

有機高分子太陽能電池元件之發展現況

The Development of Organic Polymer Solar Cells

藍翔、林上弘、林清富

Shiang Lan, Shang-Hong Lin, Ching-Fuh Lin

人類在近年來將面對的最大問題為能源短缺，由於石油藏量與日漸減，價格卻是不停上升，為了填補能源缺口，有多種可行的替代性能源成為各國研究的重點，太陽能幾乎取之不盡的特性，使得太陽能電池被視為能夠填補能源缺口的可行方案之一。而新發展高分子太陽能電池由於其重量輕、可撓性等性質且可大面積低成本製程，引起了廣泛的注意。為了達到其商業化，必須從三個重點方向來考量：元件效率、穩定性，以及製程成本。

Human beings are facing an important problem of energy shortage. Due to the increasing oil price, several renewable energy sources are explored to fill the energy requirement gap between demand and supply. Polymer solar cells had been one of the most promising green energy technologies due to the possibility of achieving large-area, lightweight and flexible devices with low fabrication cost. To reach the goal of cell commercialization, three important aspects have to be considered. Efficiency, stability and production cost of the devices should be equally weighed in the development of polymer solar cells.

一、有機太陽能電池介紹

太陽能電池 (solar cell) 又叫光伏電池 (photovoltaic cell)。在 1883 年 Charles Fritts 使用硒半導體夾在金鐵電極之間，成功製造出世界上第一個太陽能電池^(1, 2)，但是只有 1% 的效率。太陽能電池真正的突破是在 1945 年由貝爾實驗室的 Daryl M. Chapin 等人使用單晶矽製作出效率 6% 的太陽能電池⁽³⁾，也成為現在最成熟的太陽能電池，目前此種太陽能電池最高效率可達 25%。1975 – 2012 年間，不同種類太陽能電池最高效率進程如圖 1 所

示。此種以矽以及三五族半導體為主要材料所製造的太陽能電池被稱為第一代太陽能電池，也是目前效率最高的太陽能電池，但是因為材料成本過高，因此大家轉而開始研發第二代太陽能電池。

為了降低材料成本，第二代太陽能電池是以薄膜製程為主的薄膜型太陽能電池，其中包括有非晶矽太陽能電池 (amorphous-Si)、銅銦硒化鎵 (copper indium gallium selenide, CIGS) 與銻化鎘 (cadmium telluride) 太陽能電池，其元件的光電轉換效率都能夠到達約 20%。而現在世界上最多人研究的第三代太陽能電池是使用新材料以及新結構，希望可以

Best Research-Cell Efficiencies

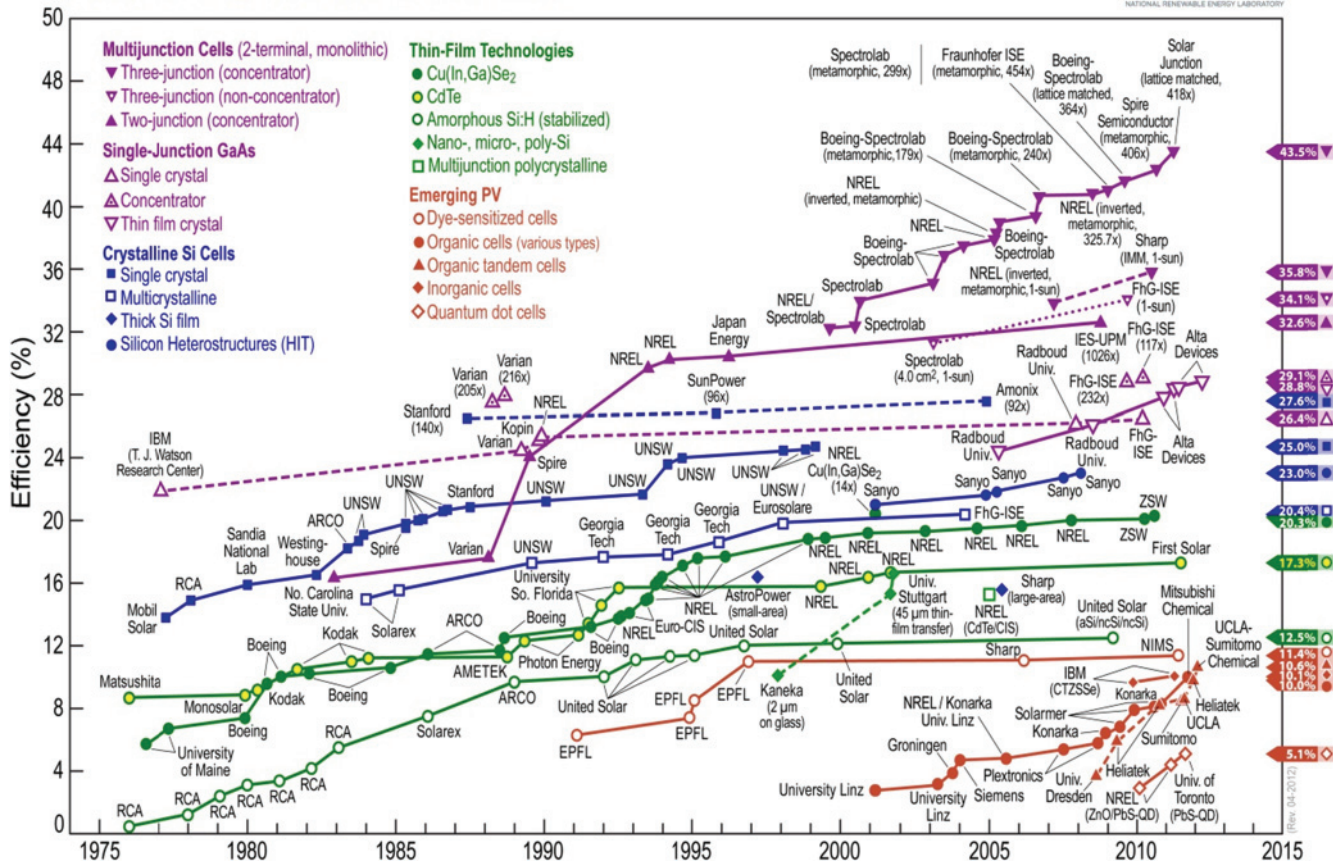


圖 1. 1975 年至 2012 年間，不同種類太陽能電池最高效率歷程⁽¹²⁾。

達成低成本高效率的太陽能電池目標。其中包含有機太陽能電池、量子點太陽能電池，以及最新研發要取代第二代 CIGS 的銅鋅錫硫化合物 (CZTS、CZTSSe) 太陽能電池^(4, 5)，其中有機太陽能電池因為其質量輕、可撓並可使用溶液製程，最有發展性。

第三代太陽能電池中的有機太陽能電池主要分為三種：有機小分子太陽能電池、染料敏化太陽能電池以及高分子太陽能電池。有機小分子太陽能電池首先由 C. W. Tang 於 1986 年在美国 Eastman Kodak 公司研發出來，提出以 copper phthalocyanine (CuPc) 為施體 (donor)、而以 perylene tetracarboxylic acid (PTCA) 的衍生物為受體 (acceptor) 的雙層異質結構 (bilayer heterojunction) 太陽能電池⁽⁶⁻⁹⁾。此一研究奠定了之後有機太陽能電池的發展方向—使用兩種不同材料的異質界面來改良電荷載子的分離過程。然而，有機小分子太陽能電池的製備通常都需要多道的真空

程序，使其在將來實際應用的考量下顯得不實際，無法低成本地大量製造，因此不需要或能減少真空製程的太陽能電池開始發展出來。染料敏化太陽能電池 (dye-sensitized solar cell, DSSC) 在 1991 年首先由瑞士聯邦理工學院的 M. Gratzel 教授所發明⁽¹⁰⁾。該電池使用具有高表面積的無機奈米材料為電極，其上吸附之有機染料為主要吸光層，再搭配液狀電解質與對電極而成。染料敏化電池不僅製程簡單且成本較低，光電轉換效率最高也可達 13%。然而為方便實際應用，其液狀電解質之漏液問題及電極間易短路問題仍有待進一步解決，不過這種漏液的問題可由固態電解質來解決。日前已有團隊發展出 CsSnI_{2.95}F_{0.05} 固態化合物電解質，成功將固態染料電池效率提升至 10%⁽¹¹⁾，但比起高分子太陽能電池還是存在元件吸光層過厚的缺點 (約 1–2 μm)，並不有利於輕薄軟性基板上的產品應用。

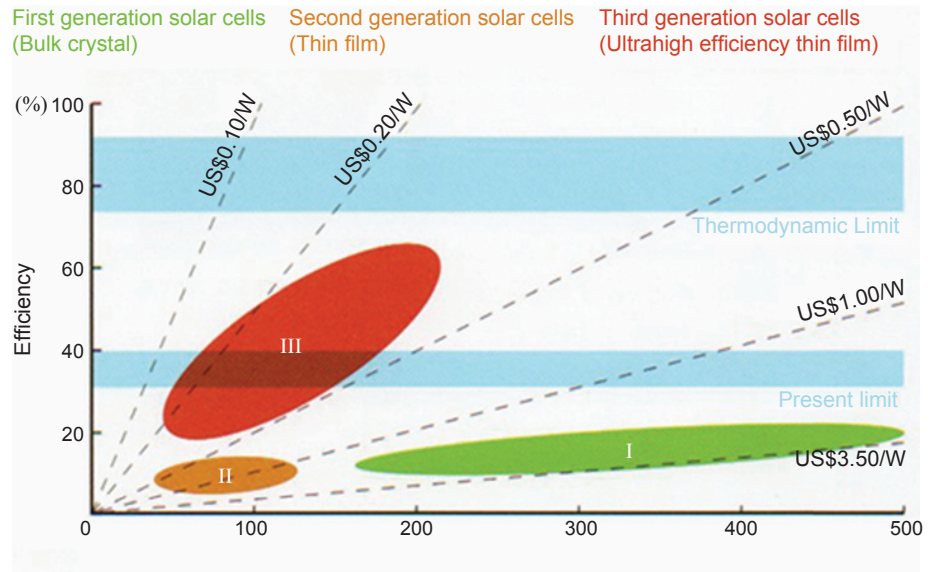


圖 2. 三代太陽能電池之光電轉換效率與成本示意圖⁽⁹⁾。

二、高分子太陽能電池之結構

1. 緩衝層和載子傳輸層材料

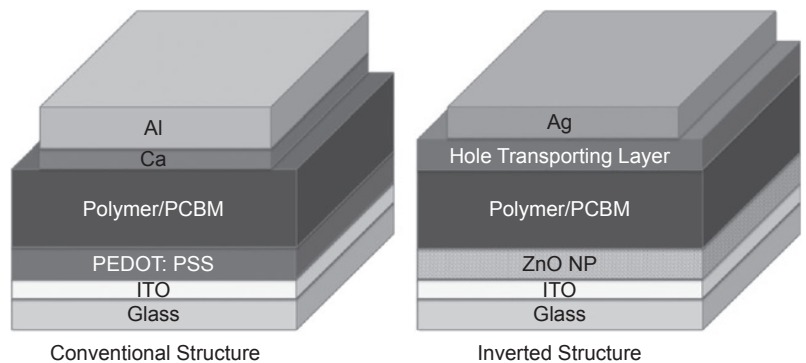
高分子太陽能電池結構最常見的是以三明治結構將有機層夾在正極和負極中，為了有效傳導載子，必須考慮各層間的功函數匹配：donor 的 HOMO (highest occupied molecular orbitals) 匹配正極，而 acceptor 的 LUMO (lowest unoccupied molecular orbitals) 匹配負極。現在最被大家所研究的結構是上面提到的使用 ITO 為正極並在其上使用 PEDOT:PSS 為中介層來修飾正極，另外使用低功函數的 Al 電極為負極的傳統結構太陽能電池，其結構如圖 3 所示。但此種傳統結構因為酸性的 PEDOT:PSS 會腐蝕 ITO 電極^(12, 13)，且低功函數的鋁電極容易在空氣中氧化使得元件穩定性不佳。為

了提升元件的穩定性，另一種使用銀電極作為正極，且使用電子選擇性的金屬氧化物修飾 ITO 的倒置結構元件也引起很廣泛的注意⁽¹⁴⁻¹⁶⁾。使用此結構可使元件在大氣下不封裝的穩定度大幅提升⁽¹⁷⁻¹⁹⁾。

在倒置結構下， Cs_2CO_3 ^(20, 21)、 TiO_x ^(22, 23)、 ZnO ^(24, 25) 是三種已有文獻發表用來作為修飾 ITO 的電子收集層 (electron extraction layer)，而在主動層部分，最先被大家完善研究的材料為 P3HT:PCBM，以下的討論都是以此材料為主動層的系統之倒置結構太陽能電池。

在 2008 年 Hua-Hsien Liao 等人使用 Cs_2CO_3 作為電子傳輸層，並搭配蒸鍍的 V_2O_5 及後退火，有效地使倒置結構的元件來到 4.2%⁽²⁰⁾。在 2011 年 Yen-Ju Cheng 等人使用 TiO_x 為電子傳輸層並搭配

圖 3. 傳統以及倒置結構太陽能電池結構圖⁽¹⁹⁾。



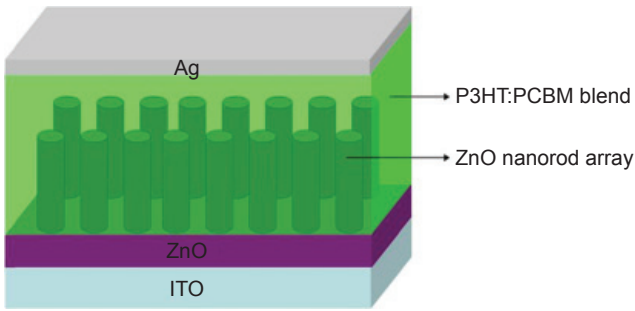


圖 4. 使用氧化鋅奈米柱以及 V_2O_5 之倒置結構太陽能電池結構圖⁽²⁷⁾。

紫外光以及加熱，使 PCBM 高分子化的衍生物作為中介層，成功地製作出效率 4.5% 的倒置結構太陽能電池⁽²³⁾。在 2006 年 M. S. White 等人也發表了利用溶膠-凝膠法 (sol-gel) 製備 ZnO 電子傳輸層，當時效率達到 2.58%⁽²⁶⁾。在氧化鋅 (ZnO) 為電子傳輸層被發表後，到現在一直都是最備受矚目的，其原因之一是可在 ZnO 電子傳輸層上製作垂直的氧化鋅奈米柱來幫助載子有效的傳輸，在 2009 年 Ching-Fuh Lin 的團隊使用水熱法成長氧化鋅奈米柱，搭配水溶液的 V_2O_5 作為電子阻擋層，其元件結構如圖 4 所示，製作出效率 3.56% 的倒置結構高分子太陽能電池⁽²⁷⁾。

會以倒置結構製作太陽能電池主要就是希望元件的穩定度可以在不封裝的情況下有效地提升。在 2010 年 Ching-Fuh Lin 團隊也首創使用溶液製成的氧化銅在主動層以及銀電極之間作為電子阻

擋層，製作效率 4.02% 的倒置結構太陽能電池元件，並且在大氣中不封裝的情況下使元件最大效率在超過 1000 小時後依然維持 85%⁽¹⁷⁾。同一個團隊也在 2010 年再度發表以溶液製成的混合金屬氧化物 V_2O_5 和 WO_3 作為電子阻擋層，製作出效率 4.16% 的倒置結構太陽能電池元件，並且也是在大氣中不封裝的情況下，使元件最大效率在超過 1200 小時之後依然維持 90%⁽¹⁸⁾。以其上兩者效率隨時間變化如圖 5 所示。

由以上可知，倒置結構提供元件在大氣中不封裝的情況下，依然能維持良好的元件轉換效率，代表元件在大氣下穩定度高，如此除了可以大大地節省封裝的成本之外，也為現今因為穩定度不足而無法商業化的高分子太陽能電池提供了一個非常好的解決之道。

2. 新 *n* 型富勒烯衍生物受體材料

因為 PCBM 的 LUMO 值使得 P3HT:PCBM 材料系統下的開路電壓受到限制，因此限制了此材料系統的效率，為了突破這個限制，一種新型的受體材料 ICBA 被用來製作高分子太陽能電池。

ICBA 這材料在 1997 年由 Austris Pupioviskis 等人首先合成出來，其合成過程如圖 6 所示⁽²⁸⁾，但是當時並未被拿來運用在太陽能電池上，直到 2007 年才由美國的 Plextronics 與 Nano-C 申請專利，製作出傳統結構太陽能電池，元件效率為 4.9%⁽⁴²⁾。Plextronics 使用 ICBA 以及 P3HT 製作光伏墨水 (photoactive ink) 產品 (Plexcore® PV2000)，並與各個機構合作或是販賣材料。Yu-Hong Lin 等人在 2011 年使用 PV2000 為主動層並搭配 TiO_2 Nanorod 修飾 ZnO，成功製作效率 5.61% 倒置結構太陽能電池元件⁽³⁰⁾。

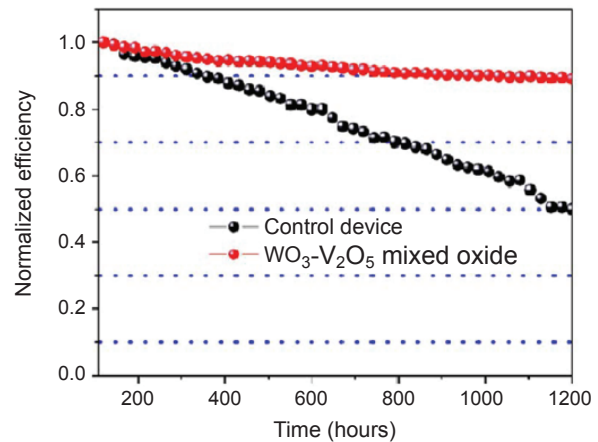
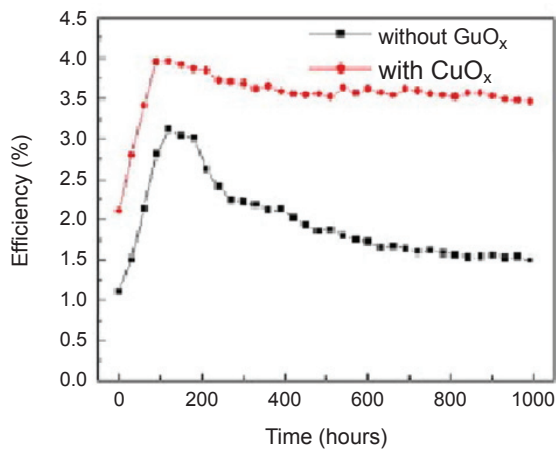


圖 5. 元件在大氣下不封裝情形下效率隨時間變化圖^(17, 18)。

圖 6.
1997 年 ICBA 被首度合成出來
之流程圖⁽²⁸⁾。

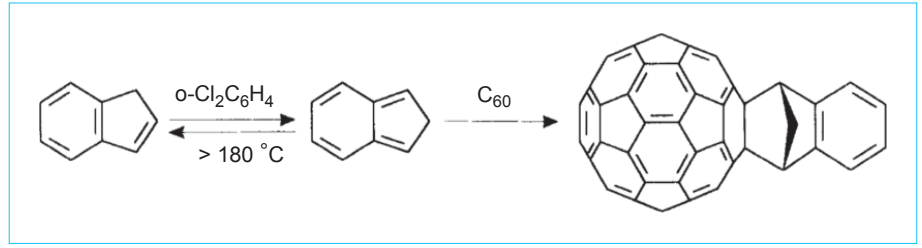
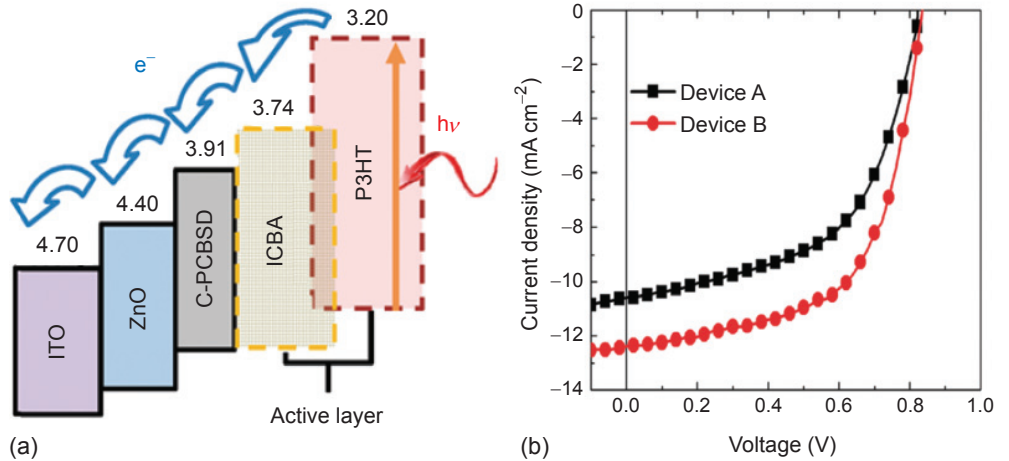


圖 7.
P3HT:ICBA 加入
C-PCBSD 中介層之元
件，(a) 能階圖，(b) J-V
圖⁽³³⁾。



ICBA 這材料在 2010 年由 Yongfang Li 團隊提出並且發表在期刊上，並詳細記載了此材料的各項特性，包括因為擁有較高的最低未被分子佔有軌道 (LUMO) 值 (-3.74 eV) 比 PCBM 高 0.17 eV⁽³¹⁾，因此可使元件的開路電壓有效地提升，並製作出傳統結構之太陽能電池、效率 5.5% 之元件。幾個月後，同一個團隊使用退火製程製作出 6.5% 之

P3HT:ICBA 傳統結構太陽能電池⁽³²⁾。而在 2010 年 Yen-Ju Cheng 團隊使用此材料在倒置結構下並加入 C-PCBSD 中介層，其元件能階圖與 J-V 圖如圖 7 所示，成功使元件效率達到 6.2%⁽³³⁾。

在 2011 年 Yongfang Li 團隊在加入 anodic aluminum oxide 垂直結構改質後，使用此材料在倒置結構下使效率達到 7.3%⁽³⁴⁾，其元件能階圖

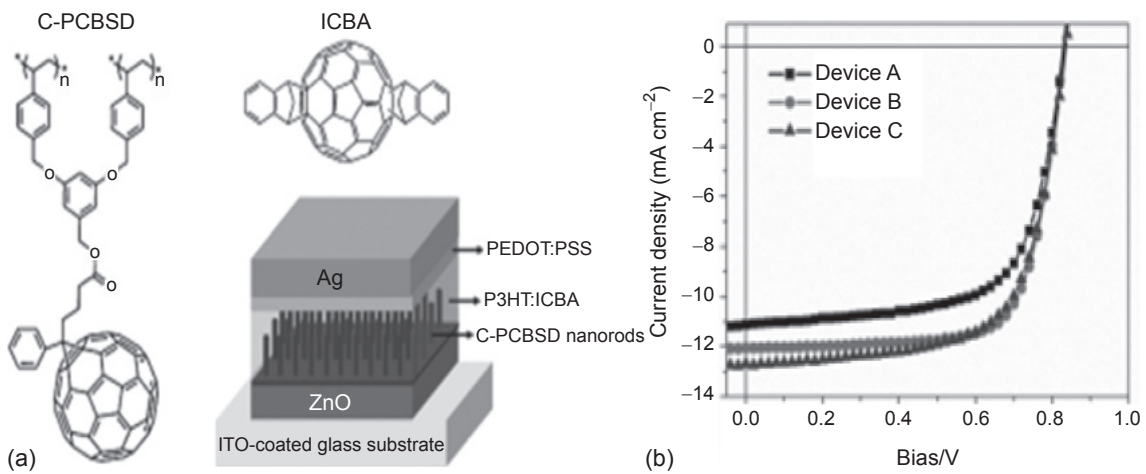


圖 8. P3HT:ICBA 加入 C-PCBSD nanorods 之元件，(a) 結構圖，(b) J-V 圖⁽³⁴⁾。

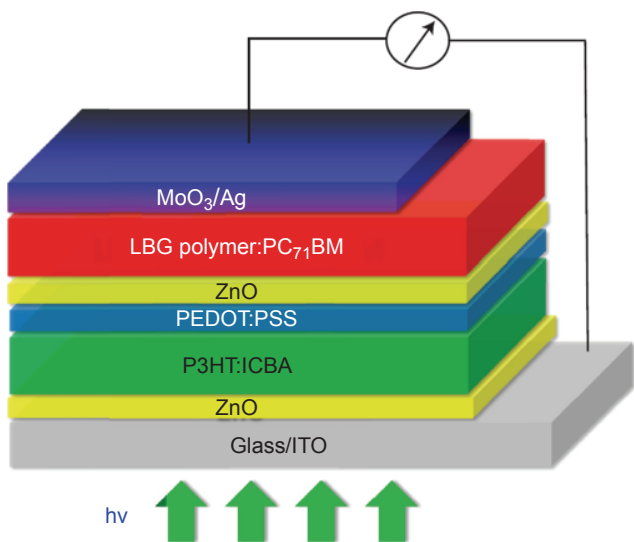


圖 9. ICBA:P3HT 和 PC₇₁BM:PBDTT-DPP 串接式太陽能電池結構圖⁽³⁵⁾。

與 J-V 圖如圖 8 所示。由以上得知在使用新型受體材料 ICBA 後，倒置結構的元件效率有效提升，並且超越 P3HT:PCBM 系統的 5%。另外在 2012 年 Yang Yang 團隊使用 ICBA:P3HT 和 PC₇₁BM:PBDTT-DPP 做串接式太陽能電池，其元件結構如圖 9 所示，其元件效率為 8.6% (Nrel 驗證)⁽³⁵⁾。

3. 低能隙導電高分子施體材料

P3HT 的能隙大約為 2 eV，因此在長波長的光較無法吸收到，如此限制了元件的光電流，為了提升長波長光的吸收，降低高分子材料的能隙是必要的。以此理論基礎，眾多的低能隙高分子材料被合

成出來，並且在傳統結構元件有較好的表現以及文獻發表。因為本篇文章是討論倒置結構之高分子太陽能電池，因此下面文獻探討主要在於倒置結構系統中。然而在倒置結構下，直到 2011 年 Heeger 團隊使用低能隙材料 PCDTBT 和 PC₇₁BM 作為主動層並加入蒸鍍的氧化鉬作為電子阻擋層，成功地製作出效率 6.33% 的倒置結構元件⁽³⁶⁾ 之後才有比較大的突破，其元件結構圖以及 J-V 圖如圖 10 所示。2011 年 Ye Tao 團隊使用低能隙材料 PDTSTPD 和 PC₇₁BM 作為主動層，且使用 NTB 作為主動層添加劑並對電子傳輸層氧化鋅改質，製作出 6.7% 的倒置結構元件⁽³⁷⁾。

2011 年 Franky So 團隊使用低能隙材料 PDTG-TPD 和 PC₇₁BM 作為主動層，並使用 poly (vinyl pyrrolidone) (PVP) 對氧化鋅 (ZnO) 進行改質後，製作出 7.4% 的倒置結構元件⁽³⁸⁾。2012 年 Yongfang Li 團隊使用低能隙材料 PBDTTT-C 和 PC₇₁BM 作為主動層，並使用 Ti 的化合物 titanium (diisopropoxide) bis (2,4-pentanedionate) (TIPD) 取代氧化鋅做為新的電子收集層，此不同型態的倒置結構元件效率也達到 7.4%⁽³⁹⁾，其元件結構圖以及 J-V 圖如圖 11 所示。

2012 年 Yang Yang 團隊使用 PBDTTT-C-T 材料，並搭配奈米金粒子以及銀電極光柵，製作出 8.79% 的倒置結構高分子太陽能電池，其元件結構圖示意圖如圖 12 所示⁽⁴⁰⁾，此效率也是目前倒置結構的紀錄。由以上文獻可知，使用低能隙材料製作出的倒置結構元件在近兩年內有較大的突破。

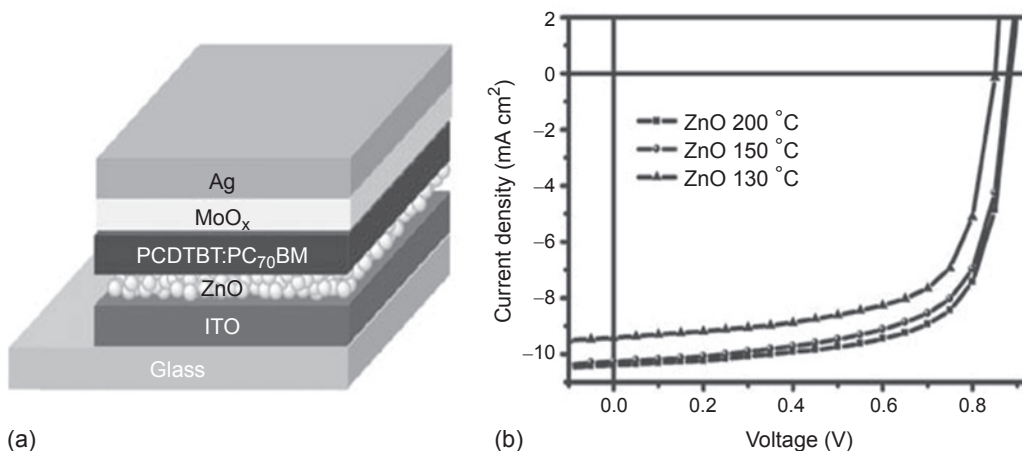


圖 10. 以 PCDTBT 和 PC₇₁BM 作為主動層之倒置結構元件，(a) 結構圖，(b) J-V 圖⁽³⁶⁾。

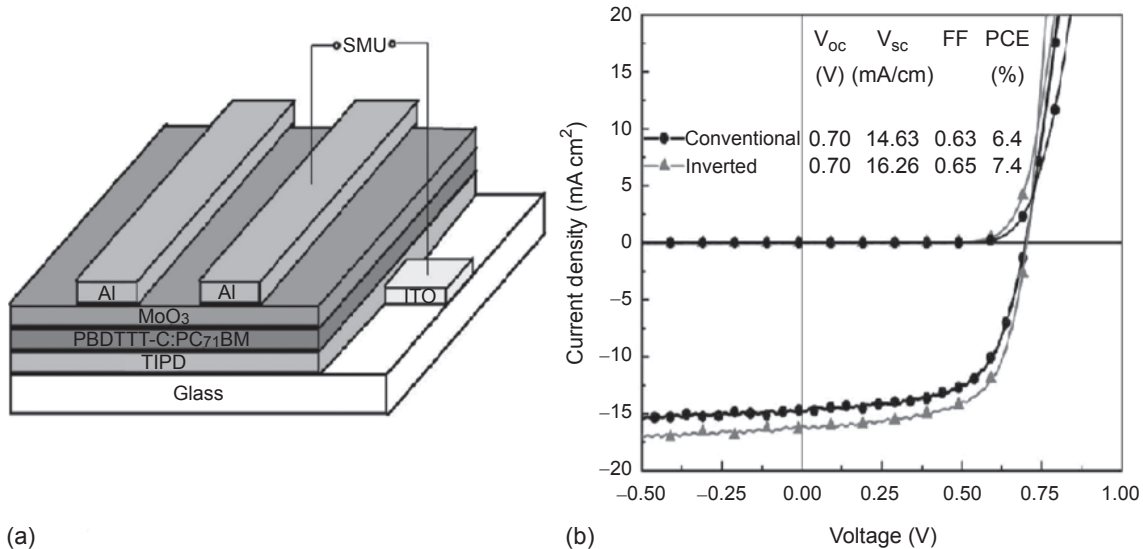


圖 11. 以 PBDTTT-C PC₇₁BM 作主動層並使用 TIPD 作為電子傳輸層之倒置結構元件，(a) 結構圖，(b) J-V 圖⁽³⁹⁾。

三、軟性基板之全溶液製程

為了實現大面積、穩定度高、可撓、低成本的溶液製程，高分子太陽能電池在 1993 年由 A. J. Heeger 與 F. Wudl 團隊的 N. S. Sariciftci 等人製備出第一個高分子/C60 之雙層結構太陽能電池，因為觀察到共軛高分子 (MEH-PPV) 與 C60 間之超快光致電子傳導效應⁽⁴¹⁾。接著在 1995 年，Heeger 團隊再度突破，首先發明了單層塊材異質界面 (bulk heterojunction single layer, BHJ) 的 MEH-PPV/PCBM 太陽能電池，此種交互混雜的結構使

donor 與 acceptor 間的接觸面積大幅提升，使電子電洞對分離更有效率⁽⁴²⁾。現在單層塊材異質界面的結構下，使用 poly(3-hexylthiophene) (P3HT) 和 (6,6)-phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM) 作為主動吸光層是最被大家熟悉的，在 2002 年 P. Schilinsky 發表了由 P3HT:PCBM 材料製做的太陽能電池效率可達 2.8%⁽⁴³⁾，在這之後，在此材料系統下效率突飛猛進，現在 P3HT:PCBM 高分子太陽能電池效率可以做到 5% 以上^(44, 45)。而近幾年在低能隙材料⁽⁴⁶⁻⁴⁸⁾ 以及串接式太陽能電池⁽⁴⁹⁾ 的發展下，高分子太陽能電池效率已經突破 10%。

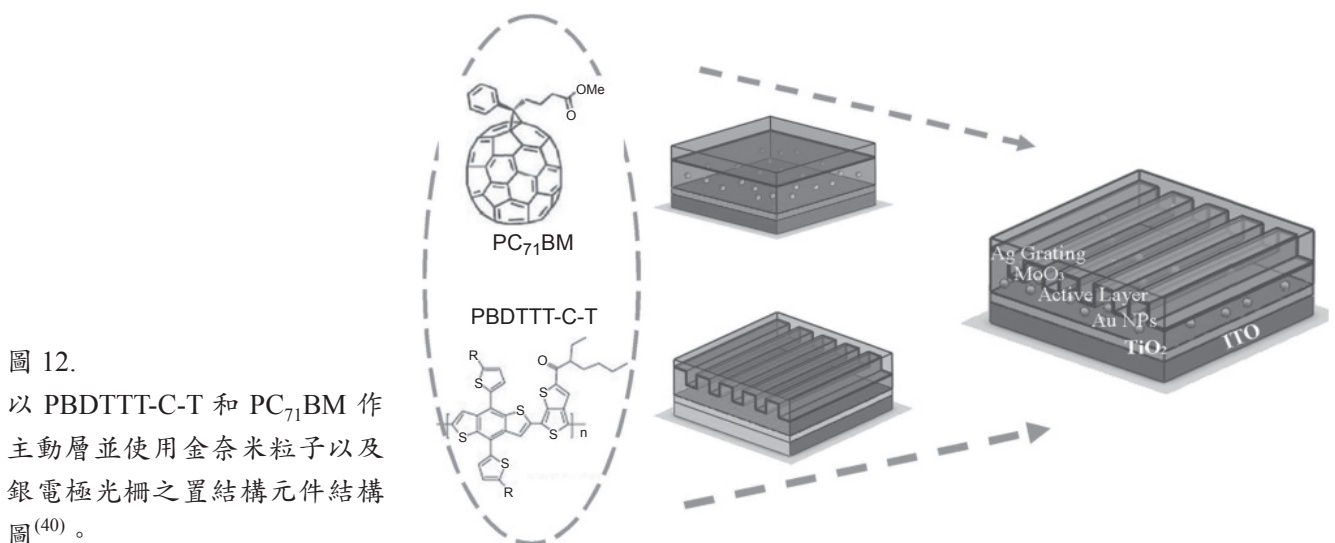


圖 12. 以 PBDTTT-C-T 和 PC₇₁BM 作主動層並使用金奈米粒子以及銀電極光柵之置結構元件結構圖⁽⁴⁰⁾。

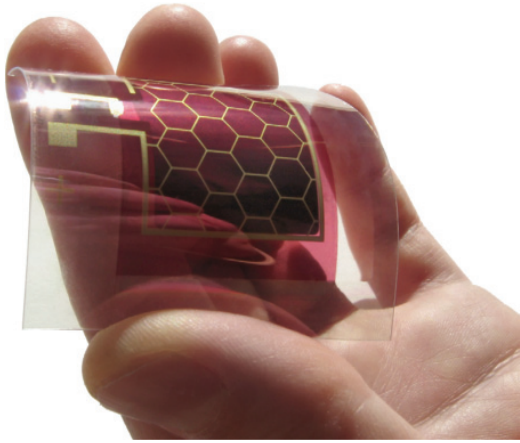


圖 13. PET 軟性基板上製作可撓高分子太陽能電池⁽⁵¹⁾。

在軟性基板 (PET) 上製作可撓之高分子太陽能電池，是達成商業化的另一個很大的目標，如圖 13 所示。在 2009 年 Frederik C. Krebs 提出了全溶液無蒸鍍製程的高分子有機太陽能電池⁽⁵⁰⁾，而在 2010 年同樣的團隊成功把此全溶液製成的全溶液高分子有機太陽能電池效率提升到 2.75%⁽⁵¹⁾，其示意圖如圖 14 所示，雖然效率還是不高，但是這在實現商業化上又更進一步。

另外 Yinhua Zhou 等人在今年發表了一種利用 PEDOT:PSS 作為全溶液製程的陰陽極，來製作有機軟性電子元件，該團隊成功利用高極性排列的 PEI 高分子塗佈在 PEDOT:PSS 降低功函數⁽⁵²⁾，使得高功函數 PEDOT:PSS 能扮演陰電極的角色。他們甚至展示了利用全溶液製程 PEDOT:PSS 作為陰陽極的半透明、軟性基板之倒置結構高分子太陽能電池，並且讓 ICBA:P3HT 主動層保有 3% 的效率，立下了高分子太陽能電池發展上的里程碑。圖 15 為其全溶液製程元件實際照片和示意圖。

四、結論

在學術研究方面，高分子太陽能電池在這十年以來也漸漸被重視而蓬勃發展，圖 16 顯示了這十年來在 高分子太陽能電池在國際 SCI 期刊論文的發表數量 (以 “polymer solar cells” 為關鍵字在 ISI Web of Science 資料庫搜尋的結果)。此圖顯示，高分子太陽能電池研究發表的數量在這十年中是以幾近指數成長的趨勢增加的，從 2000 年的不到 30 篇論文，成長到 2010 年的 1300 篇，充分地顯示了其

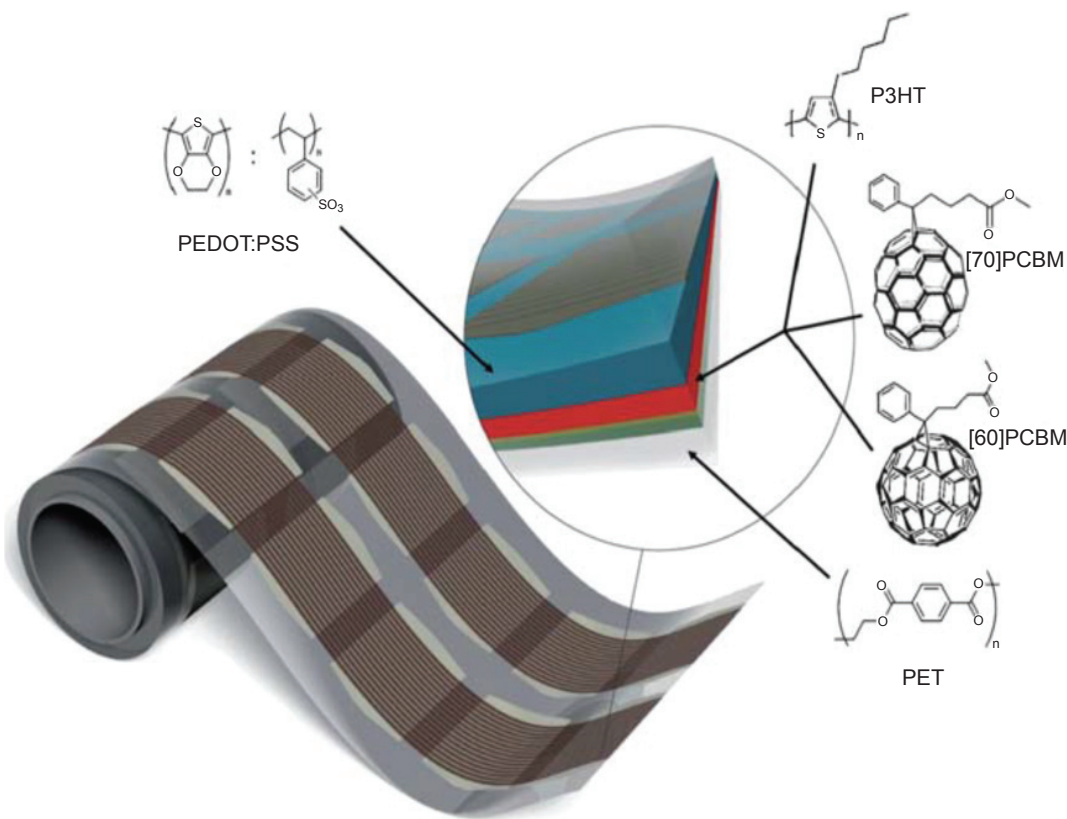


圖 14. 軟性 PET 上全溶液製作可撓性高分子太陽能電池示意圖⁽⁵¹⁾。

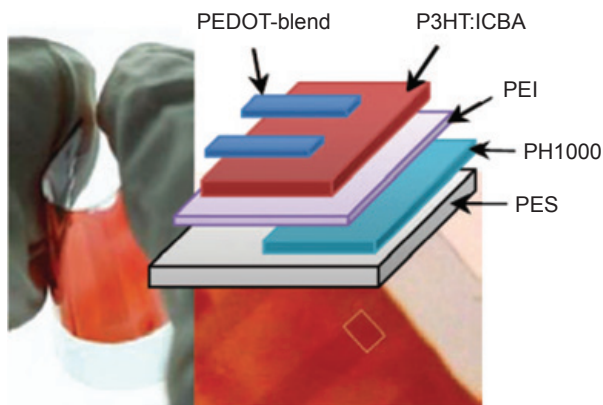


圖 15. 使用 PEDOT:PSS 製作全溶液製程之 ICBA:P3HT 倒置結構太陽能電池⁽⁵²⁾。

研究活力。有學者認為此一大幅度的成長主要與各國政府近十年來對能源、環境政策的重視與資金投入有關，另外的原因則可能是由於高分子太陽能電池目前正以非常快速度朝商業化目標前進，因此吸引很多投資人挹注資金於相關之新興公司與研究機構。新興公司如以進行完整專利布局為策略的美國 Konarka 公司、專注於某些關鍵技術的美國 Plextronics 公司，以及美國 Solarmer 公司等，皆對高分子太陽能電池的研究投注許多心力，也對於其發展貢獻良多。除此之外，也有以開發或銷售高分子電池中部分材料或基材為主要業務的公司，如以導電高分子溶液 PEDOT:PSS 為主要商品的 H.C. Stark 公司、以基板為主要商品的 DuPont Teijin Films，以及以合成有機材料為主要業務的 Lumtec 公司等。

最後，在專利布局方面，適用於高分子太陽能電池的異質混摻關鍵技術都已經申請了美國以及日本的專利且通過。因此在這些地區若想借由商業活動獲利顯得比較困難，不過這些專利在兩、三年後已屆滿二十年大限，並且歐洲目前並未被此些專利限制，在產業上較為自由。除此之外，對於目前表現最佳的 P3HT:PCBM 系統中材料的組成比例方面並沒有專利上的限制；而對於其他製程改良方面的專利 (solvent or thermal annealing) 則因在製作完產品後原告難以在法庭上證明其是否真利用該專利內容，因此顯得束縛力較低。因此目前在歐洲市場有機會以此 P3HT:PCBM 為基礎製造出可望獲利的

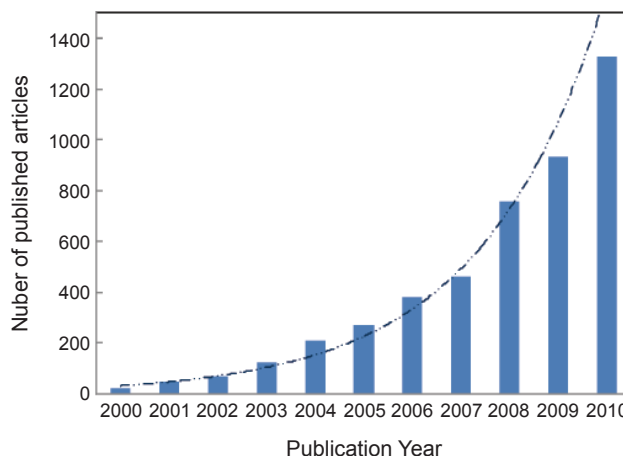


圖 16. 近十年高分子太陽能電池 (polymer solar cells) 的文獻發表數統計。

產品：以相對小的資本投資便宜的設備，且不需要給付專利費用以及維持專利等開銷。公司能否在眾多競爭者環伺中的市場中脫穎而出，端看其產品的成本／效率的表現是否夠佳。

誌謝

感謝國科會 (NSC 101-3113-E-002-010、NSC 100-2923-E-002-005-MY3) 對於此研究所提供的財務支援。

參考文獻

1. J. Perlin, *From Space to Earth—The Story of Solar Electricity*, AATEC Publications, Ann Arbor, Michigan (1999).
2. S. Sun, Z. Fan, Y. Wang, and J. Haliburton, *Journal of Materials Science*, **40**, 1429 (2005).
3. C. D. M. Fuller and C. S. Pearson, *J Appl. Phys.*, **25** (1954).
4. H. Katagiri, K. Jimbo, W. S. Maw, K. Oishi, M. Yamazaki, H. Araki, and A. Takeuchi, *Thin Solid Films*, **517**, 2455 (2009).
5. Q. Guo, G. M. Ford, W.-C. Yang, B. C. Walker, E. A. Stach, H. W. Hillhouse, and R. Agrawal, *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 17384 (2010).
6. F. C. Krebs, *Polymer Photovoltaics: A Practical Approach*, SPIE Press (2008).
7. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, "Solar cell efficiency tables (version 36)," *Progress in Photovoltaics*, **18**, 346 (2010).
8. G. Conibeer, *Materials Today*, **10**, 42 (2007).
9. C. W. Tang, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 183 (1986).

10. "Best Research-Cell Efficiencies", National Renewable Energy Laboratory (NREL).
11. I. Chung, B. Lee, J. He, R. P. H. Chang, and M. G. Kanatzidis, *Nat.*, **485**, 486 (2012).
12. K. W. Wong, H. L. Yip, Y. Luo, K. Y. Wong, W. M. Lau et al., *App. Phys. Lett.*, **80**, 2788 (2002).
13. M. P. de Jong, L. J. van IJendoorn, and M. J. A. de Voigt, *App. Phys. Lett.*, **77**, 2255 (2000).
14. C. H. Woo, B. C. Thompson, B. J. Kim, M. F. Toney, and J. M. J. Frechet, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 16324 (2008).
15. Y. Yuan, T. J. Reece, P. Sharma, S. Poddar, S. Ducharme, A. Gruverman, Y. Yang, J. Huang, *Nature Materials*, **10**, 296 (2011).
16. G. Li, C.-W. Chu, V. Shrotriya, J. Huang, and Y. Yang, *App. Phys. Lett.*, **88**, 253503 (2006).
17. M.-Y. Lin, C.-Y. Lee, S.-C. Shiu, I.-J. Wang, J.-Y. Sun, W.-H. Wu, Y.-H. Lin, J.-S. Huang, and C.-F. Lin, *Org. Electron*, **11**, 1828 (2010).
18. J.-S. Huang, C.-Y. Chou, and C.-F. Lin, *IEEE Electr. Dev. Lett.*, **31**, 332 (2010).
19. P.-C. Yang, J.-Y. Sun, S.-Y. Ma, Y.-M. Shen, Y.-H. Lin, C.-P. Chen, and C.-F. Lin, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **98**, 351 (2012).
20. H.-H. Liao, L.-M. Chen, Z. Xu, G. Li, and Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 173303 (2008).
21. Z. Xu, L. M. Chen, G. Yang, C. H. Huang, J. Hou, Y. Wu, G. Li, C. S. Hsu, and Y. Yang, *Solar Cells Adv. Funct. Mater.*, **19**, 1227 (2009).
22. C. Waldauf, M. Morana, P. Denk, P. Schilinsky, K. Coakley, S. A. Choulis, and C. J. Brabec, *Applied Physics Letters*, **89**, 233517 (2006).
23. Y. J. Cheng, F. Y. Cao, W. C. Lin, C. H. Chen, and C. H. Hsieh, *Chem. Mater.*, **23**, 1512 (2011).
24. H.-L. Yip, S. K. Hau, N. S. Baek, H. Ma, and A. K.-Y. Jen, *Adv. Mater.*, **20**, 2376 (2008).
25. F. C. Krebs, S. A. Gevorgyan, and J. Alstrup, *J. Mater. Chem.*, **19**, 5442 (2009).
26. M. S. White, D. C. Olson, S. E. Shaheen, N. Kopidakis, and D. S. Ginley, *Applied Physics Letters*, **89**, 143517 (2006).
27. J.-S. Huang, C.-Y. Chou, M.-Y. Liu, K.-H. Tsai, W.-H. Lin, and C.-F. Lin, *Organic Electronics*, **10**, 1060 (2009).
28. A. Pupioviskis, J. Kacens, and O. Neilands, *Tetrahedron Letters*, **38**, 285 (1997).
29. D. W. Laird, R. Stegamat, M. Daadi, H. Richter, V. Vejins, L. Scott, and T. A. Lada, "Organic photovoltaic devices comprising fullerenes and derivatives thereof," US Patent Application Publication No. US 2010/0132782 A1, June 3 (2010).
30. Y.-H. Lin, P.-C. Yang, J.-S. Huang, G.-D. Huang, I.-J. Wang, W.-H. Wu, M.-Y. Lin, W.-F. Su, and C.-F. Lin, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 2511 (2011).
31. Y. He, H.-Y. Chen, J. Hou, and Y. Li, *J. Am. Chem. Soc.*, **132** (4), 1377 (2010).
32. G. Zhao, Y. He, and Y. Li, *Adv. Mater.*, **22**, 4355 (2010).
33. Y.-J. Cheng, C.-H. Hsieh, Y. He, C.-S. Hsu, and Y. Li, *J. Am. Chem. Soc.*, **132** 17381 (2010).
34. C.-Y. Chang, C.-E. Wu, S.-Y. Chen, C. Cui, Y.-J. Cheng, C.-S. Hsu, Y.-L. Wang, and Y. Li, *Angew Chem Int Ed Engl.*, 509386 (2011).
35. L. Dou, J. You, J. Yang, C.-C. Chen, Y. He, S. Murase, T. Moriarty, K. Emery, G. Li, and Y. Yang, *Nature Photonics*, **6** (2012).
36. Y. Sun, J. H. Seo, C. J. Takacs, J. Seifert, and A. J. Heeger, *Adv. Mater.*, **23**, 1679 (2011).
37. T.-Y. Chu, S.-W. Tsang, J. Zhou, P. G. Verly, J. Lu, S. Beaupre, M. Leclerc, and Y. Tao, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **96**, 155 (2012).
38. C. E. Small, S. Chen, J. Subbiah, C. M. Amb, S.-W. Tsang, T.-H. Lai, J. R. Reynolds, and F. So, *Nature Photonics*, **6**, 115 (2011).
39. Z. Tan, W. Zhang, Z. Zhang, D. Qian, Y. Huang, J. Hou, and Y. Li, *Adv. Mater.*, **24**, 1476 (2012).
40. X. Li, W. C. H. Choy, L. Huo, F. Xie, W. E. I. Sha, B. Ding, X. Guo, Y. Li, J. Hou, J. You, and Y. Yang, *Adv. Mater.*, **24**, 3046 (2012).
41. N. S. Sariciftci, D. Braun, and C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 585 (1993).
42. G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, and A. J. Heeger, *Science*, **270**, 1789 (1995).
43. P. Schilinsky, C. Waldauf, and C. J. Brabec, *Applied Physics Letters*, **81**, 3885 (2002).
44. G. Li, Y. Yao, H. Yang, V. Shrotriya, G. Yang, and Y. Yang, *Adv. Func. Mater.*, **17**, 1636 (2007).
45. V. D. Mihailetschi, H. Xie, B. de Boer, L. M. Popescu, J. C. Hummelen, and P. W. M. Blom, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 012107 (2006).
46. L. Dou, J. Gao, E. Richard, J. You, C.-C. Chen, K. C. Cha, Y. He, G. Li, and Y. Yang, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 10071 (2012).
47. X. Li, W. C. H. Choy, L. Huo, F. Xie, W. E. I. Sha, B. Ding, X. Guo, Y. Li, J. Hou, J. You, and Y. Yang, *Adv. Mater.*, **24**, 3046 (2012).
48. J. You, X. Li, F.-X. Xie, W. E. I. Sha, J. H. W. Kwong, G. Li, W. C. H. Choy, and Y. Yang, *Advanced Energy Materials*, **2** (10), 1203 (2012).
49. L. Dou, J. You, J. Yang, C.-C. Chen, Y. He, S. Murase, T. Moriarty, K. Emery, G. Li, and Y. Yang, *Nature Photonics*, **6**, 180 (2012).
50. F. C. Krebs, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **93**, 465 (2009).
51. F. C. Krebs, J. Fyenbo, and M. Jorgensen, *Journal of Materials Chemistry*, **20**, 8994 (2010).
52. Y. Zhou, *Science*, **336**, 327 (2012).



藍翔先生為國立台灣大學光電工程研究所碩士班學生。

Shiang Lan is currently a M.S. student in the Institute of Photonics and Optoelectronics at National Taiwan

University.



林上弘先生為國立台灣大學光電工程研究所碩士班學生。

Shang-Hong Lin is currently a M.S. student in the Institute of Photonics and Optoelectronics at National Taiwan

University.



林清富先生為美國康乃爾大學電機博士，現任國立台灣大學光電所所長和光電創新研究中心主任，以及光電所、電子所和電機系之合聘教授。

Ching-Fuh Lin received his Ph.D. in

electrical engineering from Cornell University, USA.

He is currently the Director of Innovative Photonics

Advanced Research Center (i-PARC), the Chairman of

Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics and

a joint professor in the Graduate Institute of Photonics

and Optoelectronics, Graduate Institute of Electronics

Engineering, and Department of Electrical Engineering at

National Taiwan University.