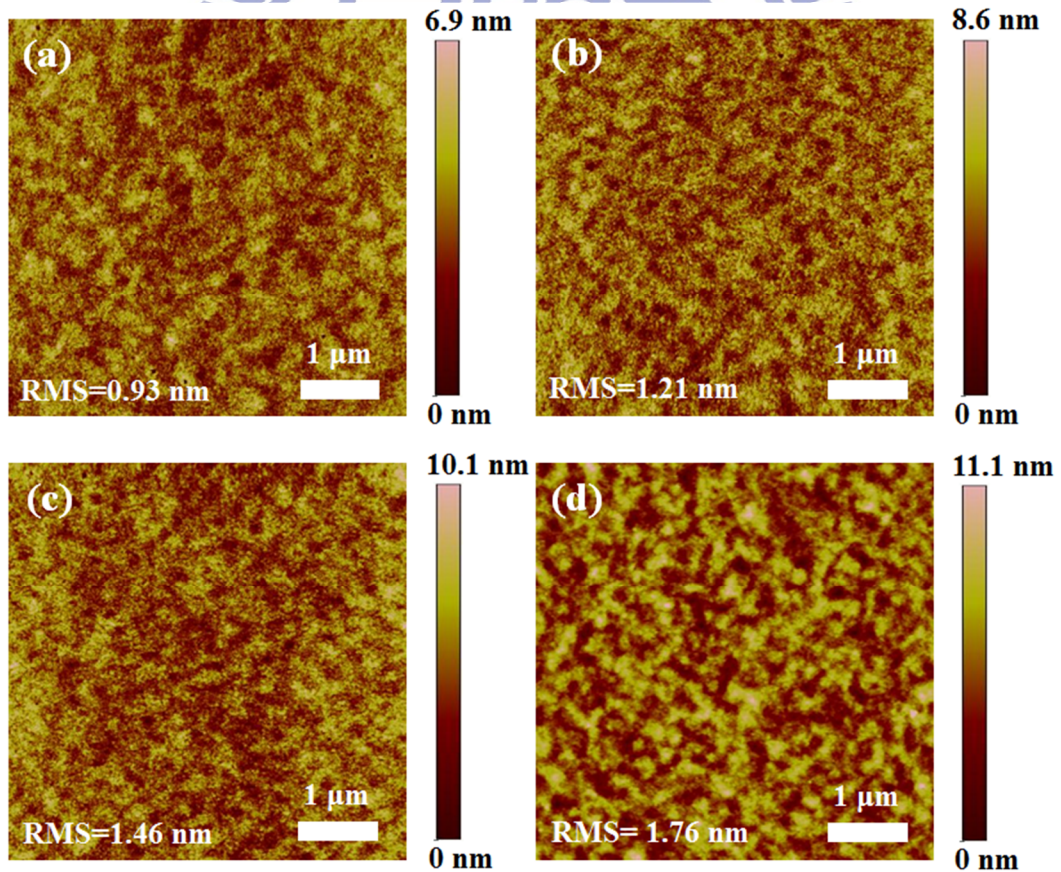


圖 4-18：PT8TPD:PCBM 在不同主動層混摻比例下之 AFM 圖
(Topographic images, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$)。 (a)1:1, (b)1:2, (c) 1:3, (d) 1:4

在 PT6TPD 元件最佳化的部分中，我們已經得知使用 PC₇₁BM 替換 PCBM 為主動層的電子受體，並加入添加劑 DIO 後會有最好的效率表現，因此接下來直接製備 PT8TPD 與 PC₇₁BM 比例為 1:1 之溶液，並加入不同 DIO 添加量，依序為 0 %、2 %、4 %、6 %，探討元件效率改善之效果。量測得 $J-V$ 曲線圖與結果整理於圖 4-19 及表 4-11 中。

表 4-11：PT8TPD:PC₇₁BM=1:1 中不同 DIO 添加量之元件特性

DIO vol %	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	PCE (%)
Without DIO	0.88	2.96	0.44	1.15
2%	0.87	5.49	0.38	1.80
4%	0.88	6.21	0.40	2.21
4%^a	0.89	4.93	0.38	1.67
6%	0.87	4.28	0.34	1.25

^a PT8TPD:PCBM=1:1

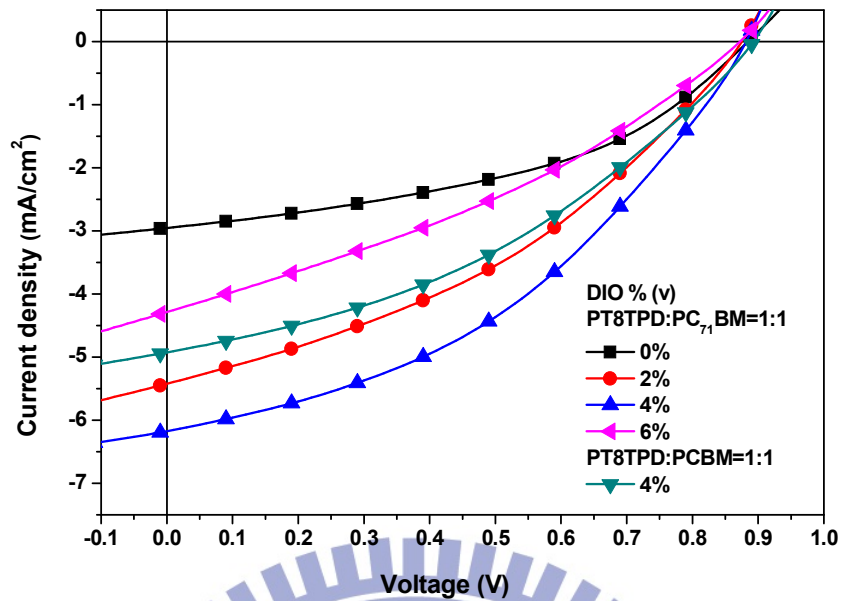


圖 4-19：PT8TPD:PC₇₁BM=1:1 中不同 DIO 添加量之 J - V 特性圖

由結果得知，在 PT8TPD 混摻 PC₇₁BM 而未添加 DIO 的情況下， J_{sc} 表現不如混摻 PCBM 者，使光電轉換效率表現降低至 1.15%，推測是因為 PC₇₁BM 的分子體積大於 PCBM，再加上 PT8TPD 的碳鏈較長使兩者互溶性更差，在溶劑揮發的過程中產生嚴重的團聚，而阻礙電荷的傳遞；加入 DIO 可幫助較好的電荷傳遞網絡形成，當添加量為 4% 時有最佳之表現， J_{sc} 變為未添加時的 2 倍以上。

圖 4-20 為 PT8TPD/PCBM 與 PT8TPD/PC₇₁BM 混摻比例為 1:1、加入 4 vol% DIO 之 EQE 曲線圖。前文提過，PC₇₁BM 在 350 nm~550 nm 波長範圍內的光吸收能力優於 PCBM，而比較兩線可以發現，在此區段內的 EQE 值確實有所提升，代表了較佳的 J_{sc} 表現，而大幅提升效率至 2.21%。

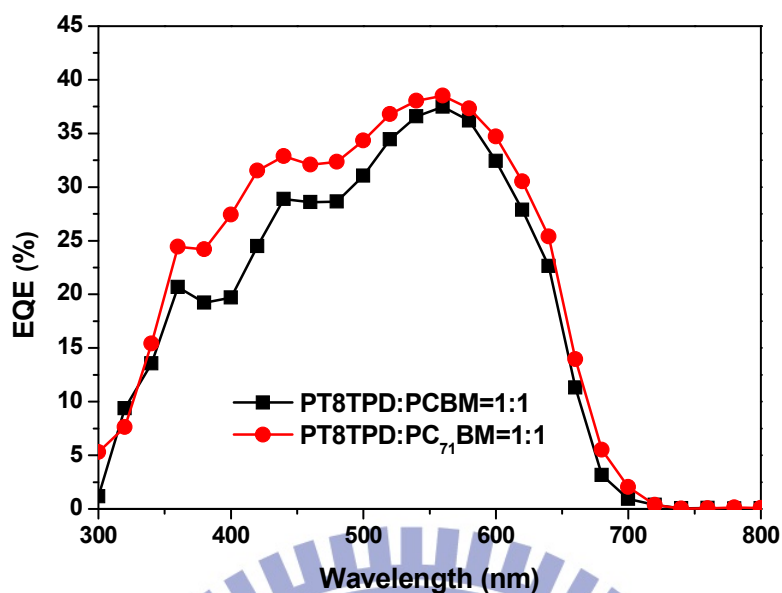


圖 4-20：PT8TPD/PCBM 與 PT8TPD/PC₇₁BM 混摻比例為 1:1 之 EQE 曲線圖

4-3-3 PCPDTTPD 之元件

由於 PCPDTTPD 之化學結構與 PT6TPD、PT8TPD 明顯不同，故在溶劑的選擇上或許也有差異，因此先將 PCPDTTPD 與 PCBM 以 1:1 之混摻比例分別溶於 CHCl₃、CB、DCB 製作元件，以選擇適合之溶劑。結果呈現於表 4-12 及圖 4-21。

可以發現當使用 CHCl₃ 與 CB 作為溶劑時，*J-V* 圖形會呈現不正常的曲線，代表電荷載子在薄膜內的傳輸速率是十分不平均的，且相較於以 DCB 作為溶劑製作之元件，*V_{oc}*、*J_{sc}* 與 FF 等數值都較小，因此可以合理推論當 PCPDTTPD 混摻 PCBM 時，在 DCB 中能有較好的排列情況而形成較佳的表面形貌，故對於 PCPDTTPD 來說 DCB 同樣也是最適當的溶劑選擇。

表 4-12：PCPDTTPD：PCBM=1:1 於不同溶劑之元件特性

Solvent	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	Thickness (nm)
CHCl ₃	0.58	2.51	0.31	0.45	89
CB	0.72	2.47	0.33	0.59	85
DCB	0.76	3.21	0.34	0.82	90

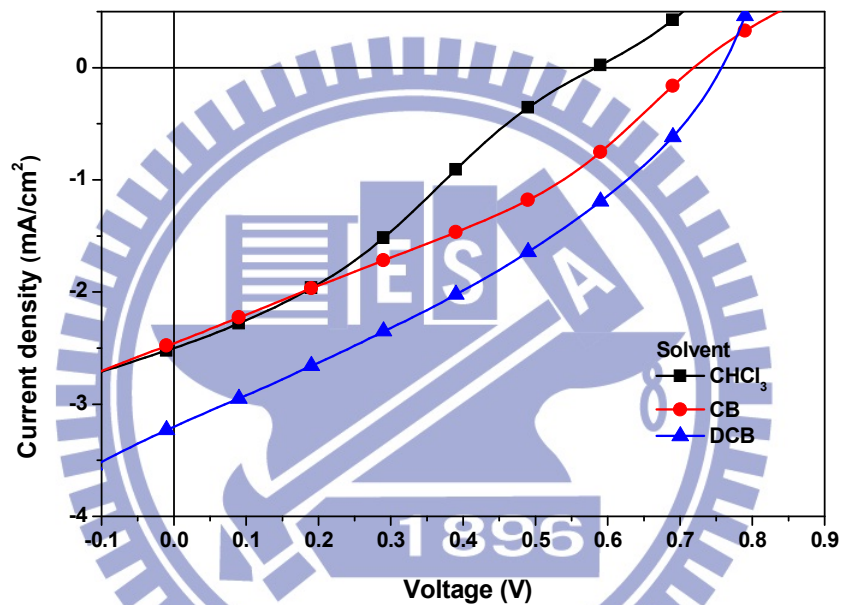


圖 4-21：PCPDTTPD：PCBM=1:1 於不同溶劑之 J - V 特性圖

在前面兩節中，我們對以 PT6TPD 及 PT8TPD 作為主動層材料的元件採用了 90°C 下預退火 20 分鐘之熱處理，對於元件的光電轉換效率確實有加分的效果，因此在此我們也將實驗退火處理對 PCPDTTPD 是否也有功效，及最適宜的退火溫度。結果整理於表 4-13 及圖 4-22。

可以發現一旦施加退火處理 20 分鐘，元件的表現皆優於未施加退火處

理者，且同樣在 90°C 下可獲得最佳的效果。對比未施行熱處理者，改善主要來自 V_{oc} 及 J_{sc} 的增加，可以合理推測在 90°C 下退火 20 分鐘可讓薄膜內的分子進行有限度的擴散，重新排列後便改善原本存在的缺陷，使電荷傳遞較為順利。

表 4-13：PCPDTPD：PCBM=1:1 不同退火溫度之元件特性

Temperature (°C)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	Thickness (nm)
70	0.74	3.6	0.34	0.91	88
90	0.78	4.22	0.35	1.15	85
110	0.76	3.91	0.36	1.07	85

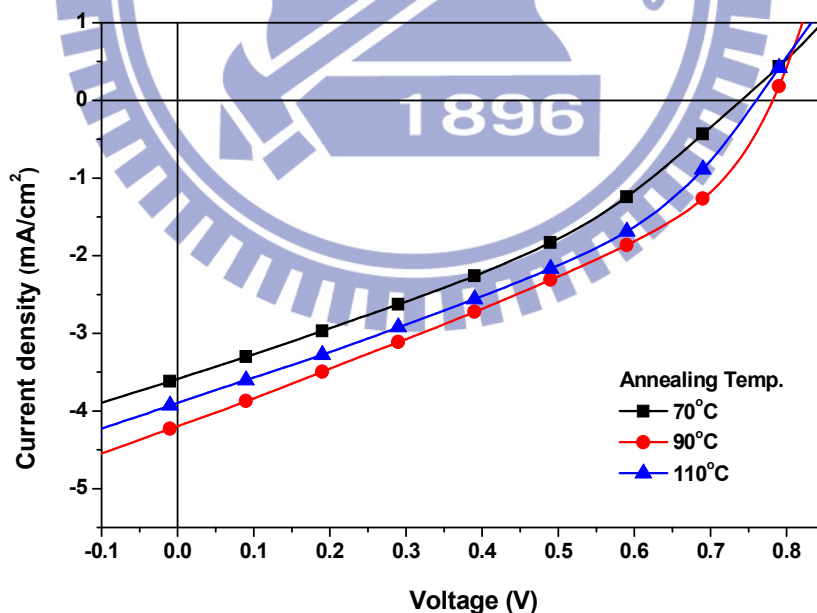


圖 4-22：PCPDTPD：PCBM=1:1 不同退火溫度之 J - V 特性圖

同樣由前兩節的實驗中得知，當我們使用 PC₇₁BM 替換 PCBM 與高分子混摻後，所製作的元件在效率上會有所提升，因此在接下來的部分即採用 PCPDTTPD 與 PC₇₁BM 以不同比例混摻，找出最適當的混摻比例。結果如表 4-14 及圖 4-23。

隨著 PC₇₁BM 的含量由 50%增加至 80%， J_{sc} 也由 3.95 mA/cm² 增加至 6.58 mA/cm²，推論應該是在較高 PC₇₁BM 含量時主動層的表面形貌較利於電荷傳輸。在此同樣利用 AFM 探討表面形貌，圖 4-24 為不同 PCPDTTPD：PC₇₁BM 混摻比例之 topographic images，可以看出當混摻入 75%及 80%的 PC₇₁BM 後，粗糙度為 0.52 nm 左右明顯低於其他兩種含量，再根據圖 4-25 的 phase images，更可清楚證明混摻比例 1:4 的薄膜有最光滑的表面形貌，也因此有最好的電荷傳輸效果，使光電轉換效率來到 1.92%。

表 4-14：不同 PCPDTTPD：PC₇₁BM 混摻比例之元件特性

PDTSTPD:PC ₇₁ BM (w/w)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	Thickness (nm)
1:1	0.78	3.95	0.33	1.01	93
1:2	0.77	5.11	0.36	1.40	80
1:3	0.80	6.25	0.37	1.83	78
1:4	0.80	6.58	0.37	1.92	75

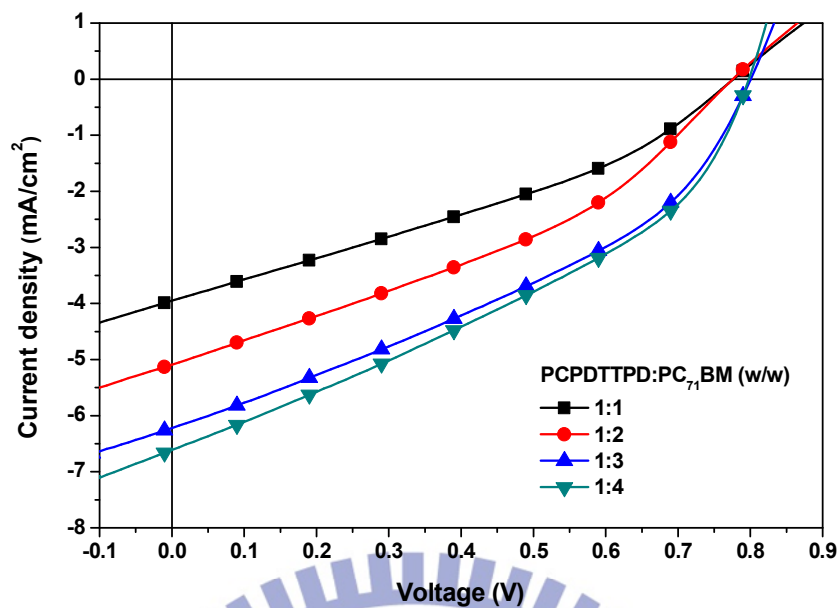


圖 4-23：不同 PCPDTTPD：PC₇₁BM 混摻比例之 J - V 特性圖

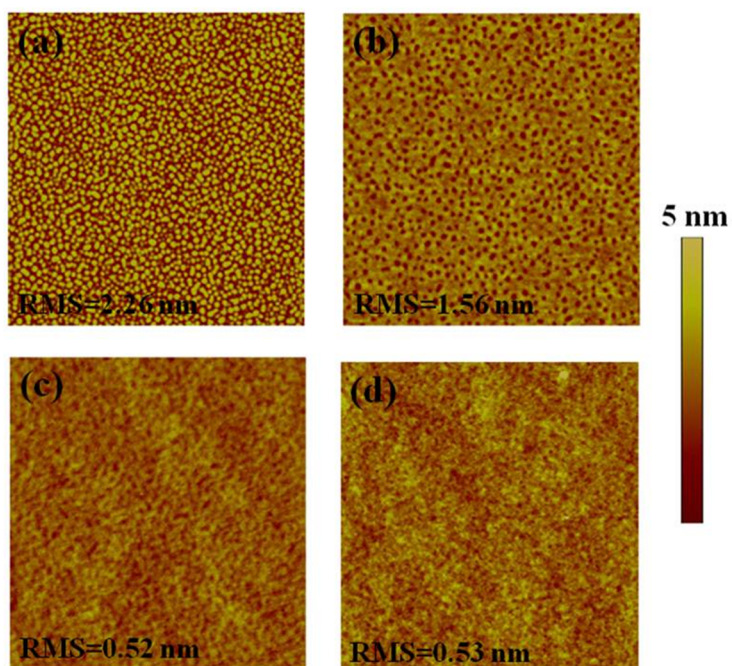


圖 4-24：不同 PCPDTTPD：PC₇₁BM 混摻比例之 AFM 圖

(Topographic Images, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$)。 (a)1:1, (b)1:2, (c) 1:3, (d) 1:4

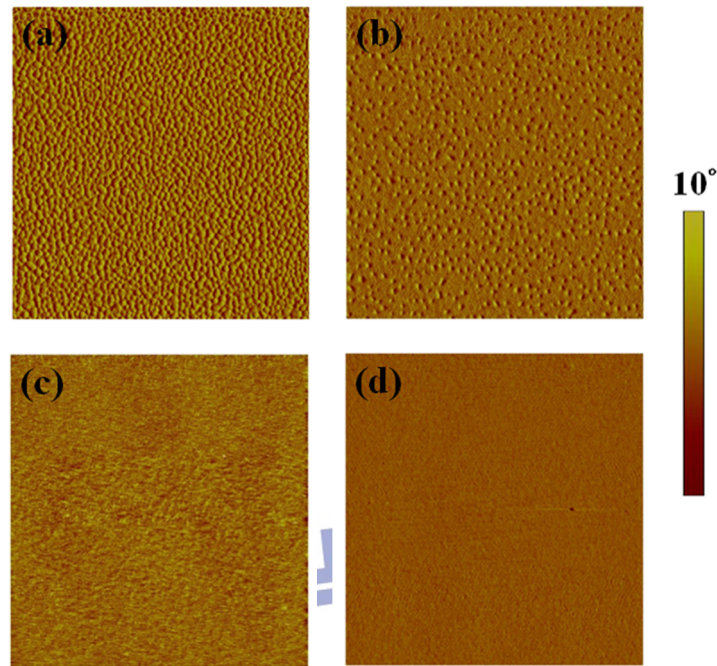


圖 4-25：不同 PCPDTTPD : PC₇₁BM 混摻比例之 AFM 圖

(Phase Images, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$)。 (a)1:1, (b)1:2, (c) 1:3, (d) 1:4

接下來探討加入添加劑的效果。在此之前有經過幾次初步嘗試，發現對於 PCPDTTPD 混摻 PC₇₁BM 而言，CN (1-chloronaphthalene) 是較為有效的添加劑，於是我們加入 3 vol % 之 CN 於 1:4 的混摻溶液中，製作之元件表現如表 4-15 與圖 4-26 所示。與未加添加劑之元件相較，雖然 V_{oc} 稍降，但 J_{sc} 由 6.58 升至 7.83 mA/cm^2 ，這是因為 CN 與 PC₇₁BM 的互溶性較好，且其沸點 259°C 高於 DCB 的 180°C，故在兩者揮發速率不同的情況下使 PCPDTTPD 與 PC₇₁BM 產生適當程度的相分離，有助於電荷載子傳輸。

圖 4-27 為 PCPDTTPD 與 PC₇₁BM 以 1:4 比例混摻，添加 3 vol % CN 前後之 EQE 曲線圖，有添加劑之曲線雖然在 600 nm 之後略低於無添加劑

者，但在 350~550 nm 的區間內明顯較高，可見在光電流產生上添加劑確實有所助益。由於電流產生的能力提高，最後的效率表現達到 2.15%。

表 4-15：PCPDTPD：PC₇₁BM 比例為 1:4，加入 3% CN 之元件特性

PDTSTPD:PC ₇₁ BM (w/w)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	Thickness (nm)
1:4	0.77	7.83	0.36	2.15	73

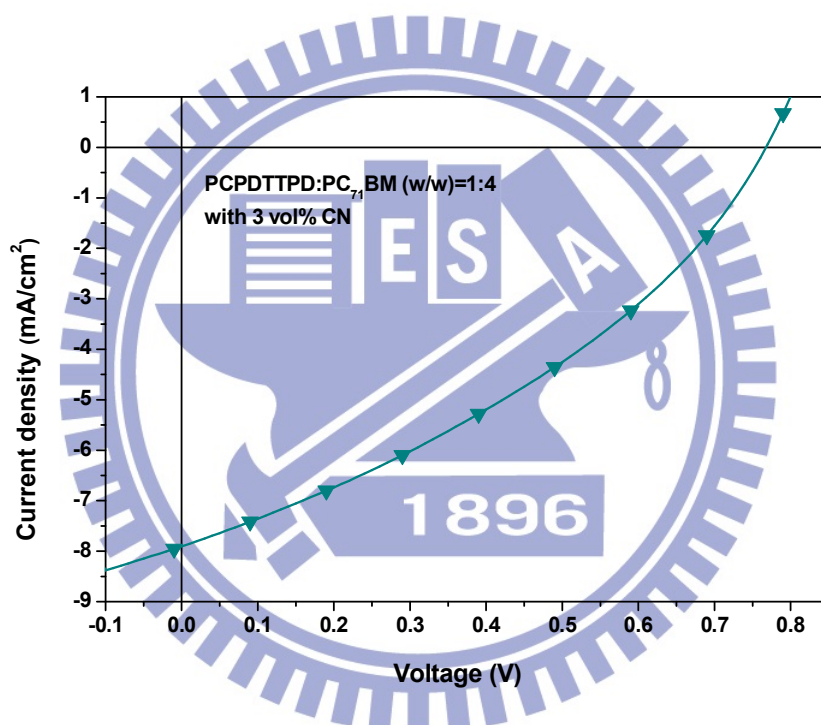


圖 4-26：PCPDTPD：PC₇₁BM 比例為 1:4，加入 3% CN 之 J - V 特性圖

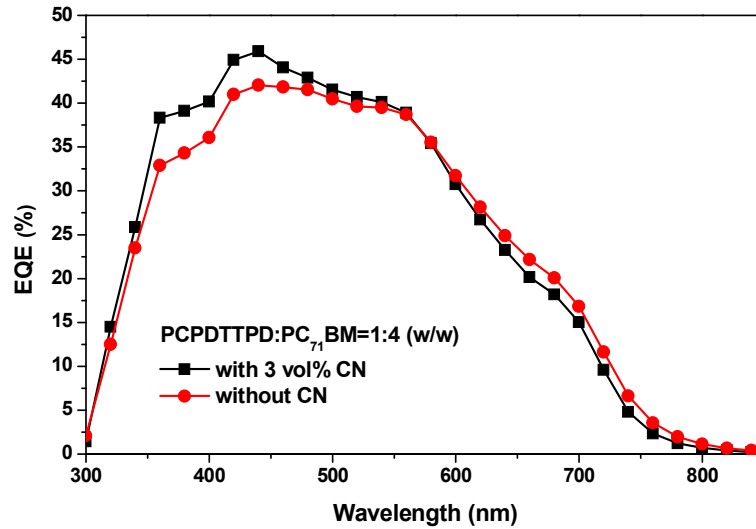


圖 4-27：PCPDTTPD：PC₇₁BM 比例為 1:4，3 vol % CN 添加前後之 EQE 曲線圖

4-3-4 PDTSTPD 之元件

由於 PDTSTPD 與 PCPDTTPD 結構十分相似，因此便直接選用 DCB 作為溶劑進行以下實驗。首先採用 PDTSTPD 與 PCBM 以 1:1 之比例混摻來找出適當退火溫度，元件量測結果如表 4-16 與圖 4-28。由結果來看，隨著退火溫度上升，主要的變化為 FF 上升、 J_{sc} 下降，而在 90°C 時恰好具有最佳平衡條件，效率為 1.85%。

表 4-16：PDTSTPD：PCBM=1:1 不同退火溫度之元件特性

Temperature (°C)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	Thickness (nm)
70	0.82	5.57	0.38	1.72	95
90	0.83	4.46	0.5	1.85	96
110	0.85	3.65	0.5	1.57	93

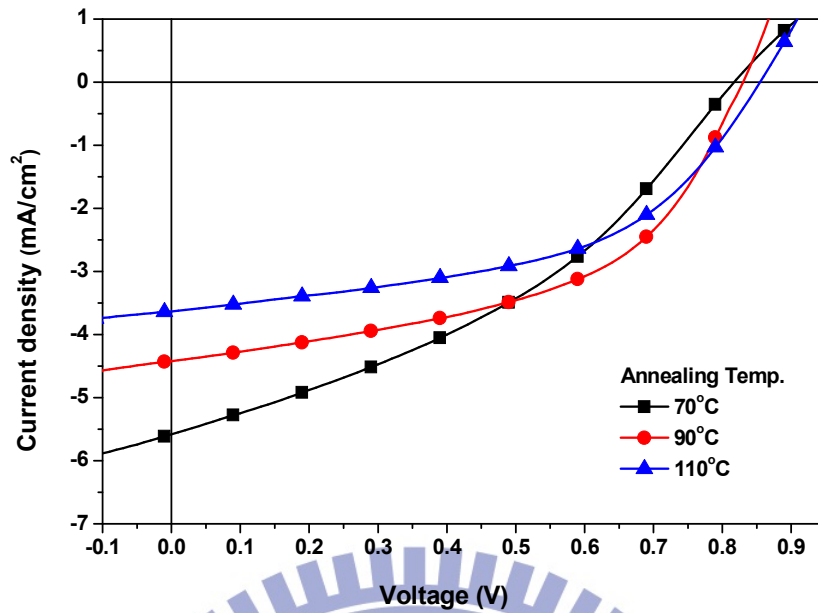


圖 4-28：PDTSTPD：PCBM=1:1 不同退火溫度之 J - V 特性圖

確認退火溫度後，將 PCBM 替換為 PC₇₁BM 與 PDTSTPD 以不同比例混摻並製成元件，量測結果如表 4-17 及圖 4-29。在不同混摻比例下 FF 與 J_{sc} 有較為明顯的變化，當 PC₇₁BM 含量 75 % 以上時 FF 達到了 0.59，而 J_{sc} 則在恰好 75 % 時有最大值 5.74 mA/cm²。由圖 4-30 的不同混摻比例之 AFM topographic images 圖可以看出，當混摻比例越高則表面越平滑，1:4 時的粗糙度為 1.14 nm 乃是最平滑者，但與 1:3 時的 1.22 nm 相差甚微，再根據圖 4-31 的 AFM phase images，發現混摻比例為 1:3 時有最均勻而緻密的相分離情況。綜合以上，當 PDTSTPD：PC₇₁BM 為 1:3 時可以形成較理想的表面形貌，提供最好的電荷傳遞環境，使 FF 與 J_{sc} 達到四種比例中的最大值，而轉換效率為 2.96 %。

表 4-17：不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之元件特性

PDTSTPD:PC ₇₁ BM (w/w)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	Thickness (nm)
1:1	0.87	4.51	0.49	1.94	97
1:2	0.88	5.34	0.55	2.58	92
1:3	0.88	5.74	0.59	2.96	90
1:4	0.87	5.25	0.59	2.69	87

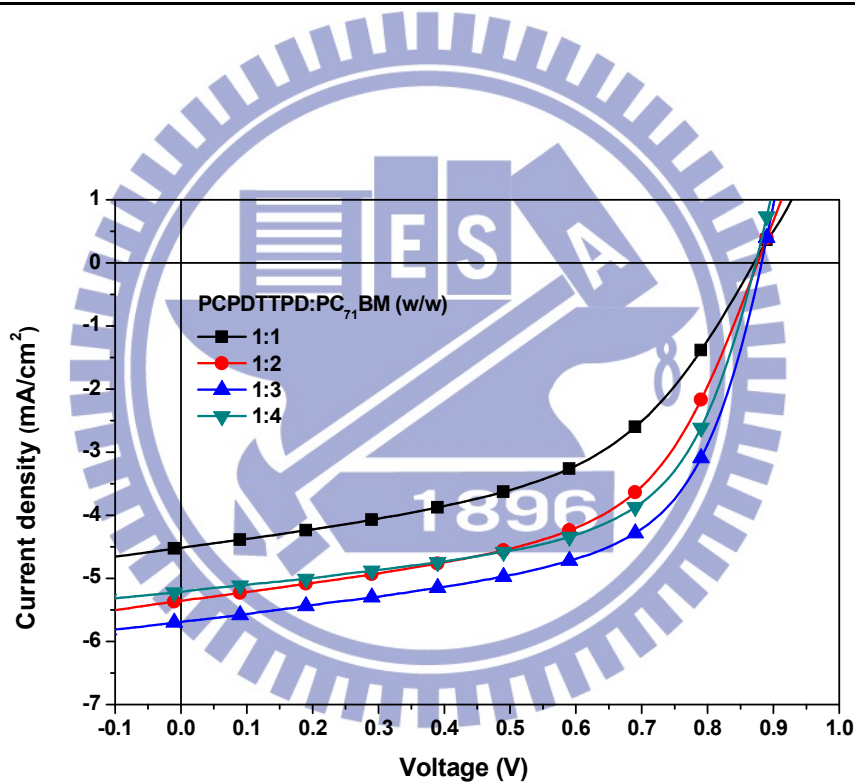


圖 4-29：不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之 J - V 特性圖

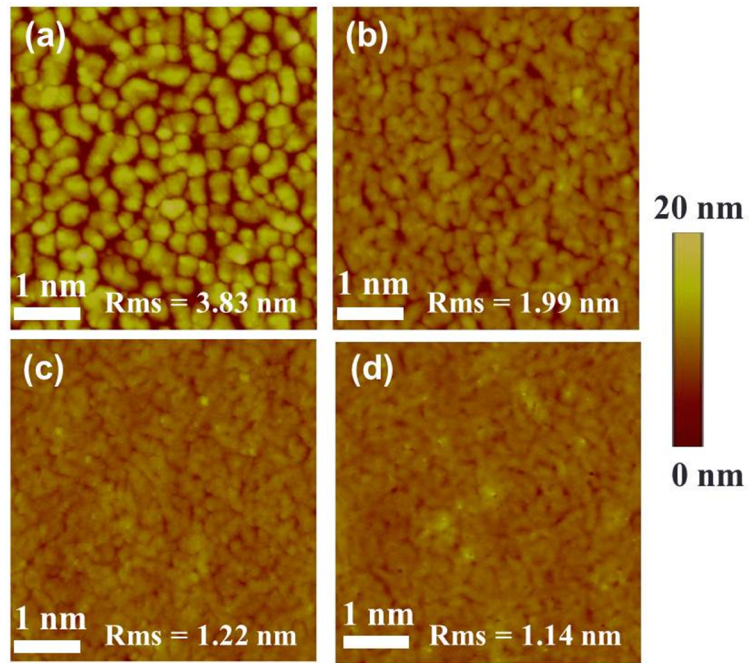


圖 4-30：不同 PDTSTPD：PC₇₁BM 混摻比例之 AFM 圖
 (Topographic Images, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$)。 (a)1:1, (b)1:2, (c) 1:3, (d) 1:4

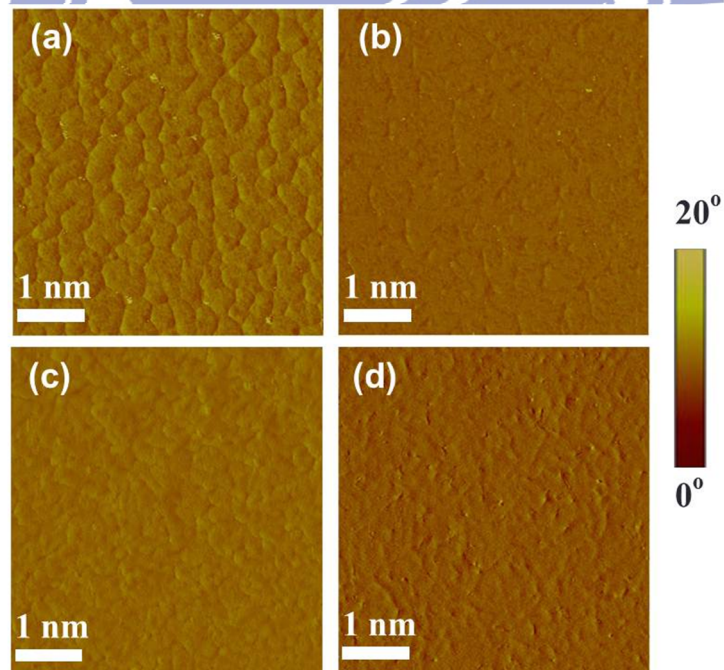


圖 4-31：不同 PDTSTPD：PC₇₁BM 混摻比例之 AFM 圖
 (Phase Images, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$)。 (a)1:1, (b)1:2, (c) 1:3, (d) 1:4

接著探討添加劑的影響，在此我們再度選用 DIO，並以 4 vol % 的比例加入不同混摻比例之溶液中，元件量測結果如表 4-18 及圖 4-32。由結果得知，加入添加劑後 FF 的部分同樣是 PC₇₁BM 含量越高時越好，而 J_{sc} 方面則是當 PC₇₁BM 含量 50 % 時有最大幅度的增加，由未加添加劑時的 4.51 mA/cm² 至添加後的 7.9 mA/cm²。原本預期光電轉換效率會與未加添加劑時有相同的趨勢，然而很意外的，由於 J_{sc} 的大幅變化，反而在 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例為 1:1 時有最好的效率表現。利用 AFM 探究使用添加劑前後效率趨勢大幅變化的原因，圖 4-33 為加入 4 vol % DIO 之不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之 Topographic Images，由粗糙程度來看，相較於未使用添加劑的表面形貌 (圖 4-30)，加入添加劑後整體粗糙程度皆增加，但依舊維持 PC₇₁BM 含量越高則表面越平滑的趨勢；再觀察圖 4-34 之 AFM Phase Images，與圖 4-31 相較可約略看出在 PC₇₁BM 含量 66% 及 75% 時，加入添加劑後的相分離較不平均，反而 50% 時有改善的傾向，但要據以解釋 J_{sc} 的大幅變化仍稍嫌薄弱，因此我們想探究薄膜內部的變化。圖 4-35 (a)、(b) 分別為 PC₇₁BM 含量 50% 及 75% 時未加入添加劑之 TEM 圖，由於不同材料的電子散射密度不同，因此圖上較暗的區塊代表 PC₇₁BM、亮區代表 PDTSTPD，可以發現加入添加劑前兩種材料各自聚集，PC₇₁BM 形成的島狀區塊顯而易見。與之對比的是圖 4-35 (c)、(d)，分別為 PC₇₁BM 含量 50% 及 75% 時加入添加劑之 TEM 圖，可以發現聚集的情況迥然不同，幾乎沒

有明顯的島狀區塊，PDTSTPD 的高分子鍊與 PC₇₁BM 分子藉由 DIO 的幫助改善兩者的互溶性，而形成均勻的相分離情況。另外觀察圖 4-35 (c)、(d) 兩圖，(c)圖中亮、暗區的差異較(d)圖更不明顯，故在 PDTSTPD 與 PC₇₁BM 之混摻比例為 1:1 時的混合狀況應優於比例為 1:3 時，因此有更好的電荷傳輸而產生更高的光電流。再根據圖 4-36，比較加入 4 vol% DIO 後 PDTSTPD 與 PC₇₁BM 混摻比例為 1:1 及 1:3 之 EQE 曲線，可以發現在約 350~750 nm 的區域內 1:1 之曲線皆高於 1:3 之曲線，吻合 J_{sc} 的量測結果。綜合以上討論，當 PDTSTPD 與 PC₇₁BM 混摻比例為 1:1 時，加入 4 vol% DIO 可改善薄膜內部結構，而使電流由 4.51 mA/cm² 大幅提升至 7.9 mA/cm²，也讓光電轉換效率由 1.94% 進步為 3.45%。

表 4-18：加入 4 vol% DIO 於不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之元件特性

PDTSTPD:PC ₇₁ BM (w/w)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	Thickness (nm)
1:1	0.86	7.9	0.51	3.45	95
1:2	0.85	7.16	0.56	3.41	94
1:3	0.85	6.6	0.6	3.36	90
1:4	0.86	6.12	0.6	3.19	92

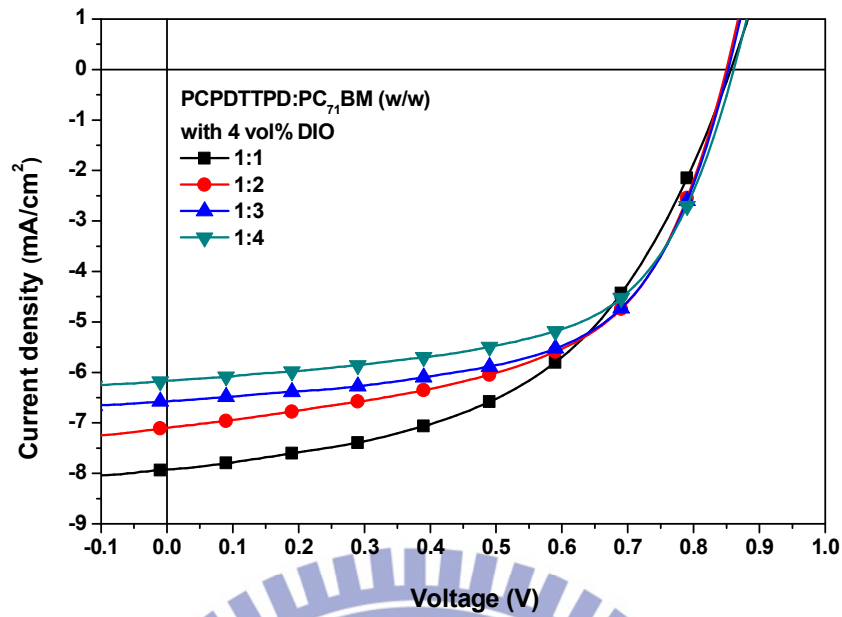


圖 4-32：加入 4 vol% DIO 於不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之 J - V 特性圖

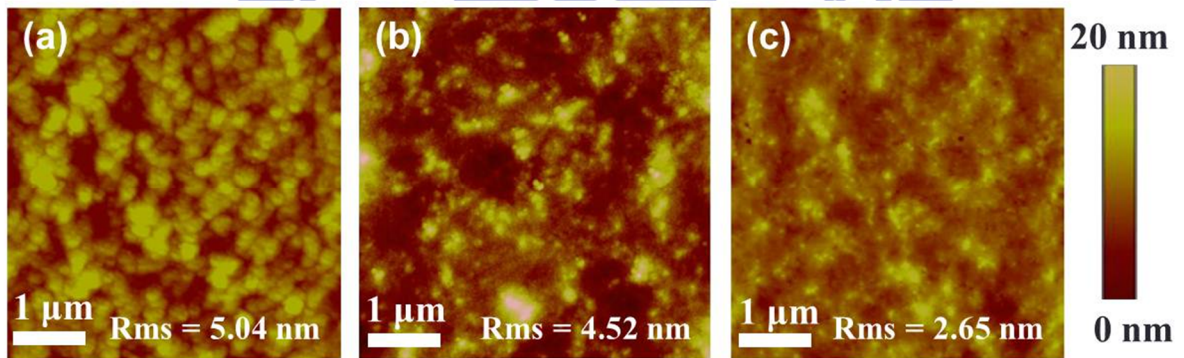


圖 4-33：加入 4 vol% DIO 之不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之 AFM 圖 (Topographic Images, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$)。 (a)1:1, (b)1:2, (c) 1:3

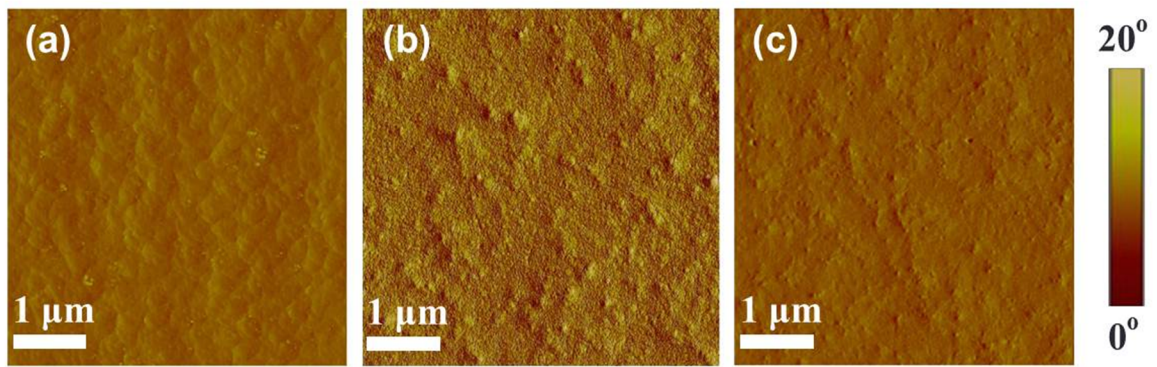


圖 4-34：加入 4 vol% DIO 之不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之 AFM 圖 (phase images, 5×5 μm²)。 (a)1:1, (b)1:2, (c) 1:3

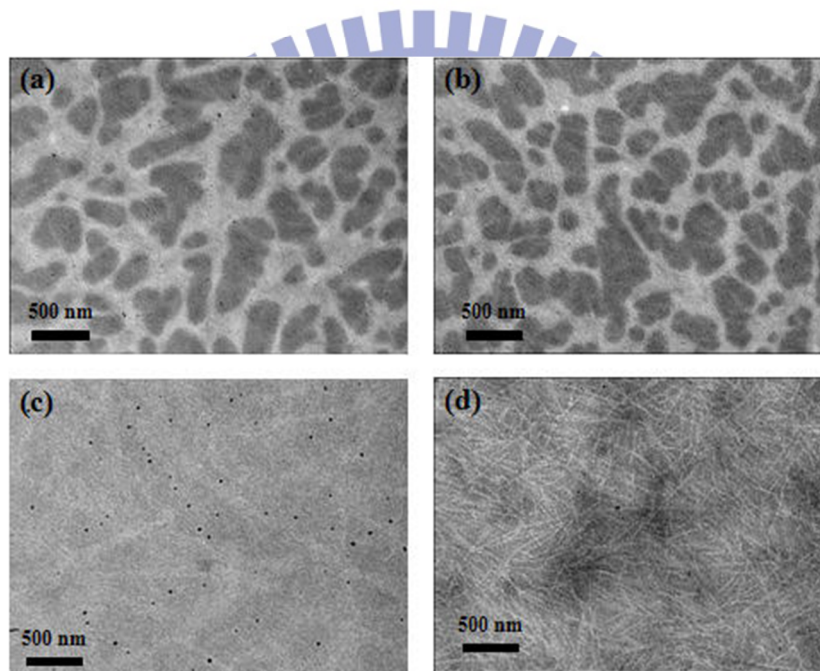


圖 4-35：不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例之 TEM 圖。
(a)1:1, (b)1:3 , (c)1:1 with 4 vol% DIO, (d)1:3 with 4 vol% DIO

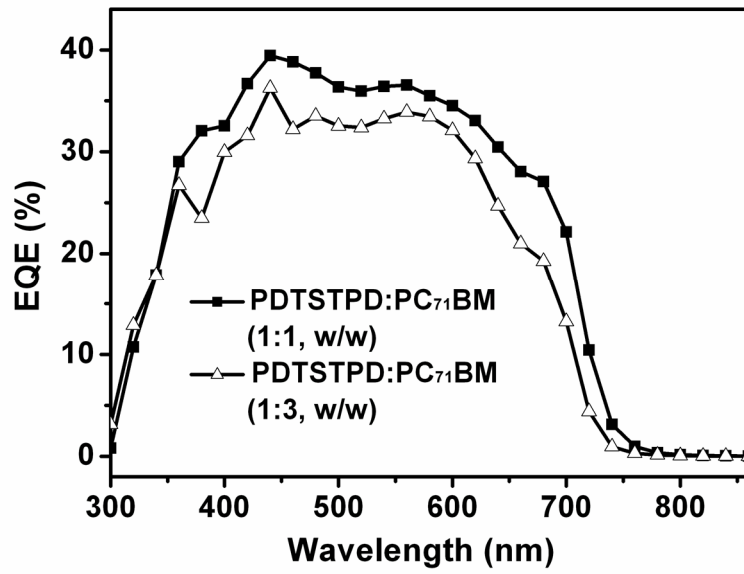


圖 4-27：加入 4 vol % DIO 之不同 PDTSTPD : PC₇₁BM 混摻比例
之 EQE 曲線圖



第五章 結論

在本研究中，基於能提供最多受體施體界面以產生光電流，我們採用總體異質接面結構進行有機共軛高分子太陽能電池之研究。

而在作用層材料方面，選用 PT6TPD、PT8TPD、PCPDTPD、PDTSTPD 等四種施體－受體型共聚高分子，分別與 PCBM 或 PC₇₁BM 混摻並旋轉圖佈為作用層薄膜。其中四種共聚高分子皆採用 Thieno[3,4-c]pyrrole-4,6-dione (TPD) 作為分子內電子受體，由於 TPD 具有堅固、拉電子能力強的共平面雙環結構，使這四種高分子有熱穩定性高、光吸收波段寬廣、HOMO 能階足夠深等優點。

為了獲得最佳的太陽能元件效率表現，在各項製程參數上都須進行調整，包含溶劑種類、作用層膜厚、受體與施體材料混摻比例等，此外施行退火處理、加入添加劑、將 PCBM 替換為 PC₇₁BM 等方式皆可有效地改善效率。

經過各項製程參數調整，得知四種材料皆須以 DCB 為溶劑，並在 90 °C 下施行 20 分鐘之退火處理可得最佳表現。其他參數方面，PT6TPD、PT8TPD 及 PDTSTPD 與 PC₇₁BM 以 1:1 之比例混摻後，並加入 4 vol% DIO 可達最佳效率依序為 2.56%、2.21%、3.45%；而 PCPDTPD 則是以 1:4 之比例與 PC₇₁BM 混摻後，再加入 3 vol% CN 可達最佳效率 2.15%。

參考文獻

- [1] Energy Technology Perspective 2009
http://www.iea.org/weo/index_chinese.asp
- [2] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, *J. Appl. Phys.*, **1954**, 25, 676.
- [3] S. R. Wenham, M. A. Green “Silicon Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics*, 4, p.3-33, 1996.
- [4] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **2011**, 19, 84.
- [5] H. Shirakawa, E. J. Lousi, A. G. MacDiarmid, C. K. Chiang, A. J. Heeger, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **1977**, 578.
- [6] W. P. Su, J. R. Schrieffer, A. J. Heeger, *Phys. Rev. Lett.*, **1979**, 42, 1689.
- [7] S. Günes, H. Neugebauer, N. S. Sariciftci, *Chem. Rev.*, 2007, 107, 1324.
- [8] B. C. Thompson, J. M. J. Fréchet, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, 47, 58.
- [9] J. Nelson, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **2002**, 6, 87.
- [10] P. W. M. Blom, V. D. Mihailetschi, L. J. A. Koster, and D. E. Markov, *Adv. Mater.*, **2007**, 19, 1551.
- [11] J. M. Nunzi, *C. R. Physique*, **2002**, 3, 523
- [12] G. Dennler, M. C. Scharber, C. J. Brabec, *Adv. Mater.*, **2009**, 21, 1323.
- [13] K. M. Coakley, M. D. McGehee, *Chem. Mater.*, **2004**, 16, 4533.
- [14] G. Yu, C. Zhang, A. J. Heeger, *Appl. Phys. Lett.*, **1994**, 64, 1540.
- [15] N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, F. Wudl, *Science*, **1992**, 258, 1474.
- [16] N. S. Sariciftci, D. Braun, C. Zhang, V. I. Srdanov, A. J. Heeger, G. Stucky, F. Wudl, *Appl. Phys. Lett.*, **1993**, 62, 585.
- [17] J. Y. Kim, K. Lee, M. Dante, A. J. Heeger, *Science*, **2007**, 317, 222.
- [18] Lambert Jan Anton Koster, “Device physics of donor/acceptor-blend solar cells”, University of Groningen, The Netherlands, PhD thesis, **2007**.

-
- [19] H. Y. Chen, J. Hou, S. Zhang, Y. Liang, G. Yang, Y. Yang, L. Yu, Y. Wu, G. Li, *Nat. Photonics*, **2009**, 3, 649.
- [20] R. Qin, W. Li, C. Li, C. Du, C. Veit, H. F. Schleiermacher, M. Andersson, Z. Bo, Z. Liu, O. Inganäs, U. Wuerfel, F. Zheng, *J. Am. Chem. Soc.*, **2009**, 131, 14612.
- [21] C. J. Brabec, A. Cravino, D. Meissner, N. S. Sariciftci, T. Fromherz, M. T. Rispens, L. Sanchez, J. C. Hummelen, *Adv. Func. Mater.*, **2001**, 11, 374.
- [22] M. Scharber, D. Mühlbacher, M. Koppe, P. Denk, C. Waldauf, A. J. Heeger, C. J. Brabec, *Adv. Mater.*, **2006**, 18, 789.
- [23] 蔡進譯, *物理雙月刊*, **2005**, 27, 701.
- [24] G. Li, V. Shortriya, J. Huang, T. Moriarty, K. Emery, Y. Yang, *Nat. Mater.*, **2005**, 4, 864.
- [25] “Is it possible to measure the temperature of the Sun?”
<http://curious.astro.cornell.edu/question.php?number=126>
- [26] F. Wudl, M. Kobayashi, A. J. Heeger, *J. Org. Chem.*, **1984**, 49, 3382.
- [27] N. Colaneri, M. Kobayashi, A. J. Heeger, F. Wudl, *Synth. Met.*, **1986**, 14, 45.
- [28] M. Kobayashi, N. Colaneri, M. Boysel, F. Wudl, A. J. Heeger, *J. Chem. Phys.*, **1985**, 82, 5717.
- [29] M. Pomerantz, B. Chaloner-Gill, L. O. Harding, J. J. Tseng, W. J. Pomerantz, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **1992**, 1672.
- [30] H. Wynberg, D. J. Zwanenburg, *Tetrahedron Lett.*, **1967**, 761.
- [31] S. Y. Hong, D. S. Marynick, *Macromolecules*, **1992**, 25, 4652.
- [32] J. March, *Advanced Organic Chemistry*, Wiley, New York, **1985**.
- [33] (a) J. Kürti, P. R. Surján, M. Kertesz, *J. Am. Chem. Soc.*, **1991**, 113, 9865
(b) E. E. Havinga, W. ten Hoeve, H. Wynberg, *Polym. Bull.*, **1992**, 29, 119
(c) E. E. Havinga, W. ten Hoeve, H. Wynberg, *Synth. Met.*, **1993**, 55, 299
- [34] H. Hoppe, N. S. Sariciftci, *J. Mater. Chem.*, **2006**, 16, 45.

-
- [35] G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, A. J. Heeger, *Science*, **1995**, 270, 1789.
- [36] S. E. Shaheen, C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz, J. C. Hummelen, *Appl. Phys. Lett.*, **2001**, 78, 841.
- [37] H. Hoppe, M. Niggemann, C. Winder, J. Kraut, R. Hiesgen, A. Hinsch, D. Meissner, N. S. Sariciftci, *Adv. Funct. Mater.*, **2004**, 14, 1005.
- [38] J. K. J. van Duren, X. Yang, J. Loos, C. W. T. Bulle-Lieuwma, A. B. Sieval, J. C. Hummelen, R. A. J. Janssen, *Adv. Funct. Mater.*, **2004**, 14, 425.
- [39] M. Al-Ibrahim, O. Ambacher, S. Sensfuss, G. Gobsch, *Appl. Phys. Lett.*, **2005**, 86, 201120.
- [40] M. Reyes-Reyes, K. Kim, D. L. Carrolla, *Appl. Phys. Lett.*, **2005**, 87, 083506.
- [41] D. Chirvase, J. Parisi, J. C. Hummelen and V. Dyakonov, *Nanotechnology*, **2004**, 15, 1317.
- [42] F. Padinger, R. S. Rittberger, N. S. Sariciftci, *Adv. Funct. Mater.*, **2003**, 13, 85.
- [43] N. Camaioni, G. Ridolfi, G. Casalbore-Miceli, G. Possamai and M. Maggini, *Adv. Mater.*, **2002**, 14, 1735.
- [44] X. Yang, J. Loos, S. C. Veenstra, W. J. H. Verhees, M. M. Wienk, J. M. Kroon, M. A. J. Michels and R. A. J. Janssen, *Nano Lett.*, **2005**, 5, 579.
- [45] G. Li, V. Shortriya, Y. Yao, Y. Yang, *J. Appl. Phys.*, **2005**, 98, 043704
- [46] J. Peet, C. Soci, R. C. Coffin, T. Q. Nguyen, A. Mikhailovsky, D. Moses, G. C. Bazan, *Appl. Phys. Lett.*, **2006**, 89, 252105.
- [47] D. Mühlbacher, M. Scharber, M. Morana, Z. Zhu, D. Waller, R. Gaudiana, Brabec, *Adv. Mater.*, **2006**, 18, 2884.
- [48] J. Peet, J. Y. Kim, N. E. Coates, W. L. Ma, D. Moses, A. J. Heeger, C. Bazan, *Nat. Mater.*, **2007**, 6, 497.
- [49] Y. Yao, J. Hou, Z. Xu, G. Li, Y. Yang, *Adv. Funct. Mater.*, **2008**, 18, 1783.

-
- [50] (a) Y. Zou, A. Najari, P. Berrouard, S. Beaupré, B. R. Aïch, Y. Tao, M. Leclerc, *J. Am. Chem. Soc.*, **2010**, 132, 5330.
(b) Y. Zhang, S. K. Hau, H.-L. Yip, Y. Sun, O. Acton, A. K.-Y. Jen, *Chem. Mater.*, **2010**, 22, 2696.
(c) C. Piliego, T. W. Holcombe, J. D. Douglas, C. H. Woo, P. M. Beaujuge, J. M. J. Fréchet, *J. Am. Chem. Soc.*, 2010, 132, 7595.
(d) G. Zhang, Y. Fu, Q. Zhang, Z. Xie, *Chem. Commun.*, **2010**, 46, 4997.
- [51] M.-C. Yuan, M.-Y. Chiu, S.-P. Liu, C.-M. Chen, K.-H. Wei, *Macromolecules*, **2010**, 43, 6936.
- [52] D. Mühlbacher, M. Scharber, M. Morana, Z. Zhu, D. Waller, R. Gaudiana, C. Brabec, *Adv. Mater.*, **2006**, 18, 2884.
- [53] G. Lu, H. Usta, C. Risko, L. Wang, A. Facchetti, M. A. Ratner, T. J. Marks, *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, 130, 7670.
- [54] (a) N. Blouin, A. Michaud, D. Gendron, S. Wakim, E. Blair, R. Neagu-Plesu, M. Belletête, G. Durocher, Y. Tao, M. Leclerc, *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, 130, 732.
(b) D. M. De Leeuw, M. M. J. Simenon, A. R. Brown, R. E. F. Einerhand, *Synth. Met.*, **1997**, 87, 53.
- [55] (a) L. J. A. Koster, V. D. Mihailetschi, P. W. M. Blom, *Appl. Phys. Lett.*, **2006**, 88, 093511.
(b) C. J. Brabec, C. Winder, N. S. Sariciftci, J. C. Hummelen, A. Dhanabalan, P. A. van Hal, R. A. J. Janssen, *Adv. Funct. Mater.*, **2002**, 12, 709–712.
- [56] D. A. M. Egbe, L. H. Nguyen, H. Hoppe, D. Mühlbacher, N. S. Sariciftci, *Macromol. Rapid. Commun.*, **2005**, 26, 1389.
- [57] (a) J. Hou, H. Y. Chen, S. Zhang, G. Li, Y. Yang, *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, 130, 16144–16145.
(b) Y. Zhang, S. K. Hau, H. L. Yip, Y. Sun, O. Acton, A. K. Y. Jen, *Chem. Mater.*, **2010**, 22, 2696.
- [58] (a) S. Nilsson, A. Bernasik, A. Budkowski, E. Moons, *Macromolecules*, **2007**, 40, 8291–8301.
(b) H. Hoppe, N. S. Sariciftci, *J. Mater. Chem.*, **2006**, 16, 45.
- [59] J. K. Lee, W. L. Ma, C. J. Brabec, J. Yuen, J. S. Moon, J. Y. Kim, K. Lee, G. C. Bazan, A. J. Heeger, *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, 130, 3619.

[60] M. M. Wienk, J. M. Kroon, W. J. H. Verhees, J. Knol, J. C. Hummelen, P. A. van Hal, R. A. J. Janssen, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **2003**, 42, 3371.

