

國立交通大學
National Chiao Tung University

出國報告（出國類別：出國短期研究）

結合形態工程、界面工程及光學工程
達到高效能串疊型高分子太陽能電池(1)

服務機關：應用化學系

姓名職稱：張志宇 博士後研究

前往國家：美國 西雅圖 華盛頓大學材料所

出國期間：2012/08/30~2012/12/31

報告日期：2013/07/05

摘要

太陽能源技術已被認為是最適合發展之替代能源技術之一，而高分子太陽能電池因其潛在優點如成本低廉、製程簡便、易於大面積化、具撓曲性等，是未來太陽能技術發展之趨勢。欲成為實用替代能源，高分子太陽能電池必須具備足夠光轉化效率，而其中的關鍵因素為調控元件之界面及光學特性。本次短期研究前往美國西雅圖華盛頓大學材料系 Dr. Alex K-Y. Jen 實驗室進行為期約八個月的學術交流，研究目標為結合形態工程、界面工程及光學工程實現高效能串疊型高分子太陽能電池。Dr. Alex K-Y. Jen 的研究團隊在有機電子之材料開發及光電元件應用是世界知名的先驅，研究成果斐然。藉由此次實質的學術交流與合作機制，不僅可提升研究水平達到雙贏局面，也可以開拓跨領域、跨文化的國際視野。

本研究內容包括：(1)實現高效能之低能隙高分子太陽能電池；(2)應用低能隙高分子於半透明太陽能電池以及(3)開發有效之中間連接層以實現高效能串疊型太陽能電池。藉由結合形態工程、界面工程以及光學工程，我們已成功開發高效能之低能隙高分子太陽能電池，元件效率為 6.6%，為目前該系列材料 (cyclopenta[2,1-b;3,4-b']dithiophene, CPDT) 之最高紀錄值。此外，我們也成功開發高效率之半透明高分子太陽能電池，元件之光學平均穿透度為 47.3%，元件效率為 5.0%，為目前相近穿透度之半透明太陽能電池的最高紀錄值。後續研究工作將著重於開發中間連接層，並結合現有之成果，以實現高效能串疊型太陽能電池。

目次

一、目的.....	4
二、過程.....	5
三、心得及建議.....	10

本文

一、目的

隨著非再生能源的漸漸枯竭，以及使用非再生能源所產生環境破壞問題的日趨嚴重，再生能源的開發已成為人類共同的當務之急，世界各國極力發展的各項替代能源包括有太陽能、風能、氫能、地熱能等。我國屬海島型國家，天然資源本已匱乏，目前能源需求有 95% 以上仰賴國外進口，因此在非再生能源緊縮之情況下，所受衝擊將遠大於資源豐饒之工業大國，也因此發展有效的替代能源，將是我國永續生存的唯一選擇。在潛在的替代能源選擇中，尤以太陽能適合我國發展，因台灣地處亞熱帶地區，日照充沛，太陽能之供給不虞匱乏。就市場經濟面來看，近年來世界太陽能市場銷售總額年成長率皆達 30% 以上。目前市面上所生產的太陽電池以無機矽半導體為主，III-V 族、II-VI 族等材料為輔。此類矽基太陽電池雖已商業化，但其價格在美金 \$ 5/瓦上下，遠不符經濟效益。根據能源工業界估計，太陽電池若欲取代現有供電機制，其價格必須在美金 \$ 1/瓦以下。無機半導體太陽電池之製程已漸趨固定，成本已難再降低。因此找尋一低成本、製程簡易的材料是目前太陽電池的發展關鍵。

高分子太陽能電池具備成本低廉、製程簡易、輕薄、可大面積製備、可撓曲及應用性廣等優點，近來廣被各界重視並投入研究。然而，高分子太陽能電池距離實際商業化仍然有許多技術上的難題亟待克服，其中一關鍵因素為元件之光電轉換效率仍有待改善。提升元件光電轉換效率的方法主要有下列三項：(1)將兩個不同光譜響應的高分子太陽能電池結合形成串疊型太陽能電池，增加太陽光譜中的波長利用率；(2)導入分子修飾層於有機半導體及電極之界面，改善界面缺陷以及功函數不匹配之問題，進而提升載子之收集；(3)藉由光學工程(如:調控材料之光學特性)使入射光侷限在元件內部中，增加光路長度(optical path length)，提升光子吸收機率。目前串疊型太陽能電池之光電轉換效率達 10.7%，為現有高分子太陽能電池之光電轉換效率最高記錄。

藉由導入界面修飾層及調控材料之光學特性於串疊型太陽能電池可望能大幅提升光電轉換效率，但目前卻只有極少的文獻有相關之報導。

本實驗室在過去三年的主要研究成果包含開發: (1)可交聯之碳六十衍生物做為高分子太陽能電池之陰極界面修飾層; (2)一系列多環融合結構之低能隙高分子半導體; (3)串疊型高分子太陽能電池元件。此次出國將前往美國西雅圖大學材料系 Dr. Alex K-Y. Jen 實驗室進行為期約八個月的短期研究，目的為結合形態工程、界面工程以及光學工程實現高效能串疊型高分子太陽能電池元件。Dr. Alex K-Y. Jen 的研究團隊在太陽能電池之材料開發、界面及光學調控及元件結構設計是世界知名的先驅，研究人員素質高且經費充足，素負盛名於國際，此次的短期交流預期將有助於提升雙方的研究水平(包括材料及元件之開發)。

二、過程

本次短期研究期間從 2012/09/01 至 2013/05/15，為期約八個月。實驗室的元件製備及量測設備基本上與台灣所使用的差異不大，因此我在第二個星期即完成儀器使用的訓練課程。華盛頓大學材料系的研究人員多是來自中國的交換學生或博士後研究員，來自台灣的相對少很多。值得一提的是，實驗室會安排每兩週一次的集體會報，在會報中 Dr. Alex K-Y. Jen 會針對每個人的投影片提問並給予實質的建議，且會針對特定題目要求在限定期限前完成工作。藉由集體會報的機會，不僅可以使我更瞭解其他人的工作內容、提供參與討論的機會外，更讓我理解從事研究工作必需更有效率的利用時間才能有好的成果發表。除此之外，系上也會在每週安排專題演講，藉由聆聽不同領域的演講使我能多方面的學習跨領域的知識。

我的研究主題為結合形態工程、界面工程以及光學工程實現高效能串疊型高分子太陽能電池，研究內容包括: (1)實現高效能之低能隙高分子太陽能電池; (2)應用低能隙高分子於半透明太陽能電池以及(3)開發適合的中間連

接層以實現高效能串疊型太陽能電池。在過去幾年當中，我們實驗室以及 Dr. Alex K-Y. Jen 實驗室已成功開發許多具有潛力的低能隙高分子，成果已發表在許多國際知名期刊。在眾多材料中，poly[2,6-(4,4-bis(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta[2,1-b;3,4-b']dithiophene)-alt-4,7-(5-fluoro-2,1,3-benzothiadiazole)] (PCPDTFBT; 結構如 Figure 1a) 具備低能隙(1.34 eV)、高效率、高載子遷移率($1.4 \times 10^2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)以及高度環境穩定性等優點，相當適合應用於串疊型高分子太陽能電池。研究結果顯示，藉由結合形態工程、界面工程以及光學工程，我們已成功開發高效能之低能隙高分子太陽能電池(元件結構如 Figure 1b)，元件效率達 6.6%(表一)，為目前該系列材料(cyclopenta[2,1-b;3,4-b']dithiophene, CPDT)之最高紀錄值。此部分的主要研究貢獻整理如下：(1)形態工程:相對於 ortholorobenzene(ODCB)，選擇較高沸點的溶劑 trichlorobenzene(TCB)可得到近似纖維狀的高分子形態(Figure 2)，可促進分子之規則排列(Figure 3)，有利於載子的傳遞(Table 1); (2)界面工程:引入單層碳六十自組裝修飾層可減少氧化鋅的表面缺陷，增加元件之整流比(Figure 4)，促進載子之收集; (3)光學工程:利用反式結構可增加光學利用率，增加光電流的產生(Table 1)。

此外，我們也成功開發高效率之半透明高分子太陽能電池(元件結構如 Figure 1c)，元件之平均光學穿透度(average visible transmittance, AVT)為 47.3%(Figure 5)，元件效率為 5.0%(Table 2)，為目前相似穿透度之半透明太陽能電池的最高紀錄值。此部分的主要研究貢獻整理如下：(1)引入高表面能之 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)(PEDOT:PSS)層有利於沉積的銀原子形成連續性薄膜(Figure 6)，使超薄銀電極可同時具備高穿透度及高導電度(Figure 7 及 Table 3); (2)我們所開發的半透明太陽能電池具備高度演色性指標(98.9%，Figure 8)，未來應用於太陽能發電窗戶極具潛力。後續研究工作將著重於開發中間連接層，並結合現有之成果，以實現高效能串疊型太陽能電池(元件結構如 Figure 1d)。

此次的短期交流將有助於開發新穎性之高分子太陽能電池(包括:半透明

電池及串疊型電池)及高效能之低能隙材料，不僅可以提升雙方的研究水平，亦可以開拓跨領域、跨文化的國際視野。

Table 1. Summary of the photovoltaic device parameters for the single-junction devices.

Device	Conditions ^[a]	V_{oc} [Volt]	J_{sc} [mA cm ⁻²]	FF [%]	PCE [%]	μ_h [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹]	μ_e [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹]
A	Conventional, ODCB	0.74	12.35	54.19	5.0	3.1×10^{-4}	2.2×10^{-3}
B	Conventional, TCB	0.74	13.43	58.05	5.8	2.6×10^{-3}	1.5×10^{-3}
C	Inverted, TCB	0.75	13.70	57.79	6.0	-	-
D	Inverted, TCB ^[b]	0.74	14.24	61.68	6.6	-	-

Table 2. Summary of the photovoltaic device parameters for the semitransparent cells.

Device	Ag thickness [nm]	V_{oc} [Volt]	J_{sc} [mA cm ⁻²]	FF [%]	PCE [%]	AVT [%]
E	15	0.73	11.90	58.34	5.1	39.4
F	10	0.74	11.39	58.56	5.0	47.3

Table 3. Sheet resistance of 10-nm Ag films coated samples with and without PEDOT:PSS seed layer.

Condition	Sheet resistance [Ω /sq]
Without PEDOT:PSS	Overflow
With PEDOT:PSS	1.57

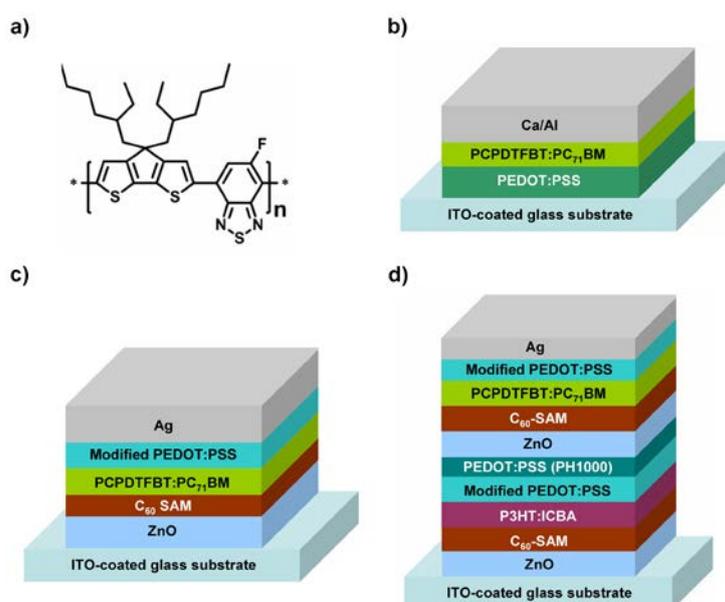


Figure 1. (a) Chemical structure of PCPDTFBT. Schematic representation of the device architecture used in this study: (b) conventional single-junction solar cell, (c) inverted single-junction solar cell and (d) double-junction tandem solar cell.

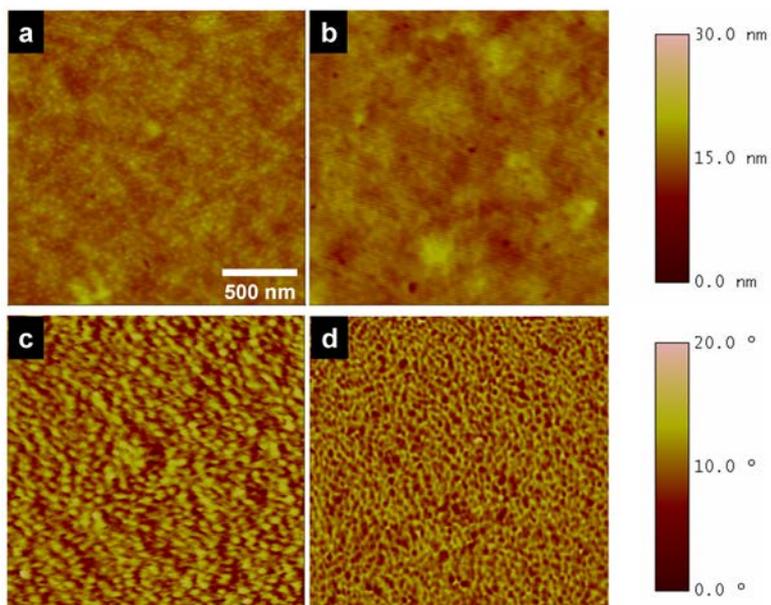


Figure 2. AFM topography (top) and phase (bottom) images of PCPDTFBT:PC₇₁BM films cast from ODCB (a, c) and TCB (b, d). The rms roughness of ODCB- and TCB-cast films is 1.16 nm and 2.28 nm, respectively. The scan size is 2 μm \times 2 μm .

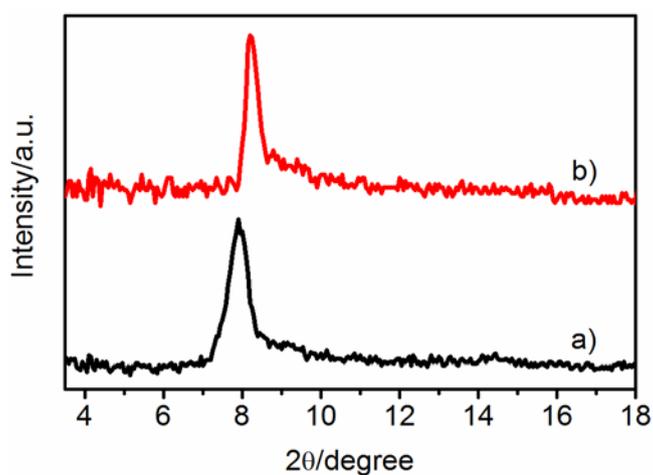


Figure 3. XRD patterns of PCPDTFBT films cast from: (a) ODCB and (b) TCB.

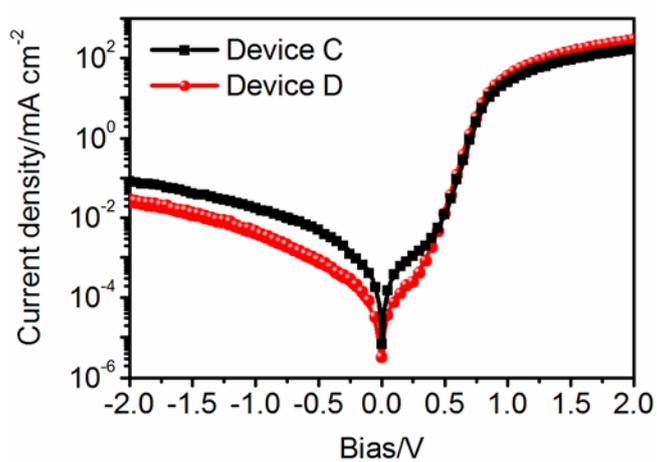


Figure 4. Dark J - V characteristics of the as-fabricated devices (see Table 1 for descriptions of the device types).

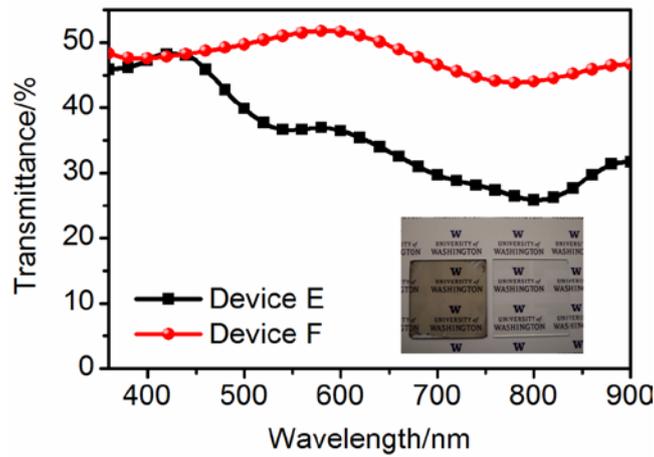


Figure 5. Optical transmittance of the as-fabricated devices (see Table 2 for descriptions of the device types). The inset shows a photograph of Device F and a bare ITO-coated glass.

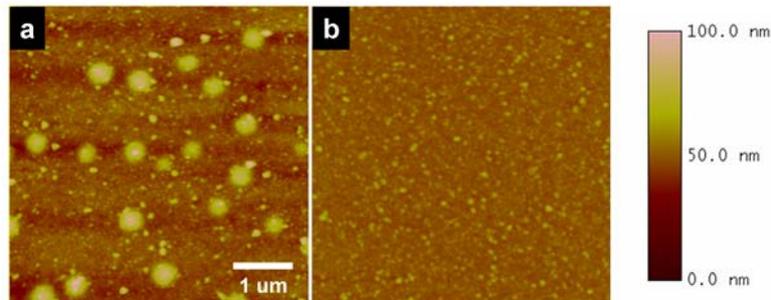


Figure 6. AFM topography images of 10-nm Ag coated samples: (a) without PEDOT:PSS seed layer (rms roughness = 8.54 nm) and (b) with PEDOT:PSS seed layer (rms roughness = 3.08 nm). The scan size is $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$.

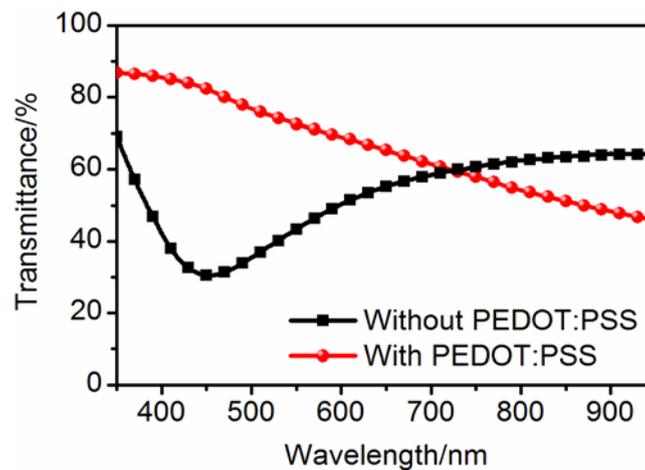


Figure 7. Optical transmittance of 10-nm Ag coated samples with and without PEDOT:PSS seed layer.

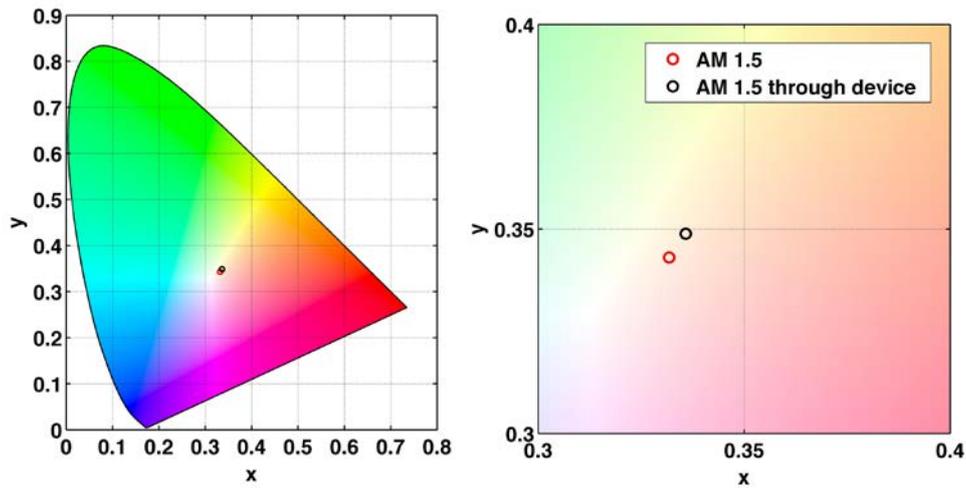


Figure 8. Color rendering index of semitransparent cell demonstrated in this study.

三、心得及建議

藉由此次短期的機會，我理解到華盛頓大學材料系的儀器及設備並不會比交大來得完善，研究人員的人數亦不比交大來得多，但仍可有相當豐碩的研究成果，其原因來自於這邊著重於新穎之突破性研究主題，並鼓勵跨領域之合作及交流，且能藉由每次的集體會報給予實質、有效率的建議。我認為應可保持與該單位之合作關係進行相關研究，並持續進行知識、人員的交流與互訪。除此之外，出國訪問研究對於開拓知識見聞大有裨益，學校應該鼓勵研究人員遠行取經，此對研究人員的助益將為遠大，希望能考慮擴大出國進修的補助辦法及經費分配比例。