

國立臺灣師範大學跨域科技產業創新研究學院

綠能科技與永續治理研究所

碩士論文

Graduate Institute of Green Energy and Sustainable Technology

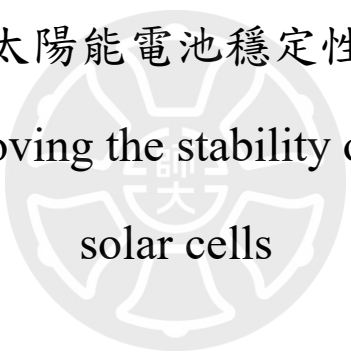
College of Interdisciplinary Industry-Academia Innovation

National Taiwan Normal University

Master's Thesis

反式有機太陽能電池穩定性改善研究

Research on improving the stability of inverted organic  
solar cells



林晏禎

LIN, Yen-Chen

指導教授：趙宇強 博士

Advisor : Chao, Yu-Chiang, Ph.D.

中華民國 114 年 6 月

June 2025



## 誌謝

踏入職場多年後，我再次回到學校進修碩士班。由於學院是跨領域學習，碩一初期我曾面臨許多適應上的困難。幸運的是，我後來進入趙宇強教授的光電材料實驗室，並因此有機會與陽明交通大學孟心飛教授的有機半導體實驗室學生一起進行研究。衷心感謝趙老師與孟老師這兩年來在實驗上的悉心指導，以及在研究上提供的專業知識與實驗設計建議。

這兩年實驗室生涯中，最要感謝的是我的實驗夥伴育卉。我們從基板蝕刻到實驗設計，乃至後續的數據分析，都一同努力完成。過程中，我們偶爾會有不同的想法，但最終都能順利克服並達成目標。感謝育卉這兩年來的互相扶持，讓我們彼此共同成長。

我也要感謝許多在實驗室中幫助過我的人：感謝師大學姐珮瑄及學長家翔在光材實驗室教導我儀器操作；感謝交大學姐俞蓉，從機台操作到實驗實作，都給予我許多寶貴的建議與指導，使我能快速上手並進入研究狀態，衷心期盼她未來在職場上能順利找到理想的工作；感謝淳謙仔細地教導我材料實驗原理；感謝學長正宇、俊珽、碩澤教導我儀器操作；也感謝碩二的夥伴們，在這兩年實驗中互相幫助；以及碩一學妹采融協助幫忙元件壽命的量測。

最後，也是最重要的，我要感謝我的家人。感謝他們支持我重返校園，這兩年來的生活開銷都由他們承擔，讓我能毫無後顧之憂地完成學業。沒有你們的支持，我絕對無法走到今天。我相信，我們的未來生活一定會更加美好。

## 摘要

本論文研究聚焦於提升反式有機太陽能電池對紫外光的穩定性，透過溶膠凝膠法(Sol-gel process)製備氧化鋅(ZnO)電子傳輸層上構建在雙層鈰化層，有效減少界面缺陷，進而提升元件對紫外光的穩定性。

研究中，第四章第一小節首先探討單層鈰化層 C<sub>60</sub> 的厚度及活性層中 CN 添加量對元件性能的影響，確立最佳的單層鈰化層製程參數。接著，第二小節研究比較不同溶劑氯苯(CB)、鄰二氯苯(ODCB)對雙層 C<sub>60</sub> 鈰化層性能的影響，發現使用鄰二氯苯(ODCB)溶劑製備的雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 元件，在經過 504 小時紫外光照射後，性能衰減較少，表現出最佳的穩定性。進一步地，研究比較雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 與雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 與 PCBM 在提升元件紫外光照穩定性方面的效果。實驗結果顯示，雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 雖然初始效率較高，但雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 與 PCBM 在長期紫外光照射下表現出更優異的穩定性。最後，第三小節研究探討雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 和 PCBM 的製程優化，包括 PCBM 濃度對元件性能的影響。

關鍵詞：反式有機太陽能電池、雙層鈰化層、紫外光穩定性

## Abstract

This research focuses on improving the stability of inverted organic solar cells by constructing a double-layer passivation layer on a zinc oxide (ZnO) electron transport layer prepared by a sol-gel process. This effectively reduces interface defects and thus improves the UV light stability of the device.

In the first section of Chapter 4, we initially explored how the thickness of the single-layer C<sub>60</sub> passivation layer and the concentration of CN additive in the active layer impacted device performance, allowing us to determine the optimal process parameters for the single-layer passivation. Following this, the second section investigated and compared how different solvents — chlorobenzene (CB) and ortho-dichlorobenzene (ODCB) — affected the performance of double-layer C<sub>60</sub> passivation layers. We discovered that devices prepared with a double-layer C<sub>60</sub> passivation layer using the ortho-dichlorobenzene (ODCB) solvent showed less performance degradation after 504 hours of UV irradiation, demonstrating superior stability. Furthermore, we compared the effectiveness of a double-layer C<sub>60</sub> passivation layer with a double-layer C<sub>60</sub> and PCBM passivation layer in improving device stability under UV light exposure. Experimental results revealed that while the double-layer C<sub>60</sub> passivation had higher initial efficiency, the double-layer C<sub>60</sub> and PCBM passivation exhibited more excellent stability during prolonged UV irradiation. Finally, the third section focused on optimizing the manufacturing process for the double-layer C<sub>60</sub> and PCBM passivation layer, including studying the influence of PCBM concentration on device performance.

Keywords: inverted organic solar cells, Double-layer passivation layer, UV light stability

# 目次

誌謝.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目次.....	iv
表次.....	vi
圖次.....	vii
<b>第一章、緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 前言.....	1
1.1.2 有機太陽能電池的結構發展.....	2
1.1.3 有機太陽能電池的優勢.....	5
1.2 文獻回顧.....	7
1.3 研究動機.....	9
1.4 論文架構.....	10
<b>第二章、實驗原理.....</b>	<b>11</b>
2.1 有機太陽能電池原理.....	11
2.1.1 有機半導體能帶理論 <sup>8</sup> .....	11
2.1.2 理想與實際太陽能電池等效電路.....	12
2.1.3 有機太陽能電池重要參數.....	14
2.2 高分子有機太陽能電池的材料特性.....	17
2.3 本論文使用之材料與結構介紹.....	17
2.3.1 陰極電極.....	18
2.3.2 電子傳輸層.....	18
2.3.3 鈍化層.....	19
2.3.4 活性層與活性層添加物.....	20
2.3.5 電洞傳輸層.....	23
2.3.6 陽極電極.....	23

2.4 本論文所使用反式有機太陽能電池結構與能帶圖.....	24
<b>第三章、實驗方法與流程.....</b>	<b>26</b>
3.1 有機太陽能電池之元件製作流程.....	26
3.2 ITO 基板蝕刻流程.....	27
3.3 ITO 基板清洗與 UV 照射.....	30
3.4 材料溶液配置.....	30
3.5 旋轉塗佈製程.....	31
3.5.1 反式結構元件旋轉塗佈順序.....	32
3.6 電洞傳輸層/金屬陽極電極蒸鍍.....	33
3.7 元件封裝.....	33
3.8 元件量測.....	34
3.9 元件紫外光照穩定性量測.....	34
3.10 元件製程參數.....	35
<b>第四章、實驗結果與討論.....</b>	<b>38</b>
4.1 反式有機太陽能電池單層鈰化層 C <sub>60</sub> 結構參數制定.....	38
4.1.1 單層鈰化層 C <sub>60</sub> 厚度影響.....	38
4.1.2 活性層添加不同 CN 濃度影響.....	41
4.2 反式有機太陽能電池雙層鈰化層元件之紫外光穩定性改善研究.....	43
4.2.1 雙層鈰化層 C <sub>60</sub> 添加不同溶劑的穩定性研究.....	44
4.2.2 雙層鈰化層 C <sub>60</sub> 、雙層鈰化層 C <sub>60</sub> 與 PCBM 的穩定性比較研究.....	48
4.3 反式有機太陽能電池雙層鈰化層 C <sub>60</sub> 與 PCBM 優化製程改善.....	51
4.3.1 鈰化層 PCBM 濃度影響.....	51
<b>第五章、結論與未來展望.....</b>	<b>54</b>
<b>參考文獻.....</b>	<b>55</b>

## 表次

表 1-1 太陽能電池各種結構的元件特性 <sup>1</sup> .....	2
表 3-1 單層鈍化層 C <sub>60</sub> 厚度參數表.....	35
表 3-2 活性層 CN 濃度參數表.....	35
表 3-3 雙層鈍化層 C <sub>60</sub> 添加不同溶劑參數表.....	36
表 3-4 雙層鈍化層 C <sub>60</sub> 、雙層鈍化層 C <sub>60</sub> 與 PCBM 參數表.....	36
表 3-5 雙層鈍化層 C <sub>60</sub> 與 PCBM 濃度參數表.....	37
表 4-1 單層鈍化層 C <sub>60</sub> 不同厚度元件初始效率.....	39
表 4-2 單層鈍化層 C <sub>60</sub> 不同厚度元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化.....	40
表 4-3 活性層添加不同 CN 濃度初始效率.....	42
表 4-4 活性層添加不同 CN 濃度元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化.....	43
表 4-5 C <sub>60</sub> 在常見溶劑中之溶解度.....	40
表 4-6 不同溶劑之 C <sub>60</sub> 溶液元件初始效率.....	43
表 4-7 不同溶劑之 C <sub>60</sub> 溶液元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化.....	49
表 4-8 不同的雙層鈍化層溶液元件初始效率.....	49
表 4-9 不同的雙層鈍化層溶液元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化.....	50
表 4-10 PCBM 濃度 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 之元件初始效率.....	52
表 4-11 PCBM 濃度 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 元件隨時間在紫外光照射下之特性變化.....	53

## 圖次

圖 1- 1 有機太陽能電池四種結構 <sup>1</sup> .....	2
圖 1- 2 活性層材料(a)活性層常使用的施體和受體材料化學結構(b)活性層常使用 溶劑的化學結構 <sup>2</sup> .....	3
圖 1- 3 BHJ OPV 結構(A)正式結構(B)反式結構 <sup>3</sup> .....	4
圖 1- 4 有機太陽能電池正式與反式結構 PCE 比較 <sup>4</sup> .....	4
圖 1- 5 半透明太陽能電池應用在農業溫室頂棚示意圖 <sup>5</sup> .....	6
圖 1- 6 目前和長期的矽晶、CdTe 和 OPV 模組的碳排放量 <sup>6</sup> .....	6
圖 1- 7 C <sub>60</sub> (OH) <sub>16</sub> / C <sub>60</sub> 的元件架構示意圖 <sup>7</sup> .....	7
圖 1- 8 反式 OSC 的元件架構和活性層材料 PM6 和 Y6 結構 <sup>8</sup> .....	8
圖 1- 9 ZnO 和 ZnO / C <sub>60</sub> (OH) <sub>x</sub> 元件在氮氣箱以 AM 1.5G 模擬太陽光照射歸一 化 PCE <sup>8</sup> .....	9
圖 2- 1 太陽能電池含有電阻負載電力的概念示意圖 <sup>9</sup> .....	11
圖 2- 2 OSC 結構和能帶示意圖 <sup>9</sup> .....	12
圖 2- 3 理想太陽能電池等效電路 <sup>16</sup> .....	13
圖 2- 4 實際太陽能電池等效電路 <sup>16</sup> .....	14
圖 2- 5 太陽能電池重要參數圖 <sup>10</sup> .....	14
圖 2- 6 太陽能電池功率示意圖 <sup>4</sup> .....	16
圖 2- 7 醋酸鋅分子結構圖.....	18
圖 2- 8 C <sub>60</sub> 分子結構圖.....	19
圖 2- 9 PCBM 分子結構圖.....	20
圖 2- 10 PM6 與 Y6 吸收可見光光譜能力及能階示意圖 <sup>11</sup> .....	21
圖 2- 11 PBDB-T-2F (PM6)分子結構圖 <sup>13</sup> .....	21
圖 2- 12 BTP-4F(Y6)分子結構圖 <sup>13</sup> .....	22
圖 2- 13 CN 分子結構圖 <sup>15</sup> .....	23

圖 2- 14 ITO/ZnO /C <sub>60</sub> /PM6:Y6/MoO <sub>3</sub> /Ag 能帶圖.....	24
圖 2- 15 ITO/ZnO/C <sub>60</sub> /C <sub>60</sub> /PM6:Y6/MoO <sub>3</sub> /Ag 能帶圖.....	24
圖 2- 16 ITO/ZnO/PCBM/C <sub>60</sub> /PM6:Y6/MoO <sub>3</sub> /Ag 能帶圖.....	25
圖 3- 1 有機太陽能電池之元件製作流程圖.....	26
圖 3- 2 ITO 基板蝕刻後之圖型.....	30
圖 3- 3 旋轉塗佈製程示意圖.....	31
圖 3- 4 活性層擦邊邊界示意圖(藍色區域).....	32
圖 3- 5 (a)單層鈍化層反式結構(b)雙層鈍化層反式結構塗佈順序示意圖.....	32
圖 3- 6 蒸鍍遮罩與元件蒸鍍後示意圖.....	33
圖 3- 7 封裝元件示意圖.....	33
圖 3- 8 元件之有效面積示意圖.....	34
圖 3- 9 紫外光燈箱穩定性量測示意圖.....	34
圖 4- 1 反式有機太陽能電池單層鈍化層 C <sub>60</sub> 側面圖.....	38
圖 4- 2 單層鈍化層 C <sub>60</sub> 不同厚度元件 I-V 圖.....	39
圖 4- 3 單層鈍化層 C <sub>60</sub> 不同厚度元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現.....	40
圖 4- 4 活性層添加不同 CN 濃度 I-V 圖.....	41
圖 4- 5 活性層添加不同 CN 濃度元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現.....	42
圖 4- 6 反式有機太陽能電池雙層鈍化層 C <sub>60</sub> 側面圖.....	44
圖 4- 7 不同溶劑之 C <sub>60</sub> 溶液 SEM 圖(a)C <sub>60</sub> (CB)溶液(b)C <sub>60</sub> (ODCB)溶液.....	45
圖 4- 8 不同溶劑之 C <sub>60</sub> 溶液元件 I-V 圖.....	45
圖 4- 9 不同溶劑之 C <sub>60</sub> 溶液元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現.....	46
圖 4- 10 不同的雙層鈍化層溶液元件 I-V 圖.....	49
圖 4- 11 不同的雙層鈍化層溶液元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現.....	50
圖 4- 12 不同的雙層鈍化層溶液元件隨時間在紫外光照射之(a)短路電流、(b)開路電壓、(c)填充因子變化.....	51
圖 4- 13 PCBM 濃度 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 之元件 I-V 曲線圖.....	52

圖 4- 14 PCBM 濃度 5 mg/mL 、7.5 mg/mL 、10 mg/mL 元件之(a)效率及(b)歸一化  
效率壽命表現.....53



# 第一章、緒論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 前言

全球暖化日益嚴重，極端氣候事件頻傳，對地球生態及人類社會造成嚴峻威脅。燃燒化石燃料，尤其是煤炭等高碳排放能源，是導致氣候變遷的主要原因之一。為減緩全球暖化的衝擊，各國積極發展再生能源，並制定相關政策推動能源轉型。再生能源如風力、水力、太陽能等，因其取之不竭、低碳排放的特性，成為當前能源發展的重要方向。台灣地處亞熱帶，能源高度仰賴進口，且長期面臨電力供應不穩定的挑戰。隨著經濟發展及生活水準提升，用電需求持續增加，更凸顯能源自主及多元化的重要性。太陽能作為一種不受氣候條件嚴重影響的再生能源，在台灣能源轉型中扮演關鍵角色。相較於其他再生能源，例如易受季節及水文條件影響的水力發電，以及選址限制較多的風力發電，太陽能發電系統的建置彈性較高，可廣泛應用於建築屋頂、地面及水面等不同場域。

為因應全球氣候變遷的挑戰，並實現永續發展的目標，台灣政府積極推動「2050 淨零排放」政策，期盼在 2050 年達成淨碳排放量為零的目標。此政策不僅是台灣對國際社會的承諾，更是確保國家永續發展的重要戰略。在淨零排放的路徑中，能源部門的轉型至關重要。根據「再生能源發展條例」的規範，新建及改建的建築物應於屋頂設置太陽光電發電設備，此舉不僅能有效利用閒置空間進行發電，更能提高再生能源的普及率，加速能源結構的轉型。

太陽能發電的重要性不僅在於其環保特性，更在於其對台灣能源自主性的貢獻。透過廣泛設置太陽能發電系統，台灣可降低對進口能源的依賴，提升能源供應的穩定性及安全性。此外，太陽能產業的發展也能帶動相關產業鏈的發展，創造就業機會，促進經濟成長。

### 1.1.2 有機太陽能電池的結構發展

有機太陽能電池(Organic Solar Cells, OSC)主要有四種結構(1)單層結構(Single Layer) (2)雙層異質結構(Bilayer Heterojunction) (3)本體異質結構(Bulk Heterojunction, BHJ) (4)串聯式有機太陽能電池(Tandem OSC), 如圖 1- 1 所示。

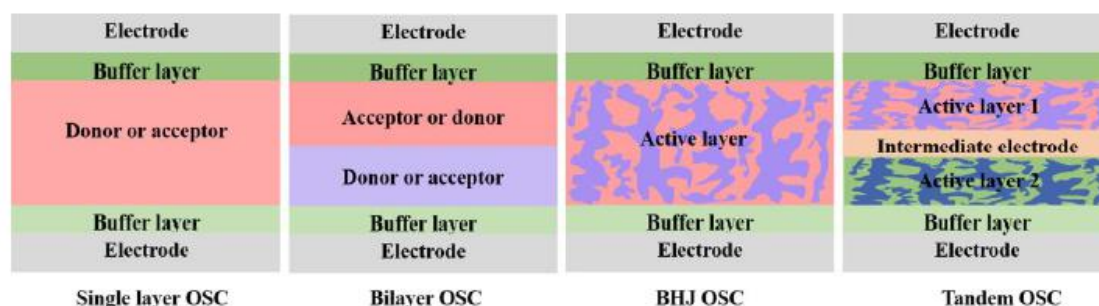


圖 1- 1 有機太陽能電池四種結構<sup>1</sup>

有機太陽能電池的發展始於 1978 年，最初採用單層結構，將單一的施體(donor)或受體(acceptor)材料夾在兩層具有不同功函數的金屬電極之間。然而，由於電子-電洞對難以有效分離，導致光電轉換效率(PCE)僅有 0.7%。

1986 年，雙層異質結構的出現是 OSC 技術的一大突破。此結構將施體和受體材料分別成層排列，夾在兩個電極之間。透過平面異質結的設計，效率提升至約 1% 左右。然而效率提升仍然有限，主要原因是激子必須在施體/受體(D/A)界面處產生才能有效分離成自由電荷，但平面異質結構在有限的界面面積中限制激子分離的效率，進而導致嚴重的電荷複合。

1995 年，本體異質結構(BHJ)的問世再次推動了 OSC 技術的發展。BHJ 結構將施體和受體材料混合形成活性層(active layer)。此共混物會產生明顯的相分離，形成大量的 D/A 界面，大幅增加了激子擴散至界面並分離成自由電荷的機會，這些電荷隨後能被電極有效地收集。相較於雙層結構，BHJ 結構的 PCE 顯著提升至 2.9%。

為了進一步突破光子吸收的限制，串聯式有機太陽能電池(Tandem OSC)應運而生。此結構由兩個或多個具有不同能隙的子電池垂直堆疊而成。每個子電池包含一個活性層，活性層通常由施體和受體材料的混合物組成，並夾在兩個電極之間。透過此設計，串聯式結構的 PCE 可達到 17.3%，如表 1-1 所示。

表 1- 1 太陽能電池各種結構的元件特性<sup>1</sup>

Device types	$V_{oc}/V$	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%	Ref.
Single-layer	1.20	1.80	25.00	0.70	7
Bilayer	0.45	2.30	65.00	0.95	9
Quasi-BHJ	0.51	2.14	48.00	0.70	11
BHJ	0.82	2.00	35.00	2.90	12
Inverted	0.56	8.42	62.10	2.25	14
	1.38	3.87	43.00	2.30	17b
Tandem OSCs	0.82	4.90	57.00	2.30	18
	1.64	14.35	73.70	17.36	19

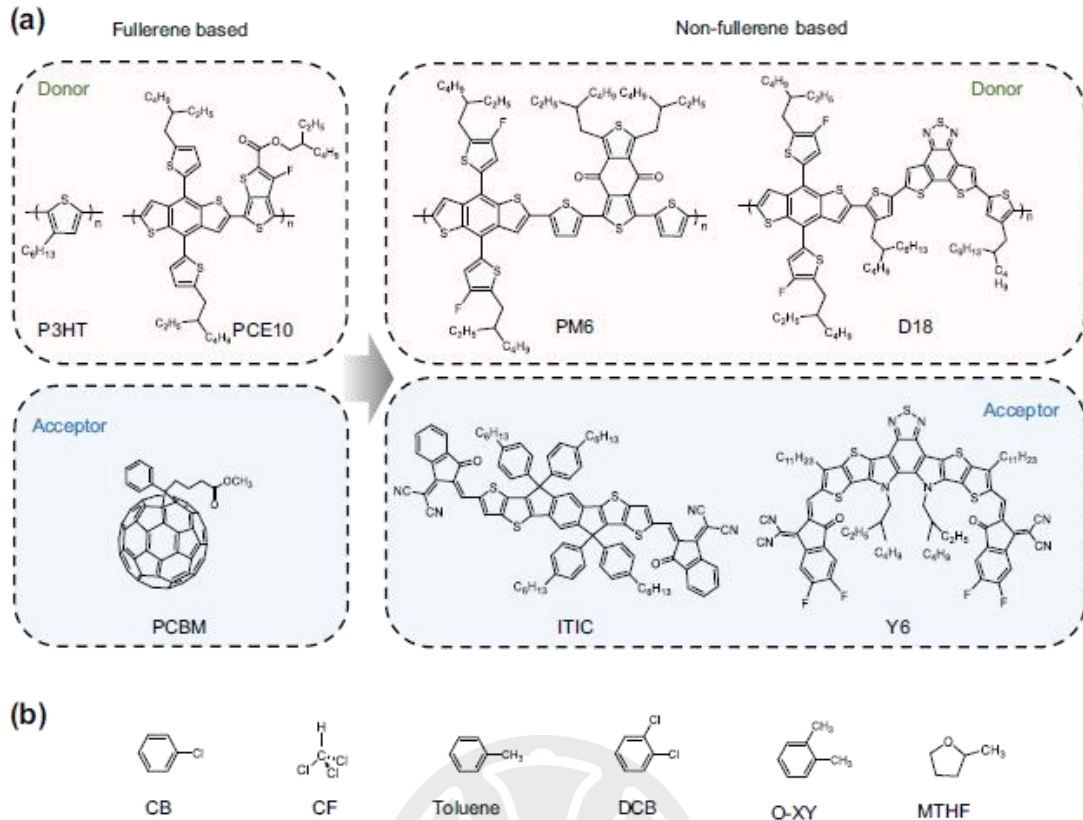


圖 1-2 活性層材料(a)活性層常使用的施體和受體材料化學結構(b)活性層常使用溶劑的化學結構<sup>2</sup>

有機太陽能電池依其元件堆疊結構的不同，主要可分為正式結構（或稱常規結構）與反式結構（或稱倒置結構），如圖 1-3 所示。這兩種結構的主要差異在於活性層與電極的相對位置。在正式結構中，通常以氧化銦錫（ITO）作為陽極，其上依序沉積電洞傳輸層（HTL）、活性層以及電子傳輸層（ETL），最後再沉積金屬陰極（例如鋁或銀）。而反式結構則恰好相反，通常以透明導電氧化物（例如 ITO 或氧化鋅）作為陰極，其上依序沉積電子傳輸層（ETL）、活性層以及電洞傳輸層（HTL），最後沉積金屬陽極。文獻中普遍指出相較於正式結構，反式結構的有機太陽能電池在效能表現上通常更為優異<sup>4</sup>，特別是在光電轉換效率（PCE）方面，如圖 1-4 所示。

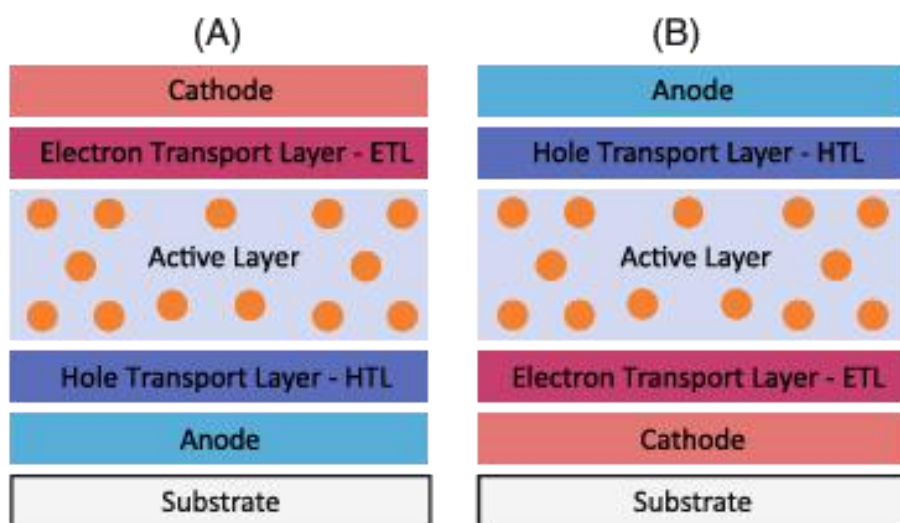


圖 1-3 BHJ OPV 結構(A)正式結構(B)反式結構<sup>3</sup>

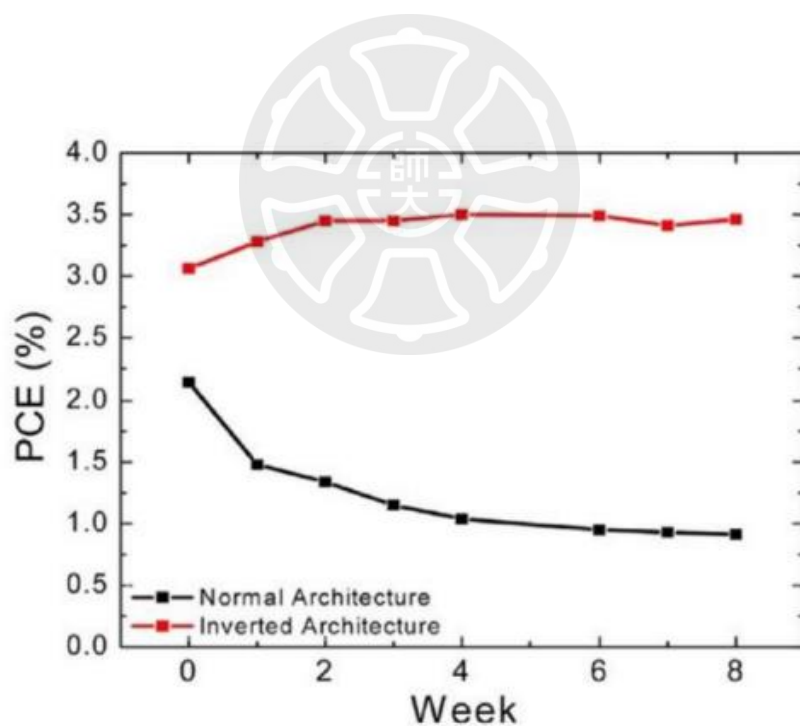


圖 1-4 有機太陽能電池正式與反式結構 PCE 比較<sup>4</sup>

### 1.1.3 有機太陽能電池的優勢

現今矽晶太陽能電池仍是工商及民生應用最普及的太陽能電池，然因其生產成本偏高、體積笨重、阻光顯著及缺乏彈性等缺陷，致使其難以良好地與建物整合，導致了土地及場域資源的耗損，而有機太陽能電池的問世則可補強矽晶太陽能電池的不足，下文將闡述有機太陽能電池現有的優勢。

#### 1. 製作成本降低及簡便製程

有機太陽能電池具備低成本及製程簡化的特點。在基板方面，可選用經濟實惠的摻銦錫氧化物透明導電玻璃(ITO)，以降低生產成本。元件製備主要採用溶液製程，透過控制材料比例達成效能提升。常用的薄膜沉積技術則有旋轉塗佈(Spin Coating)、刮刀塗佈(Blade Coating)及噴墨印刷(Inkjet Coating)等。

#### 2. 無毒/低毒的材料

傳統太陽能電池，例如以碲化鎘(CdTe)或砷化鎵(GaAs)為材料的電池，含有毒性較高的元素，可能對環境造成危害。而有機太陽能電池則可選擇碳基材料，如聚合物或富勒烯衍生物，或相對無毒的金屬氧化物，如氧化鋅(ZnO)等，從源頭減少有毒物質的使用，降低環境污染風險，更符合永續發展的原則。

#### 3. 半透明特性

半透明太陽能電池的優勢在於其高度的環境適應性。應用於建築物時，可作為窗戶或天窗，在引入自然光線的同時發電，並有效阻擋部分陽光，達到降溫節能的效果；在農業應用中，可作為溫室頂棚，提供植物所需的光照，同時產生電力，甚至可調整透光率以優化特定作物的生長環境，如圖 1-4 所示；在漁業方面，則可覆蓋於養殖池上方，在不影響水質和魚類生態的條件下發電，實現土地的多功能利用。



圖 1-5 半透明太陽能電池應用在農業溫室頂棚示意圖<sup>5</sup>

#### 4. 長期溫室氣體排放減少

評估光電技術的環境影響，需考量其設備生命週期中的溫室氣體(GHG)排放。目前，有機太陽能電池(OPV)技術的溫室氣體排放因子相較於已商業化的矽晶和碲化鎘(CdTe)光電技術較高，這主要與其較低的轉換效率和較短的元件壽命有關。然而，研究預測隨著 OPV 技術的不斷發展，特別是在長期情境下，透過提升轉換效率和延長使用壽命，所有光電模組的二氧化碳排放因子都將顯著下降，而 OPV 的排放量更有望成為最低，如圖 1-5 所示，這項研究揭示 OPV 技術在實現永續能源未來方面所扮演的重要角色。

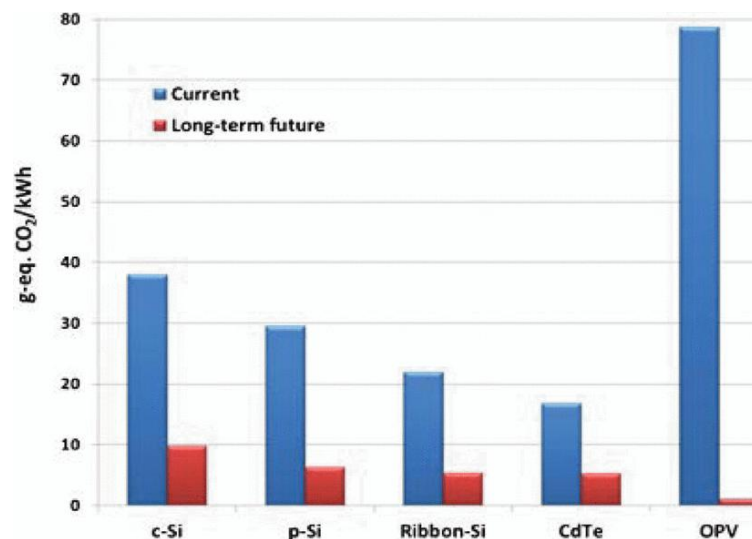


圖 1-6 目前和長期的矽晶、CdTe 和 OPV 模組的碳排放量<sup>6</sup>

## 1.2 文獻回顧

2018 年，Chen 研究團隊使用  $C_{60}(OH)_{16}$  富勒烯醇作為界面改質層<sup>6</sup>，修飾鈣鈦礦太陽能電池中的 ITO。研究發現加入  $C_{60}(OH)_{16}$  可有效縮小 ITO 與  $C_{60}$  之間的能階差。相較於未添加  $C_{60}(OH)_{16}$  的元件 PCE 為 14.47%，添加  $C_{60}(OH)_{16}$  後的元件 PCE 顯著提升至 16.70%。其元件穩定性方面，研究團隊將元件放置於氮氣環境中進行 1000 小時的老化測試，結果顯示使用  $C_{60}(OH)_{16}$  元件，仍能維持初始 PCE 的 79%；相較之下，僅使用  $C_{60}$  元件，則僅保留約 66% 的初始 PCE。此研究證實，加入  $C_{60}(OH)_{16}$ ，可有效改善鈣鈦礦太陽能電池的效能及穩定性。

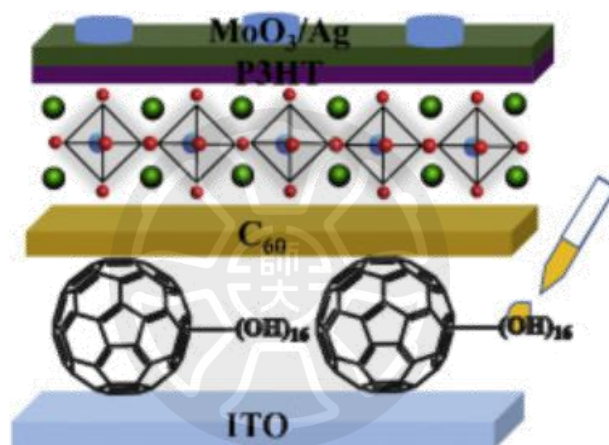


圖 1-7  $C_{60}(OH)_{16} / C_{60}$  的元件架構示意圖<sup>7</sup>

在有機太陽能電池的研究中，ZnO 常被用作電子傳輸層(ETL)。然而，先前的研究指出，ZnO 本身具有光催化活性，在紫外線照射下會與吸附的水和氧氣反應，產生高活性的自由基，例如氫氧自由基(OH)和超氧陰離子(O<sup>2-</sup>)。這些自由基具有強氧化性，會攻擊有機材料，特別是非富勒烯受體(NFA)結構中連接富電子和缺電子單元的雙鍵。此化學反應會破壞 NFA 的分子結構，使其光電特性劣化，並在 ETL 與活性層介面處形成能量障礙，不利於電荷的有效分離和傳輸，最終影響元件的整體效能。

有機太陽能電池(OSC)的穩定性一直是限制其商業化應用的主要挑戰之一。界面問題，特別是無機電極（如 ZnO）與有機活性層之間的界面，往往是導致元件不穩定的主要原因。為了解決此問題，Chen 團隊於 2025 年發表研究提出使用富勒烯醇( $C_{60}(OH)_x$ )作為分子連接劑，以構建具有堅固界面的高穩定性元件<sup>7</sup>。此研究的創新之處在於，透過在無機/有機界面，利用其羥基(OH)與 ZnO 及 Y6 形成氫鍵的能力，有效增強界面之間的黏附性及相容性。更重要的是，此舉還能促進電荷在界面上的有效傳輸，並抑制電荷複合的發生，從而顯著提升元件的效能和穩定性。實驗數據顯示，在 PM6:Y6 二元系統中添加  $C_{60}(OH)_x$  後，PCE 從 14.41% 提升至 16.09%，證明界面改質的有效性。在氮氣環境下，以 AM 1.5G 模擬太陽光連續照射 1200 小時的穩定性測試結果顯示，添加  $C_{60}(OH)_x$  的元件仍能維持初始效率的 88%，其結構如圖 1-8 所示，相較於未改質的元件，穩定性有顯著提升，此研究成果對於推動有機太陽能電池的商業化應用具有重要意義。

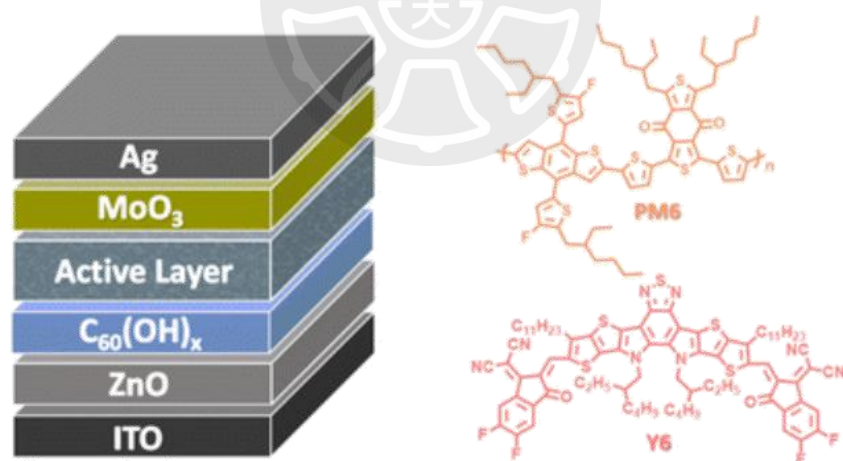


圖 1-8 反式 OSC 的元件架構和活性層材料 PM6 和 Y6 結構<sup>8</sup>

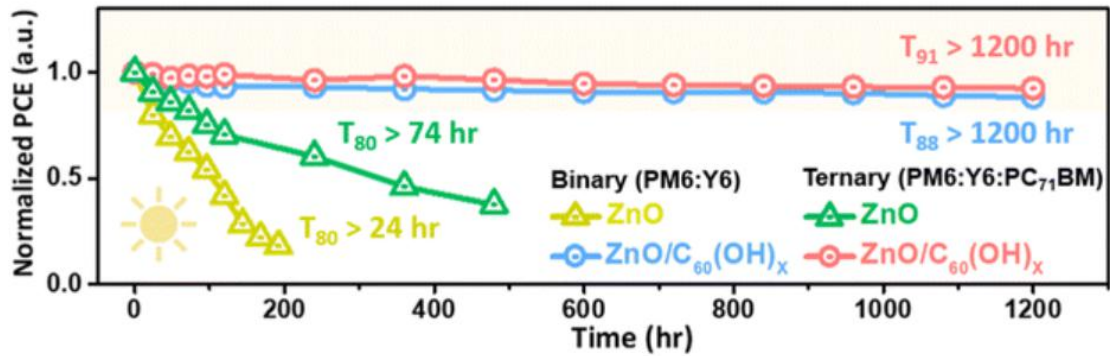


圖 1-9 ZnO 和 ZnO / C<sub>60</sub>(OH)<sub>x</sub> 元件在氮氣箱以 AM 1.5G 模擬太陽光照射歸一化 PCE<sup>8</sup>

### 1.3 研究動機

反結構有機太陽能電池中，氧化鋅(ZnO)因其優異的導電性與溶液加工特性，廣泛應用於電子傳輸層。然而，傳統 ZnO 薄膜製備過程中常伴隨表面缺陷，這些缺陷不僅增加了電荷復合中心，降低電荷傳輸效率，更成為影響元件穩定性的主要因素。研究指出，ZnO 與活性層介面處的大量氫氧基是導致穩定性下降的主因，其激發的自由基會氧化 ZnO 表面懸空的 OH<sup>-</sup>，產生具高活性的羥基自由基，加速元件衰退。因此，如何有效改善 ZnO 表面缺陷，提升元件穩定性，是目前研究的重要課題。

過去已有諸多研究證實 C<sub>60</sub> 其衍生物在改善鈣鈦礦太陽能電池與有機太陽能電池特性方面的潛力。先前研究亦指出，使用 C<sub>60</sub>(OH)<sub>x</sub> 可有效鈍化 ZnO 表面缺陷，進而提升元件穩定性。本研究旨在探索於 ZnO 層上塗佈雙層鈍化層疊加的可行性，來達到提升對 ZnO 鈍化效果，改善元件穩定性。

雖然已有文獻證實 C<sub>60</sub>(OH)<sub>x</sub> 作為鈍化層可改善元件的光照穩定性，但目前尚缺乏以塗佈製程雙層鈍化層的穩定性的相關研究。此外，過去多數研究使用可見光進行光照穩定性測試，然而有機太陽能電池的衰退主要受紫外光影響，針對反結構太陽能電池中添加雙層鈍化層後，其紫外光照穩定性的研究相對較少。

因此，本研究將聚焦在 ZnO 層上塗佈雙層鈍化層溶液，並以單層鈍化層溶液的反結構有機太陽能電池作為對照組，在 PM6:Y6 二元系統中，針對元件在空

氣中進行紫外光加速衰減測試，深入探討雙層鈍化層溶液製程對元件紫外光照穩定性的影響，例如比較使用雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 與 C<sub>60</sub> 衍生物(PCBM)溶液製程是否能進一步提升較單層鈍化層 C<sub>60</sub> 溶液製程的紫外光照穩定性。

#### 1.4 論文架構

本論文共分為五個章節，首先於第一章緒論中介紹有機太陽能電池的結構發展歷程，並回顧與本研究主題相關的文獻，闡述研究動機；接著於第二章理論基礎中，探討太陽能電池的基本工作原理、有機太陽能電池的重要參數，以及本研究使用的有機材料及其能帶結構；第三章實驗方法則詳細說明元件製備的實驗步驟與流程；第四章結果與討論將比較兩種 ZnO 介面改質方式在空氣中紫外光照射下的老化效應，分別為雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 溶液改質，以及雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 溶液添加 PCBM(C<sub>60</sub> 衍生物)溶液改質，並優化雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 溶液添加 PCBM 製程條件，提升其元件對紫外光的穩定性；最後第五章結論與展望將總結本研究的實驗結果，並提出未來可延伸的研究方向。

## 第二章、實驗原理

### 2.1 有機太陽能電池原理

#### 2.1.1 有機半導體能帶理論<sup>8</sup>

太陽能電池是一種光電元件，將光子的能量轉換為電能並輸出至外部電路，其能量轉換的核心機制是光伏效應（如圖 2-1 所示）。太陽能電池的基本結構包含光吸收材料，其兩側分別設置一個載子選擇層，並配備兩個金屬電極，即陰極和陽極。

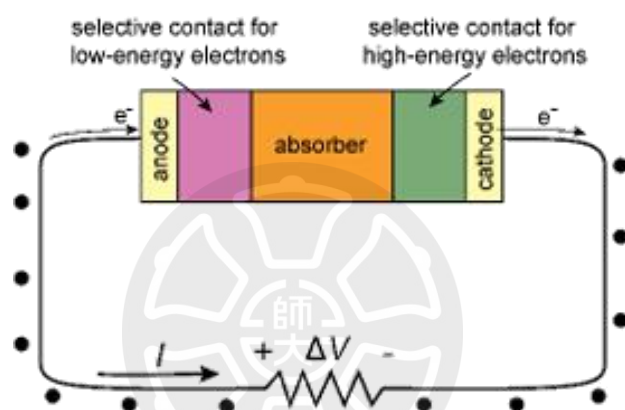


圖 2-1 太陽能電池含有電阻負載電力的概念示意圖<sup>9</sup>

有機太陽能電池的核心在於活性層，由兩種半導體材料組成：施體 (Donor) 和受體 (Acceptor)。這兩種材料分別擅長傳輸不同類型的電荷：受體主要在最低未佔據分子軌道 (LUMO) 中傳導電子，而施體則主要在最高佔據分子軌道 (HOMO) 中傳輸電洞。

當光線照射到活性層時，無論是施體或受體材料吸收光子，都會產生激子，也就是束縛在一起的電子-電洞對（圖 2-2 中的過程 1）。此時激子必須擴散到施體和受體材料的介面（2）。在這個介面上，激子會解離成自由的電子和電洞：電子會躍遷進入受體的低佔據分子軌域 (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO)，而電洞則留在受體的最高佔據分子軌域 (Highest Occupied Molecular

Orbital, HOMO)。接著分離後的電子和電洞會各自在相應的材料中傳輸 (3) 電子穿過受體材料，電洞穿過施體材料。為了更有效地收集這些電荷，電池中還設計了載子選擇性接觸層：電子傳輸層 (ETL) 負責傳輸電子，電洞傳輸層 (HTL) 負責傳輸電洞。電子和電洞會從活性層轉移到各自的傳輸層 (4)，然後再有效率地傳輸到電池的電極：電子傳輸到陰極，電洞傳輸到陽極 (5)，形成電流。通常，ETL 和 HTL 也由半導體材料製成，這些材料的 HOMO-LUMO 能隙比施體和受體材料更大，以確保電荷能有效地單向傳輸。

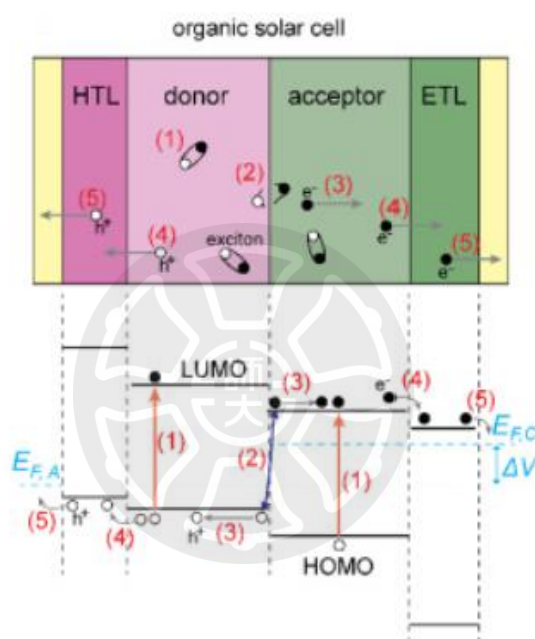


圖 2-2 OSC 結構和能帶示意圖<sup>9</sup>

### 2.1.2 理想與實際太陽能電池等效電路

太陽能電池為光電半導體元件，此類元件受光照射後，會汲取光子能量，於空乏區內生成電子-電洞對，並受內建電場驅策分離，遂產生自 n 型半導體流向 p 型半導體之光電流。故此理想之太陽能電池可簡化為一簡易之 PN 二極體與光電流之組合，如圖 2-3 所示。其中其理想之電壓-電流關係式可藉由 Schottky 方程式闡述。當接面於光照之下，則會生成反向電流密度  $J_{ph}$ ，電流密度則可表述如式 1<sup>10</sup>。

$$J(V) = J_s \left[ \exp \left( \frac{qV}{k_B T} - 1 \right) \right] - J_{ph} \quad \text{式 1}^{10}$$

其中  $J(V)$  為二極體電流密度， $J_s$  為逆向飽和電流密度， $q$  為單位電荷， $V$  為二極體電壓差， $T$  為溫度， $J_{ph}$  為太陽能電池光電流密度， $k_B$  為波茲曼常數

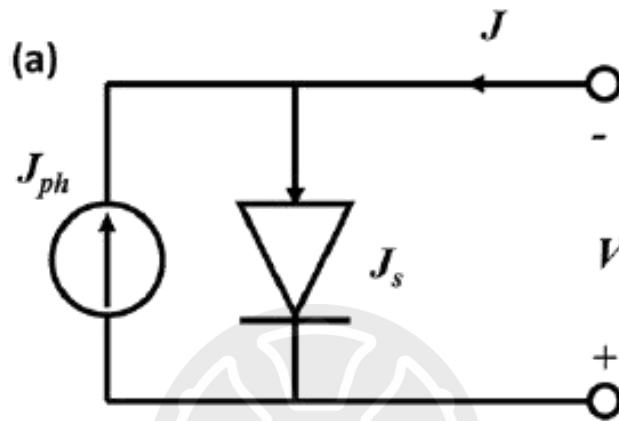


圖 2-3 理想太陽能電池等效電路<sup>16</sup>

實務上太陽能電池於光電轉換歷程中，常伴隨諸多損耗。光電流之耗損主因有三：其一，空氣與有機層介面因折射率差異，易產生光子吸收不均之問題；其二，光譜與材料能帶不合，導致光子能量虛擲；其三，元件薄膜厚度若不恰當，過薄則光子易直接穿透而未產生載子，反之過厚則縱使生成電子-電洞對，載子亦可能於抵達電極前即已復合。故需藉由串聯電阻( $R_s$ )與並聯電阻( $R_{sh}$ )納入考量上述影響元件之因素。串聯電阻主要關乎半導體本質阻抗及材料間之介面，並聯電阻則代表元件與外接電極之連接阻抗，如圖 2-4 所示。經校正之 Schottky 方程式(式 2)中，納入理想因子  $n$ ，其值通常介於 1 至 2 之間，表徵載子之復合機制。

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{e(V - JR_s)}{nk_B T}\right) - 1 \right] + \frac{V - JR_s}{R_{sh}} - J_{ph} \quad \text{式 2}^{10}$$

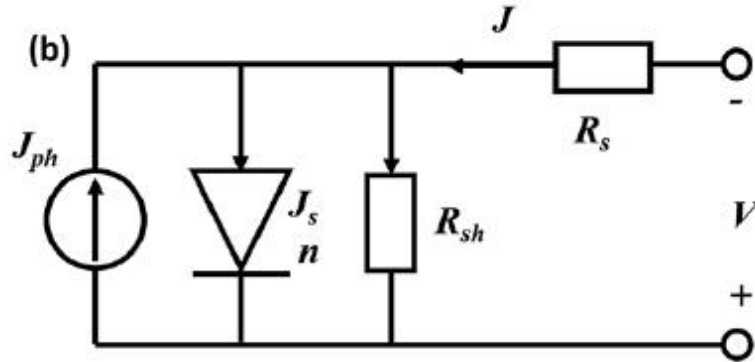


圖 2-4 實際太陽能電池等效電路<sup>16</sup>

### 2.1.3 有機太陽能電池重要參數

本章節將深入探討太陽能電池的關鍵性能參數，這些參數直接反映太陽能電池元件的效能表現，是評估其優劣的重要依據。這些重要的參數包含光電轉換效率(Power Conversion Efficiency, PCE)、開路電壓(Open Circuit Voltage,  $V_{oc}$ )、短路電流密度(Short Circuit Current Density,  $J_{sc}$ )、填充因子(Fill Factor, FF)、最大功率點(Maximum Power Point, MPP)，如圖 2-5 所示。

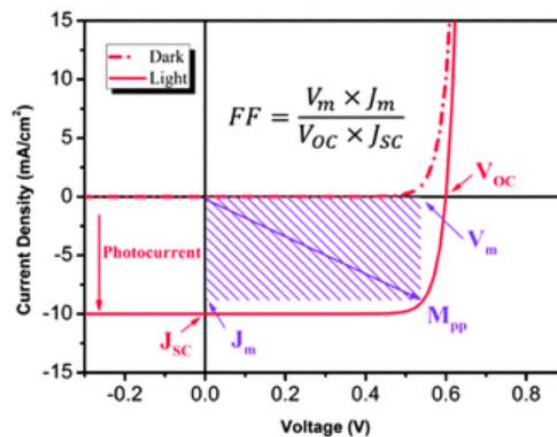


圖 2-5 太陽能電池重要參數圖<sup>10</sup>

### (1) 光電轉換效率(Power Conversion Efficiency, PCE)

PCE 為衡量太陽能電池性能最關鍵的指標之一，其代表元件將入射光能轉換為可用電能的最大比例，通常以百分比表示。更精確地說，光電轉換效率定義為太陽能電池的最大輸出功率與入射的輸入光功率之比值，可以用以下公式表示：

$$\text{PCE}(\%) = \frac{P_{\text{MAX}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{V_{\text{oc}} \times J_{\text{sc}} \times \text{FF}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \quad \text{式 3}$$

### (2) 開路電壓(Open Circuit Voltage, $V_{\text{oc}}$ )

電子和電洞分別擴散到能量較低的區域，進而在電極兩端產生電位差。此時，若施加一個外部電壓來抵消內建電場，直到元件內部不再有電位差，光電流也隨之消失（淨電流為零），此時的外部電壓即稱為斷路電壓（ $V_{\text{oc}}$ ）。此狀態下，元件內部沒有電流流動。將電流為零代入理想太陽能電池的公式，便可推導出  $V_{\text{oc}}$  公式：

$$V_{\text{oc}} = \frac{nk_{\text{B}}T}{q} \ln\left(\frac{J_{\text{sc}}}{J_{\text{s}}}\right) \quad \text{式 4}^{10}$$

上述機制主要適用於無機太陽能電池，目前針對有機太陽能電池尚未有完全成熟的理論，然而，從先前的描述可知開路電壓和材料能隙密切相關。我們可以透過施體材料的最高佔據分子軌域（HOMO）和受體材料的最低未佔據分子軌域（LUMO）來推測有機太陽能電池在光照下的運作效應。

### (3) 短路電流密度(Short Circuit Current Density, $J_{\text{sc}}$ )

由於短路電流值的大小會受到太陽能電池有效發光面積的影響，為了更有效地比較不同尺寸太陽能電池的效能，通常使用短路電流密度（ $J_{\text{sc}}$ ）來進行評估。短路電流密度定義為單位面積太陽能電池所能產生的最大電流，其單位



## 2.2 高分子有機太陽能電池的材料特性

有機高分子太陽能電池具備多樣特徵。區分高分子與小分子的依據為分子量，分子量高逾九百者歸屬高分子，不足則為小分子。有機物主要由碳、氫、氧三種元素構成。太陽能電池意指此類材料擁有光吸收能力。有機太陽能電池採用的吸光介質區分為高分子聚合物或小分子有機物。此類材料富含共軛鍵，此類共軛物中，p 軌域呈離域狀態，致使電子展現高極化性，並衍生出近似半導體的性質。相較小分子有機物，多種高分子聚合物於相同溶劑中展現較佳的溶解度，且於高分子聚合物有機太陽能電池（OPV）中，激子分離效率優於小分子。再者，高分子聚合物亦具備較多元的薄膜製備途徑。因此本研究主要選用高分子聚合物有機材料。

## 2.3 本論文使用之材料與結構介紹

在本章節中，將詳細介紹本論文研究中使用的電池結構，並闡述各結構層所採用的材料。本論文採用反式結構，其薄膜沉積順序如下：

1. 單層鈰化層 C<sub>60</sub>: 陰極 → 電子傳輸層 → 鈰化層 → 活性層 → 電洞傳輸層 → 金屬陽極
2. 雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 改質: 陰極 → 電子傳輸層 → 鈰化層 → 鈰化層 → 活性層 → 電洞傳輸層 → 金屬陽極
3. 雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 與 PCBM 改質: 陰極 → 電子傳輸層 → 鈰化層 → 鈰化層 → 活性層 → 電洞傳輸層 → 金屬陽極

### 2.3.1 陰極電極

氧化銦錫(indium-tin oxide, ITO)具有優異的導電性、良好的透光性以及相對較低的成本等優點，因此廣泛應用於光電元件中。由於有機太陽能電池的活性層材料具有高吸光特性，故基板必須具備良好的導電性和透光性。氧化銦錫 (ITO) 玻璃是一種常見的透明導電氧化物，在有機太陽能電池元件中應用極為廣泛，ITO 可藉由乾式或濕式蝕刻製程設計導電圖案，具有高度的設計自由度。

### 2.3.2 電子傳輸層

#### 氧化鋅(ZnO)

氧化鋅因其較高的電子遷移率與光穿透率，常被應用於反式結構的有機太陽能電池中，作為電子傳輸層。本實驗採用溶膠-凝膠法 (Sol-gel process) 製備氧化鋅薄膜。實驗中使用購自友和貿易有限公司的醋酸鋅 (Zinc acetate dihydrate) 與溶劑 2-甲氧基乙醇 (2-Methoxyethanol)，並搭配同樣購自該公司的乙醇胺 (Ethanolamine) 作為助溶劑。

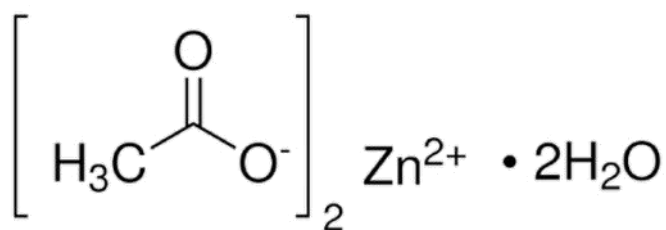


圖 2-7 醋酸鋅分子結構圖

### 2.3.3 鈍化層

#### 1. 富勒烯(C<sub>60</sub>)

C<sub>60</sub> 作為反式結構中，活性層與電子傳輸層之間的鈍化介面材料，其有獨特的球狀分子結構如圖 2-8 所示。C<sub>60</sub> 在多數溶劑中的溶解度偏低，一般以甲苯 (toluene) 或氯苯 (Chlorobenzene) 等溶劑進行溶解。然而 C<sub>60</sub> 具備優異的電子遷移率，且其最低未佔據分子軌域 (LUMO) 能階與電子傳輸層材料氧化鋅 (ZnO) 的 LUMO 能階相當接近，此特性有效降低因能階差所造成的能量損失，提升元件效率。此外 C<sub>60</sub> 改質 ZnO 的介面，可有效減少介面缺陷，進而降低載子複合，增強元件的穩定性。



#### 2. [6,6]-苯基-C 61 -丁酸甲酯((6,6)-Phenyl C61 butyric acid methyl este, PCBM)

PCBM(C<sub>60</sub> 衍生物)鈍化 ZnO 主要藉由改善界面接觸、減少缺陷態造成的電荷複合、降低界面功函數以利電子注入、阻擋電洞、調控 ZnO 表面性質以及改善薄膜形貌和結晶性來提升元件效能與穩定性；具體來說，PCBM 可填補 ZnO 表面空缺使其均勻化，其較低的 LUMO 能階可降低功函數，較低的 HOMO 能階可阻擋電洞，並與 ZnO 表面缺陷相互作用以達鈍化效果。

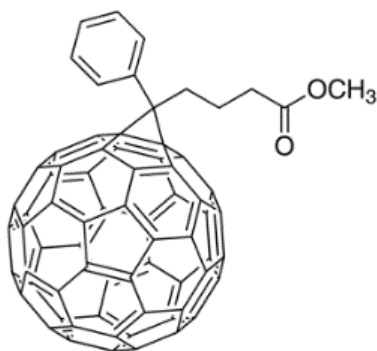


圖 2-9 PCBM 分子結構圖

#### 2.3.4 活性層與活性層添加物

在眾多非富勒烯材料中，PBDB-T-2F（常被稱為 PM6）與 Y6 更是先驅。自 2019 年起，這兩種材料的相關研究呈現爆發式增長，相關文獻數量快速增加。PM6 與 Y6 組成的系統之所以能展現出優異的效能，其關鍵在於兩種材料的吸收光譜具備互補的特性。具體而言，PM6 的主要吸收光譜範圍落在 500-700nm 的波長區間，而 Y6 則主要吸收 700-1000nm 的波長範圍。這種寬廣的吸收光譜有助於吸收更廣泛波長的光線，如同圖 2-10 所示，進而顯著提升有機太陽能電池的光電轉換效率。此外，研究也發現 PM6 和 Y6 在薄膜形態和電荷傳輸方面表現出良好的協同作用，這也是其高效能的原因之一<sup>11</sup>。未來，透過進一步優化材料結構和製程技術，非富勒烯有機太陽能電池有望在效能和穩定性上取得更大的突破，為綠色能源的發展做出更大的貢獻。

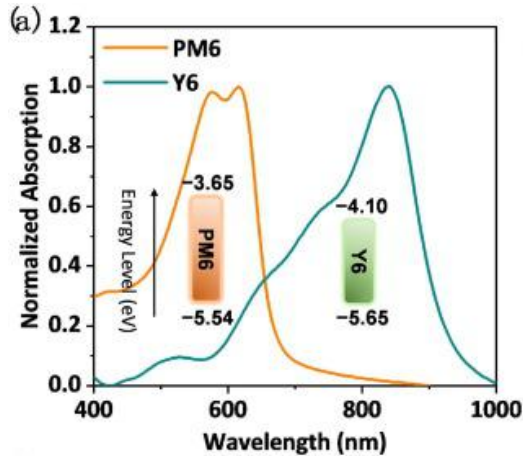


圖 2- 10 PM6 與 Y6 吸收可見光光譜能力及能階示意圖<sup>11</sup>

### 1. PBDB-T-2F (PM6)

Poly[[4,8-bis[5-(2-ethylhexyl)-4-fluoro-2-thienyl]benzo-[1,2-b:4,5-b']dithiophene-2,6-diyl]-2,5-thiophenediyl-[5,7-bis(2-ethylhexyl)-4,8-dioxo-4H,8H-benzo[1,2-c:4,5-c']-dithiophene-1,3-diyl]-2,5-thiophenediyl]為 PM6 全名。此複雜的名稱清楚地描述其分子結構。PBDB-T-2F 是 PBDB-T 的衍生材料，在有機太陽能電池領域中扮演重要的角色。與 PBDB-T 相比，PBDB-T-2F 的關鍵改進在於 BDT 單元上引入了兩個氟 (F) 原子。這兩個氟原子的引入有效地降低材料的最高佔據分子軌域 (HOMO) 能階。降低 HOMO 能階的主要目的是為了提高有機太陽能電池的開路電壓 (Voc)，Voc 的提升有助於增加電池的能量轉換效率<sup>11,12</sup>。此外氟原子的引入也可能影響材料的堆疊方式和薄膜形態，進而影響電荷傳輸和元件效能。目前針對 PBDB-T-2F 的研究仍持續進行中，科學家們致力於透過結構優化，進一步挖掘其在有機太陽能電池應用中的潛力。

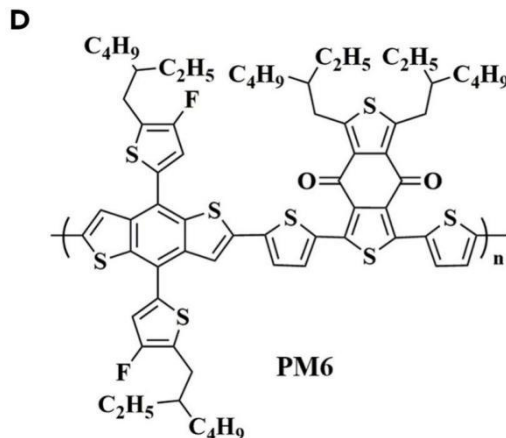


圖 2- 11 PBDB-T-2F (PM6) 分子結構圖<sup>13</sup>

## 2. (BTP-4F)Y6

2,2'-((2Z,2'Z)-((12,13-bis(2-ethylhexyl)-3,9-diundecyl-12,13-dihydro-[1,2,5]thiadiazolo[3,4-e]thieno[2'',3'':4',5']thieno[2',3':4,5]pyrrolo[3,2-g]thieno[2',3':4,5]thieno[3,2-b]indole-2,10-diyl)bis(methanylylidene))bis(5,6-difluoro-3-oxo-2,3-dihydro-1H-indene-2,1-diylidene))dimalononitrile 為 Y6 全名。在有機太陽能電池的研究領域中，Y6 是目前廣泛應用且極具潛力的新型受體材料之一。它與另一種重要的受體材料 PM6 展現出卓越的互補性，這使得基於 PM6 和 Y6 構建的二元系統能夠展現出優異的光電轉換效率。相關文獻研究指出，此二元系統的能量轉換效率已達到 16.93%，充分展現了 Y6 在提升有機太陽能電池效能方面的巨大潛力<sup>14</sup>。

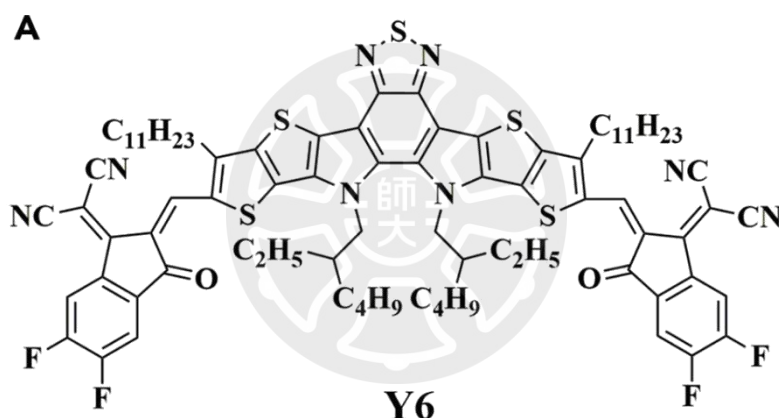


圖 2- 12 BTP-4F(Y6)分子結構圖<sup>13</sup>

### 3. 1-氯萘(1-Chloronaphthalene, CN)

CN 是在活性層的製備過程中，其經常被用作助溶劑。其主要功能為有效地幫助活性層中的施體 (Donor) 和受體 (Acceptor) 材料溶解並均勻混合，形成均勻的薄膜，這對於構建高效的本體異質結 (Bulk Heterojunction, BHJ) 結構至關重要。其次 CN 能在成膜過程中調節施體和受體分子間的聚集行為<sup>15</sup>，控制相分離的程度和形貌，進而影響電荷的傳輸和收集效率。適當的相分離可以形成有效的電荷傳輸通道，減少電荷復合的損失，從而提高元件的光電轉換效率。

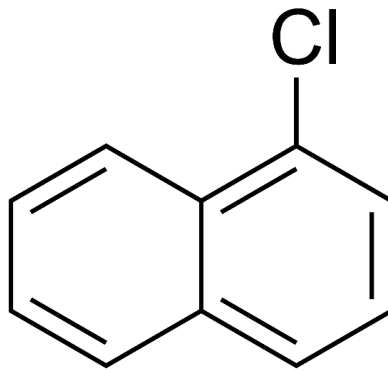


圖 2-13 CN 分子結構圖<sup>15</sup>

### 2.3.5 電洞傳輸層

#### 三氧化鉬( $\text{MoO}_3$ )

在反式結構元件中，選用三氧化鉬（Molybdenum trioxide,  $\text{MoO}_3$ ）作為電洞傳輸層材料。透過真空蒸發技術，我們得以精準控制  $\text{MoO}_3$  薄膜在納米尺度的結構與特性。 $\text{MoO}_3$  具有較高的功函數（work function）和優異的光學穿透率，使其能有效提取電洞並減少光學損失。

### 2.3.6 陽極電極

為降低電極和元件活性層間的功函數差，反式結構元件通常選用高功函數的金屬作為陽極，本論文研究反式結構元件選用銀（Ag）作為陽極電極。

## 2.4 本論文所使用反式有機太陽能電池結構與能帶圖

本論文使用反式有機太陽能電池結構及能帶圖如下所示：

1. 反式有機太陽能電池(單層鈍化層  $C_{60}$ ) : ITO/ZnO / $C_{60}$ /PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag

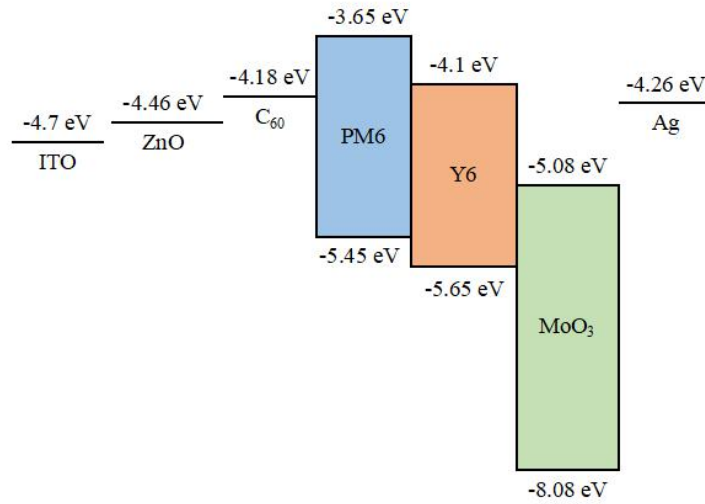


圖 2- 14 ITO/ZnO / $C_{60}$ /PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag 能帶圖

2. 反式有機太陽能電池(雙層鈍化層  $C_{60}$ ):ITO/ZnO/ $C_{60}$ / $C_{60}$ /PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag

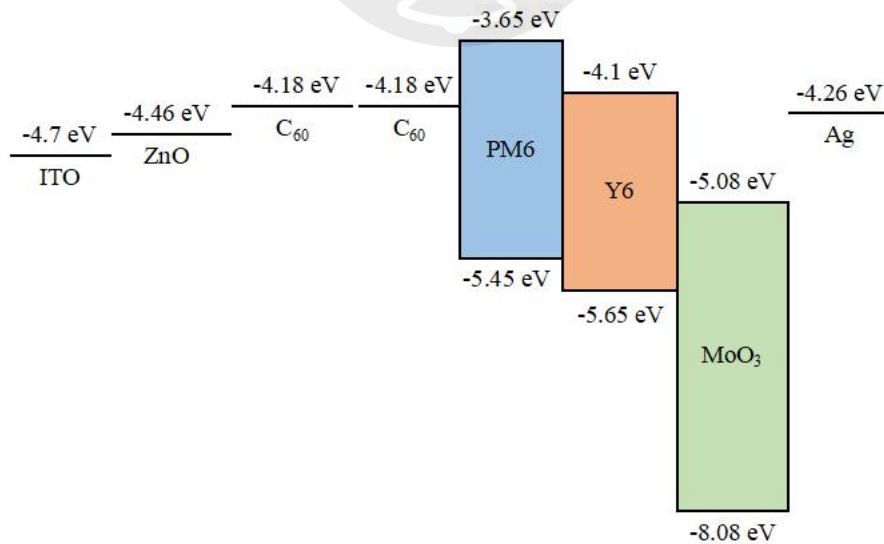


圖 2- 15 ITO/ZnO/ $C_{60}$ / $C_{60}$ /PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag 能帶圖

3.反式有機太陽能電池(雙層鈍化層 C<sub>60</sub>與 PCBM):ITO/ZnO/PCBM/C<sub>60</sub>/PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag

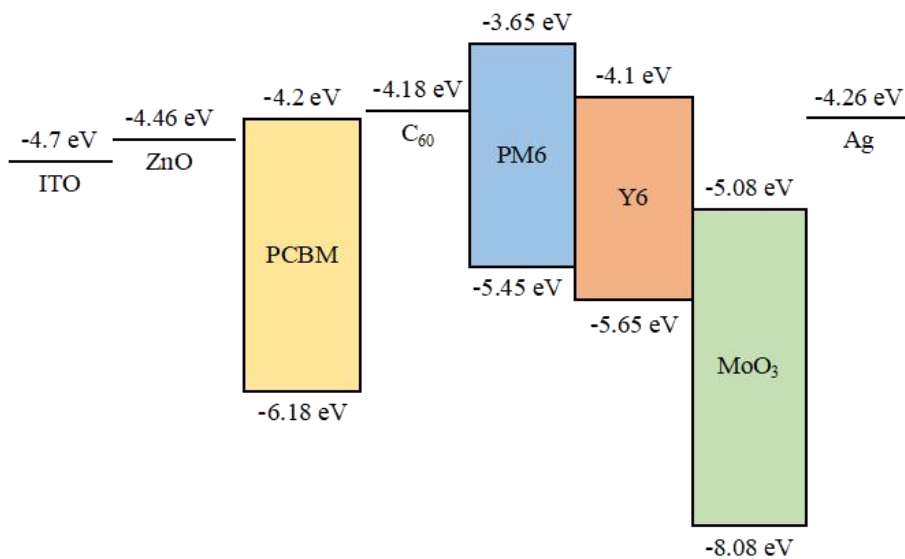


圖 2- 16 ITO/ZnO/PCBM/C<sub>60</sub>/PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag 能帶圖



### 第三章、實驗方法與流程

#### 3.1 有機太陽能電池之元件製作流程

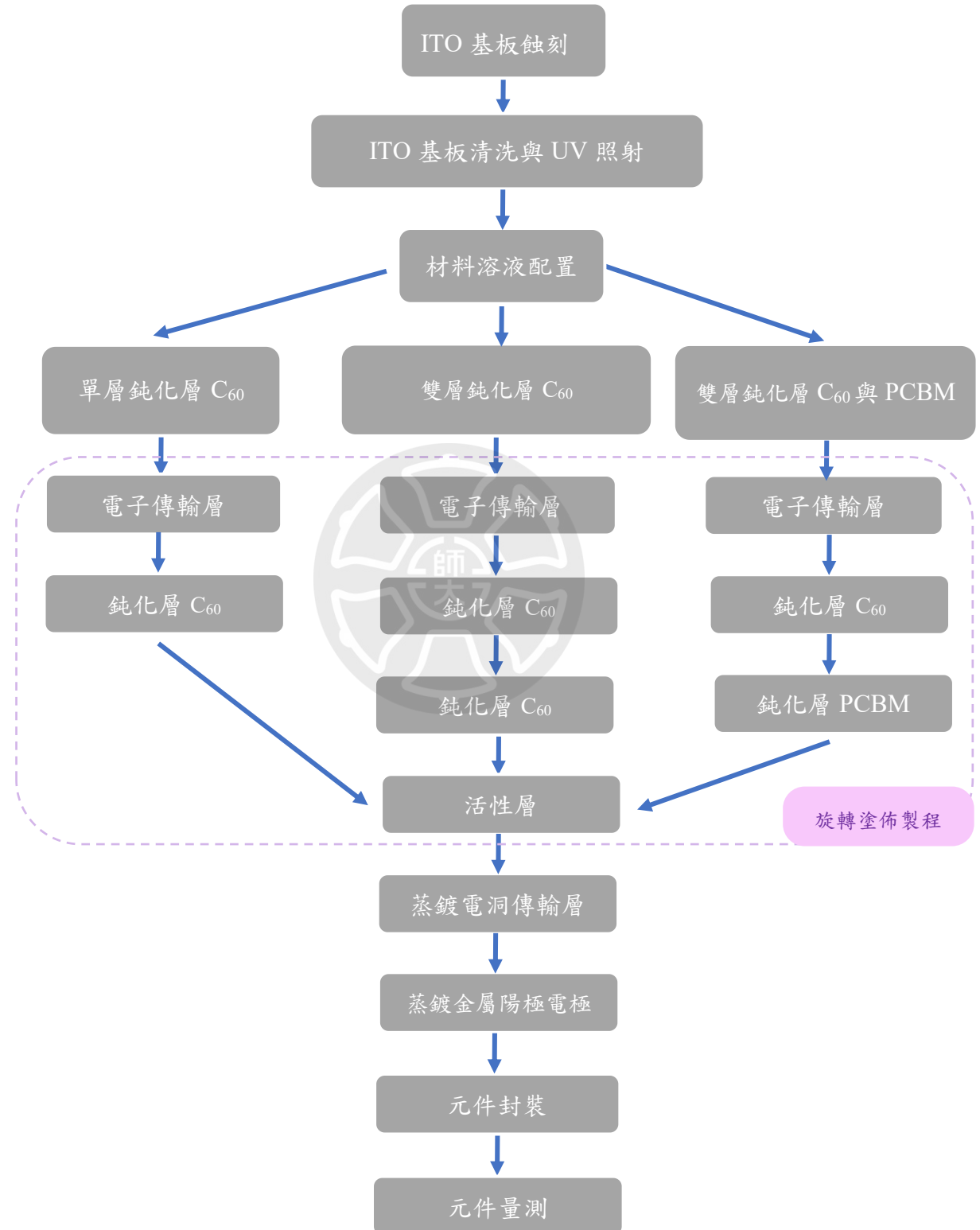


圖 3-1 有機太陽能電池之元件製作流程圖

### 3.2 ITO 基板蝕刻流程

本論文研究採用的基板主要為 ITO 玻璃，以下將闡述 ITO 玻璃基板的濕式蝕刻流程。ITO 玻璃材料是使用來源為友和貿易公司，原始 ITO 玻璃尺寸為 37 cm x 40 cm，ITO 玻璃厚度為 7 mm，濺鍍薄膜厚度大約為 230 nm，其電阻值為 7  $\Omega$ 。本實驗室的 ITO 薄膜圖案化製程採用濕式蝕刻技術。蝕刻步驟詳述如下：

(a) ITO 基板玻璃裁切與清洗

(b) 壓印光阻

(c) 圖像曝光

(d) 圖像顯影

(e) 鹽酸溶液蝕刻

(f) 去除光阻

(g) ITO 基板檢查及切割

以下將針對各步驟的內容進行逐項說明。

(a) ITO 基板玻璃裁切與清洗

首先需將供應商提供的 37 cm x 40 cm 玻璃切割成所需的 7 cm x 8 cm 規格尺寸。接著運用電動刻磨機於 ITO 玻璃基板的背側蝕刻數字記號，以便後續實驗的過程中區分 ITO 玻璃基板的正面與背面。使用潔淨棉花棒沾取丙酮擦拭玻璃基板的正面，以清除運送途中附著的污漬及微塵，再以高壓氮氣吹拂玻璃表面，確保表面乾燥無塵，避免後續製程中光阻劑無法均勻壓印於 ITO 玻璃上。最後將處理後的基板置在 120  $^{\circ}\text{C}$  加熱平台上烘烤 10 分鐘，以徹底去除基板表面的水氣殘留。

## (b) 壓印光阻

本論文採用購自長春石化公司之型號 AF-5040 乾膜負光阻，此型光阻對儲存環境溫度較為敏感，故須妥善存放於 5 °C 的冰箱裡。於製程開始前，務必將光阻自冰箱取出，靜置於室溫環境中至少 30 分鐘，使其充分回溫，以確保後續貼合製程之均勻性與品質。貼合製程使用 TCC-1300 型加熱式光阻機，此機台具溫度控制功能。操作時，將機台預熱至 80 °C，此溫度可使光阻軟化並產生適當的黏性，利於後續與基板的貼合。將預先清潔完成的 ITO 導電玻璃基板送入光阻機中，藉由滾輪的均勻滾壓與加熱作用，使乾膜光阻平整且緊密地附著於 ITO 玻璃表面。貼合完成後，使用切割刀具沿著基板邊緣移除多餘的光阻，為提升光阻與 ITO 玻璃基板之間的附著強度與穩定性，進行第二次的加熱與加壓處理。

## (c) 圖像曝光

本論文採用鈦興科技所供應之精密曝光機台，進行微影製程中的關鍵曝光步驟。操作時，首先將設計完成之光罩穩固地置放於曝光機的光罩承載平台上，並仔細檢查光罩表面是否有任何微塵或異物附著，接著將已壓印完成光阻的 ITO 玻璃基板放置於曝光機的基板承載平台上，並精確對位，使基板上的光阻面朝下，與光罩緊密貼合。在確認光罩與基板已完全貼合且定位無誤後，即可啟動曝光機進行紫外光曝光。由於本論文使用的為負光阻材料，因此受到紫外光照射的區域，光阻會產生光化學反應，進而發生交聯硬化。機台的曝光時間設定為 32 秒，曝光完成後，基板上未受紫外光照射的區域，其光阻仍保持未硬化的狀態，這些區域將在後續的顯影製程中會被移除，留下所需的圖案。

## (d) 圖像顯影

配製碳酸鉀溶液（比例為 50 克碳酸鉀溶於 1 升去離子水中）作為顯影劑，此溶液需充分攪拌至完全溶解。將曝光後的玻璃基板小心浸入此顯影液中，計時 100 秒進行顯影作用。為避免過度顯影，時間一到需立即將基板取出，並迅速置

至另一容器的去離子水中清洗，以去除殘留的顯影液及溶解的光阻。接著使用氮氣槍，以適當的氣壓與角度吹乾基板表面，確保無水漬殘留。最後將基板放置於已預熱至 120°C 的加熱板上進行硬烤，持續 20 分鐘，此步驟旨在增強光阻與玻璃基板之間的附著力，並進一步固化光阻層。

#### (e) 鹽酸溶液蝕刻

鹽酸 (HCl) 水溶液作為蝕刻液，預先加溫 70°C，經過硬烤處理、表面帶有光阻圖案的玻璃基板，以緩慢浸入已恆溫的鹽酸蝕刻液中。先前經過硬烤流程的光阻層，其抗酸蝕能力已大幅提升，因此能有效地保護其下方覆蓋的 ITO 薄膜區域，避免受到鹽酸的侵蝕。而基板上未被光阻覆蓋的 ITO 薄膜區域，則會與鹽酸產生化學反應，形成可溶於水的鹽類或其他副產物，進而被蝕刻液移除光阻的顏色變化（由深藍色轉變為黃綠色），此時需立即將基板從蝕刻液中取出，以避免過度蝕刻造成圖案尺寸的偏差。

#### (f) 去除光阻

蝕刻完成後，將基板完全浸沒於丙酮溶液中，利用丙酮溶解並剝離光阻層。接著由於丙酮揮發後可能留下殘留物，因此使用異丙醇浸泡基板，以有效去除殘留的丙酮，然後使用去離子水沖洗基板，以徹底清除殘留的異丙醇和其他微粒雜質並使用氮氣槍，以適當的氣壓和角度吹除大部分的水滴，然後將基板放置於 120°C 加熱板上進行烘烤，持續 20 分鐘，有效去除殘留的水分。

#### (g) ITO 基板檢查及切割

為了確保蝕刻過程的完整性，並驗證 ITO 導電層已確實斷開，使用三用電錶測量電極間的電阻值，另用肉眼仔細檢查蝕刻後的圖案，重點在於檢視線路邊緣是否平整、有無毛邊或鋸齒狀缺陷，以及圖案本身是否完整、有無缺漏，最後將基板切成實驗所需的 4 cm x 4 cm 規格，以利後續實驗進行。

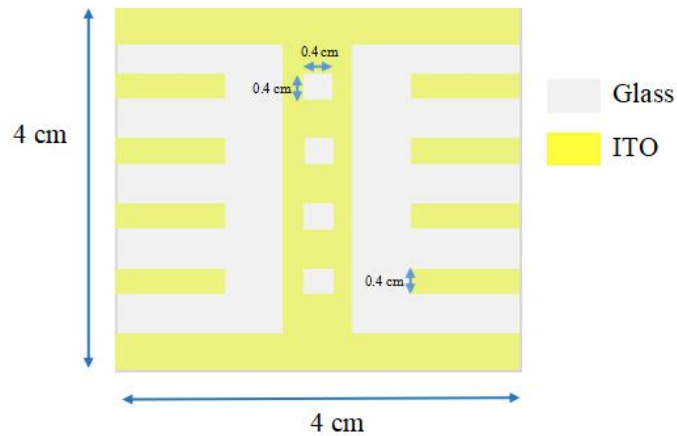


圖 3- 2 ITO 基板蝕刻後之圖型

### 3.3 ITO 基板清洗與 UV 照射

元件製作前，為確保 ITO 玻璃表面潔淨無瑕，避免任何汙染或微粒影響元件效能，標準清洗流程至關重要。本實驗採用丙酮(acetone)、異丙醇 (IPA)、去離子水 (Deionized water) 依序進行在超音波震盪清洗，各步驟維持 15 分鐘。清洗後，立即使用氮氣槍吹乾 ITO 玻璃基板，並放置於 120°C 的加熱板上烘烤 20 分鐘，徹底去除表面殘留水氣。後續將基板置於紫外線 (UV) 燈箱中照射 20 分鐘，此步驟旨在提升後續材料於 ITO 玻璃基板上的附著性。

### 3.4 材料溶液配置

進行旋轉塗佈製程前，須預先配置塗佈溶液。依照論文 3-10 所述比例，於手套箱內精確秤取溶質、溶劑、助溶劑後，置入小玻璃瓶中，放入磁石後，使用封口膠確實密封瓶口，並放置於攪拌器上，設定攪拌轉速為每分鐘兩百轉 (200 RPM)，進行充分攪拌使其均勻混合，其存放於手套箱的氮氣環境中 24 小時。此配置步驟僅適用於電子傳輸層、鈍化層之溶液。至於活性層溶液，則須於使用當天再行配置，並於加熱攪拌器 60°C 的環境下，持續加熱攪拌至 2 小時。

### 3.5 旋轉塗佈製程

旋轉塗佈為目前多數實驗室廣泛採用的薄膜製備技術，其優點包含成膜時間快速、製程時間短等。旋轉塗佈製程的原理是利用真空吸附技術將基板固定於旋塗機載台上，藉由高速旋轉產生之離心力，使塗佈溶液均勻散佈於 ITO 玻璃基板表面。

操作步驟如下：先將 ITO 玻璃基板以真空吸附方式固定於旋塗機載台上，確認基板已穩固吸附後，使用移液器(pipette)精確吸取所需之塗佈溶液。啟動旋塗機後，待基板旋轉速率達到實驗預設值後，迅速將移液器中的溶液滴於玻璃基板中心位置，溶液會立即向外擴散，如圖 3-3 所示。旋轉塗佈製程結束後，立即將塗佈後的玻璃基板置於加熱板上退火處理，旋轉塗佈製程完成後，唯獨活性層須在基板上定義擦邊邊界，並使用四氫呋喃(THF)擦去基板邊界以外多餘材料，如圖 3-4 所示。

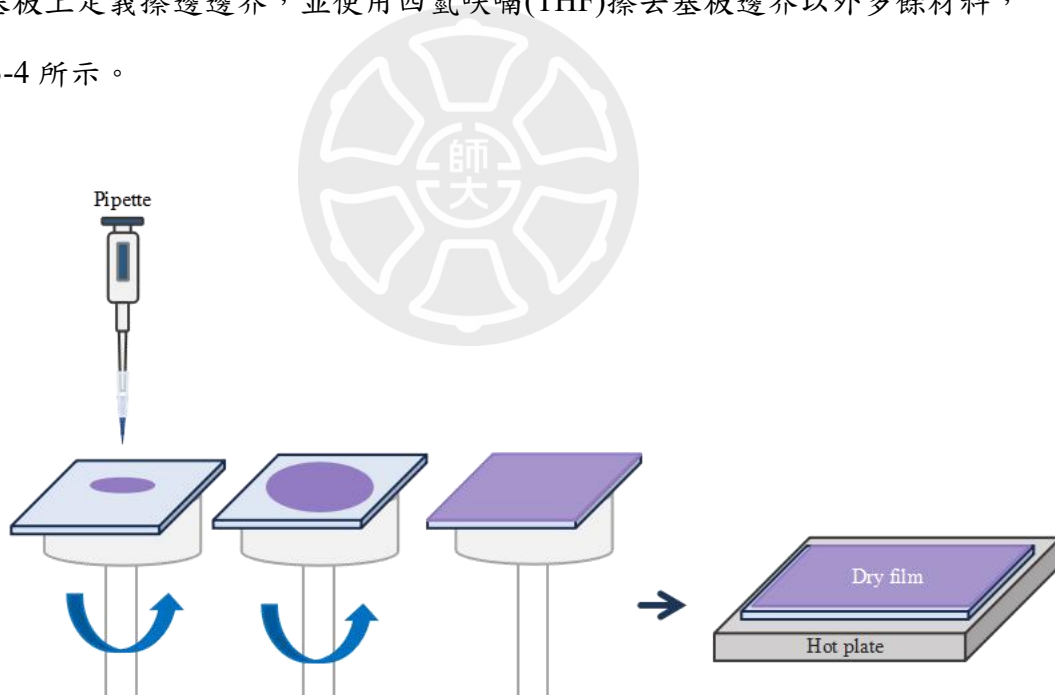


圖 3-3 旋轉塗佈製程示意圖

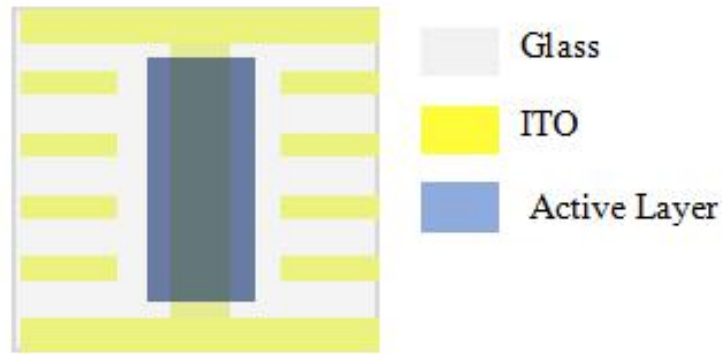


圖 3-4 活性層擦邊邊界示意圖(藍色區域)

### 3.5.1 反式結構元件旋轉塗佈順序

以下來說明單、雙層反式結構的塗佈順序，單層反式結構的塗佈順序則是電子傳輸層(ZnO)、鈍化層( $C_{60}$ )、活性層(PM6:Y6)；雙層反式結構的塗佈順序則是電子傳輸層(ZnO)、鈍化層( $C_{60}$  或 PCBM)、鈍化層( $C_{60}$ )、活性層(PM6:Y6)，如圖 3-5 所示；其旋轉塗佈製程參數如 3-10 節所述。

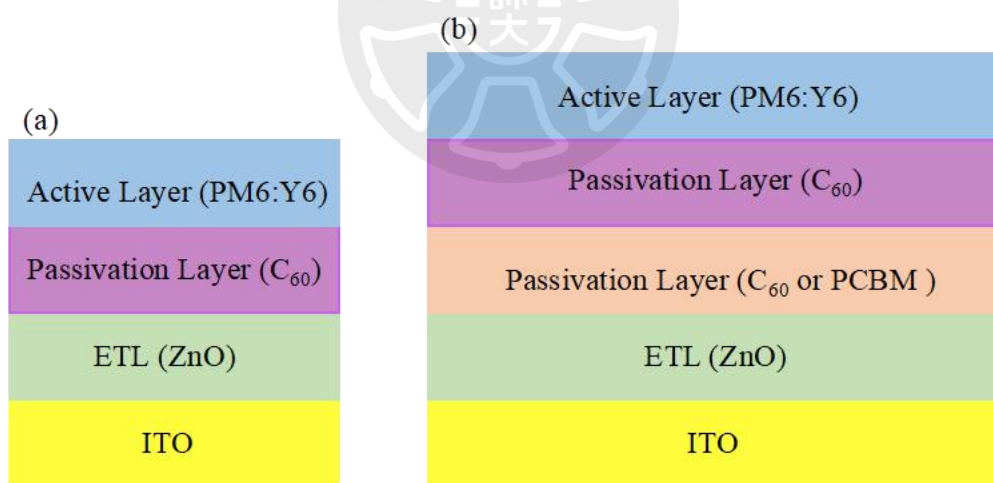


圖 3-5 (a)單層鈍化層反式結構(b)雙層鈍化層反式結構塗佈順序示意圖

本論文之主要研究為反式結構單層與雙層結構修飾氧化鋅表面的壽命比較分析。

### 3.6 電洞傳輸層/金屬陽極電極蒸鍍

材料塗佈與擦好邊界的元件，採用熱蒸鍍法製備電洞傳輸層及金屬陽極電極。將元件正面朝向蒸鍍遮罩並對齊，接著將蒸鍍遮罩與已塗佈之元件以面朝下的方式置於蒸鍍機承載台上。後續將銀錠置於鎢舟內， $\text{MoO}_3$  則置於坩堝中。待蒸鍍腔室抽真空小於至  $4 \times 10^{-6}$  torr 後，即可啟動蒸鍍流程，反式結構元件的電洞傳輸層( $\text{MoO}_3$ )厚度為 10 nm，金屬陽極(銀)厚度則為 100 nm。

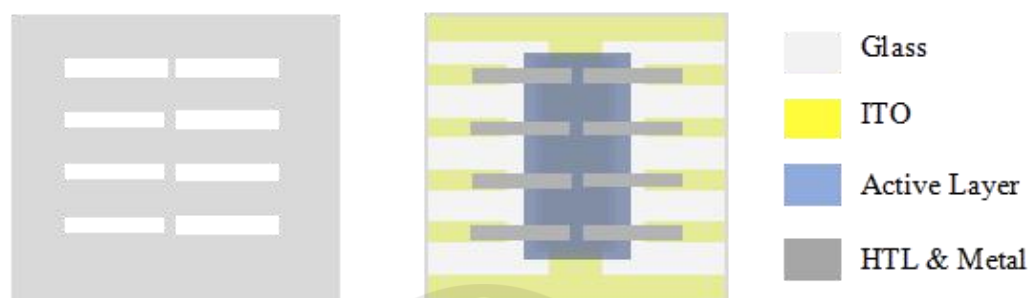


圖 3-6 蒸鍍遮罩與元件蒸鍍後示意圖

### 3.7 元件封裝

為保護蒸鍍後的活性層材料與電極金屬免受水氣及氧氣的影響，導致元件效率及穩定性下降，元件的局部密封步驟至關重要。利用噴砂技術於玻璃上刻蝕出凹槽，並採用俊尚科技型號 WB90US(P)之紫外光硬化樹脂為封裝膠材來進行元件的封裝作業。首先將封裝材料塗佈於凹槽玻璃的周圍，接著使用真空吸筆吸取元件的背面，使其正面朝下對準玻璃上的凹槽，透過紫外線光照射四分鐘以使封裝材固化，便完成元件的封裝流程，如圖 3-7 所示。



圖 3-7 封裝元件示意圖

### 3.8 元件量測

本研究採用太陽光模擬器之光源與 AM1.5G 太陽光之光源相同(照射強度為  $1000 \text{ W/m}^2$ )，並運用 Keithley 2400 電錶及 LabVIEW 程式輸入量測相關數值(有效面積為  $0.04 \text{ cm}^2$ 、電壓區間為  $-0.1\text{V} \sim -1\text{V}$ 、電壓間隔為  $0.02\text{V}$ )，共有 8 點有效面積如圖 3-8 所示，可獲得 AM1.5G 太陽光下的 J-V 曲線、PCE、 $J_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、F.F. 等參數。在進行量測作業前，需先對鹵素燈光源進行校正，使用矽太陽電池作為校準依據，調整鹵素燈的照射強度，直到  $J_{sc}$  和  $V_{oc}$  數值與原廠提供的矽太陽電池規格書一致，即完成光源校正程序。

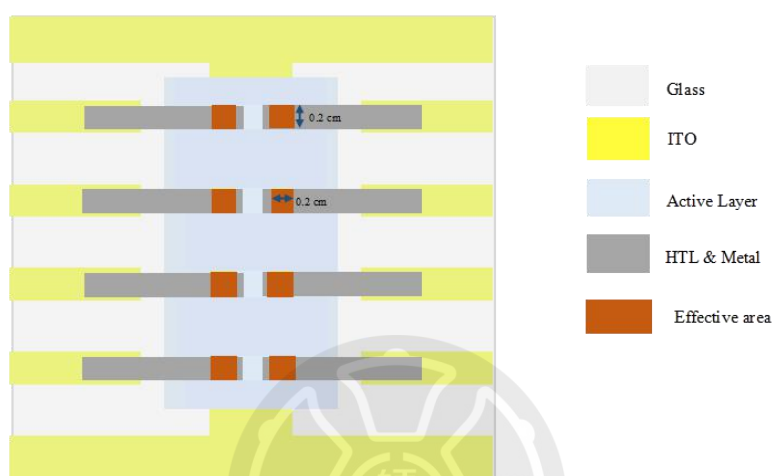


圖 3-8 元件之有效面積示意圖

### 3.9 元件紫外光照穩定性量測

在本論文研究中，著重於太陽能電池元件之紫外光照穩定行為之探討。選用 AM1.5G 太陽光譜作為參考依據，並針對光譜內紫外光波段實施積分計算，藉由  $365 \text{ nm}$  之紫外光燈源調整至依 AM1.5G 計算所得之積分強度(光強度為  $500 \mu \text{ W/cm}^2$ )照射，為追蹤有機太陽能電池在紫外光作用下穩定的光源此外，燈箱內部配備風扇，以確保運作時維持室溫。

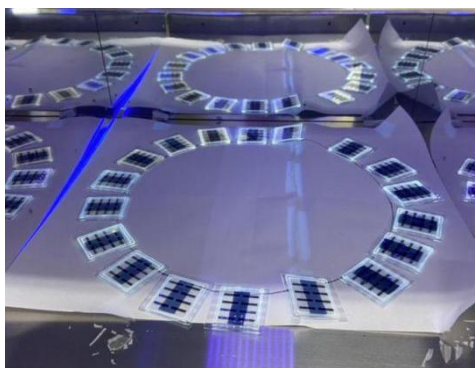


圖 3-9 紫外光燈箱穩定性量測示意圖

### 3.10 元件製程參數

本章節詳細列出本論文所使用的材料結構參數。

表 3-1 單層鈍化層 C<sub>60</sub> 厚度參數表

ITO	UV 20 mins
ZnO	Zn(CH <sub>2</sub> COO) <sub>2</sub> : 2-Methoxyethanol : Ethanolamine = 1 mg : 10 mL : 28 mg Spin coating 4000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 1 hr in air
C <sub>60</sub>	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Filtered through 0.45 μm PVDF filter Spin coating 3500 rpm、3000 rpm、2500 rpm、2000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins
Active Layer	PM6 : Y6 / CF + CN= 1:1.2 ; 18mg/ml CF; 0.75% CN Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing: 100 °C, 10 mins
Anode	MoO <sub>3</sub> : 100 Å, 0.2 Å/s Ag : 1000 Å, 2 Å/s

表 3-2 活性層 CN 濃度參數表

ITO	UV 20 mins
ZnO	Zn(CH <sub>2</sub> COO) <sub>2</sub> : 2-Methoxyethanol : Ethanolamine = 1 mg : 10 mL : 28 mg Spin coating 4000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 1 hr in air
C <sub>60</sub>	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Filtered through 0.45 μm PVDF filter Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins
Active Layer	PM6 : Y6 / CF + CN= 1:1.2 ; 18mg/ml CF; 0.75% CN、1.5% CN、Not added CN Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing: 100 °C, 10 mins
Anode	MoO <sub>3</sub> : 100 Å, 0.2 Å/s Ag : 1000 Å, 2 Å/s

表 3-3 雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 添加不同溶劑參數表

ITO	UV 20 mins			
ZnO	Zn(CH <sub>2</sub> COO) <sub>2</sub> : 2-Methoyethanol : Ethanolamine = 1 mg : 10 mL : 28 mg Spin coating 4000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 1 hr in air			
C <sub>60</sub>	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins	C <sub>60</sub> / CB = 3 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins	C <sub>60</sub> / CB = 3 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins
	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins	C <sub>60</sub> / CB = 3 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins	C <sub>60</sub> / CB = 3 mg / 1000 μL Syringe Filter:0.45 μm PVDF(stir for 1 day) Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing 200 °C, 10 mins
Active Layer	PM6 : Y6 / CF + CN= 1:1.2 ; 18mg/ml CF; 0.75% CN Spin coating 3000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing: 100 °C, 10 mins			
Anode	MoO <sub>3</sub> : 100 Å, 0.2 Å/s Ag : 1000 Å, 2 Å/s			

表 3-4 雙層鈍化層 C<sub>60</sub>、雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 與 PCBM 參數表

ITO	UV 20 mins		
ZnO	Zn(CH <sub>2</sub> COO) <sub>2</sub> : 2-Methoyethanol : Ethanolamine = 1 mg : 10 mL : 28 mg Spin coating 4000 rpm for 30 s Annealing 200 °C, 1 hr in air		
C <sub>60</sub>	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Filtered through 0.45 μm PVDF filter Spin coating 3000 rpm for 30 s Annealing 200 °C, 10 mins	PCBM	PCBM / CB = 5 mg / 1000 μL Spin coating: 5000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing: 100 °C, 10 mins
C <sub>60</sub>	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Filtered through 0.45 μm PVDF filter Spin coating 3000 rpm for 30 s Annealing 200 °C, 10 mins		
Active Layer	PM6 : Y6 / CF + CN= 1:1.2 ; 18mg/ml CF; 0.75% CN Spin coating 3000 rpm for 30 s ANNEALING: 100 °C, 10 mins		
Anode	MoO <sub>3</sub> : 100 Å, 0.2 Å/s Ag : 1000 Å, 2 Å/s		

表 3-5 雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 與 PCBM 濃度參數表

ITO	UV 20 mins
ZnO	Zn(CH <sub>2</sub> COO) <sub>2</sub> : 2-Methoxyethanol : Ethanolamine = 1 mg : 10 mL : 28 mg Spin coating 4000 rpm for 30 s Annealing 200 °C, 1 hr in air
PCBM	PCBM / CB = 5 mg、7.5 mg、10 mg / 1 mL Spin coating: 5000 rpm for 30 s Dose = 80 μL Annealing: 100 °C, 10 mins
C <sub>60</sub>	C <sub>60</sub> / ODCB = 16 mg / 1000 μL Filtered through 0.45 μm PVDF filter Spin coating 3000 rpm for 30 s Annealing 200 °C, 10 mins
Active Layer	PM6 : Y6 / CF + CN= 1:1.2 : 18mg/ml CF; 0.75% CN Spin coating 3000 rpm for 30 s ANNEALING: 100 °C, 10 mins
Anode	MoO <sub>3</sub> : 100 Å, 0.2 Å/s Ag : 1000 Å, 2 Å/s



## 第四章、實驗結果與討論

### 4.1 反式有機太陽能電池單層鈍化層 $C_{60}$ 結構參數制定

反結構有機太陽能電池的效能與穩定性，深受電子傳輸層（ZnO）與活性層介面缺陷的影響。為解決此問題，本章節著重於探討  $C_{60}$  溶液作為單層鈍化層的應用。 $C_{60}$  因其優異的電子遷移率、對可見光的低吸收性，以及與 ZnO 能階的良好匹配，被視為理想的鈍化材料。本研究將深入探討不同製程條件下， $C_{60}$  鈍化層的厚度、活性層 CN 濃度等參數，在 PM6:Y6 二元系統有機太陽能電池的紫外光照穩定性。目標是優化單層鈍化層  $C_{60}$  的製程，以提升元件的整體效能與壽命。

本章節中元件結構為 ITO/ZnO/ $C_{60}$ /PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag，如圖 4-1 所示。

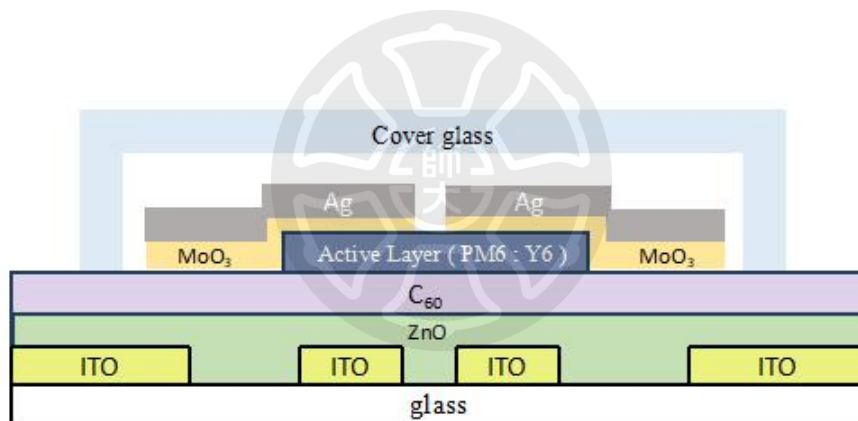


圖 4-1 反式有機太陽能電池單層鈍化層  $C_{60}$  側面圖

#### 4.1.1 單層鈍化層 $C_{60}$ 厚度影響

於本小節中，將探討鈍化層  $C_{60}$  的厚度，對於 OPV 元件的光電轉換效率 (PCE)，以及使用壽命的影響。我們將  $C_{60}$  厚度調整為 9、13、18、21 nm，而後實驗分析不同厚度下元件的光電轉換效率及紫外光光照穩定性。

我們依照圖 4-1 所示的元件結構，針對  $C_{60}$  厚度為 9、13、18、21 nm 的元件進行光電轉換效率 (PCE) 量測。元件初始量測結果，如圖 4-2 與表 4-1 所示。由數據結果顯示， $C_{60}$  厚度為 13 nm (3000 rpm) 的元件，其 PCE 為 12.23%，相較之下，其他厚度的元件 PCE 均為 13% 以上。

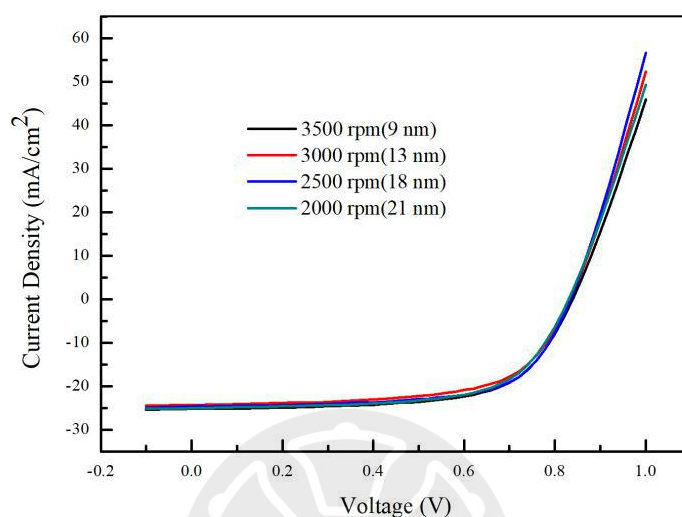


圖 4-2 單層鈍化層  $C_{60}$  不同厚度元件 I-V 圖

表 4-1 單層鈍化層  $C_{60}$  不同厚度元件初始效率

Rotational speed(rpm)	$C_{60}$ Thickness (nm)	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	VOC (V)	F. F.
3500	9	13.84	13.29±0.31	25.33±0.50	0.84±0	0.63±0.01
3000	13	12.65	12.23±0.35	26.08±0.55	0.83±0	0.57±0.01
2500	18	13.63	13.37±0.19	25.18±0.49	0.84±0	0.64±0.02
2000	21	13.49	13.21±0.30	24.89±0.35	0.83±0	0.64±0.02

後續，我們持續以紫外光(強度為  $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ )照射元件 264 小時，模擬太陽光熱致元件劣化，藉此探討元件照射紫外光穩定度，數據結果呈現於表 4-2。其定義照光後的光電轉換效率相較於初始值的比率為 R 值，如圖 4-3 所示。我們觀察發現，各元件在 96 小時內經紫外光照射，光電轉換效率顯著驟降。

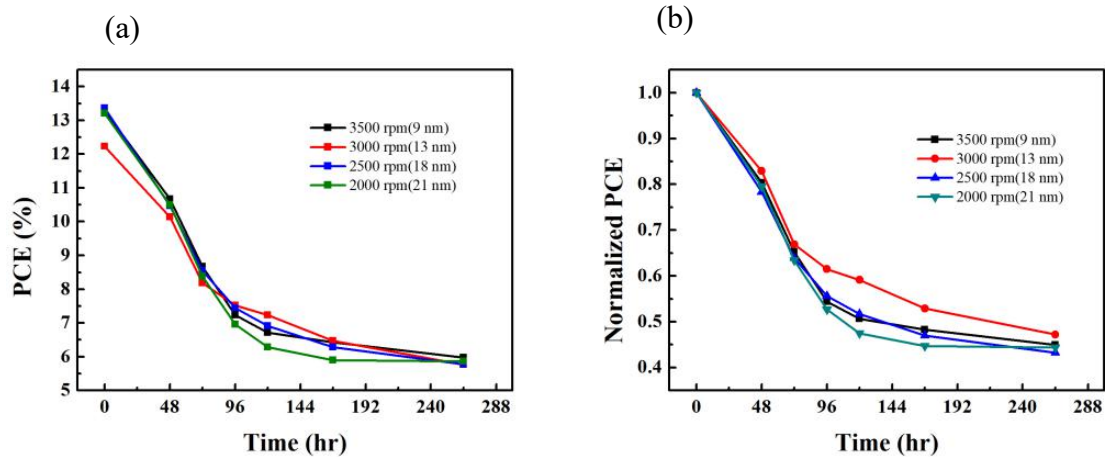


圖 4-3 單層鈍化層 C<sub>60</sub> 不同厚度元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現

表 4-2 單層鈍化層 C<sub>60</sub> 不同厚度元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化

Rotational speed(rpm)	C <sub>60</sub> Thickness (nm)	Time(hr)	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.	R-value
3500	9	Initial	13.84	13.29±0.31	25.33±0.5	0.84±0	0.63±0.01	1
		48	11.16	10.67±0.37	26.35±0.46	0.78±0	0.52±0.01	0.803
		72	9.49	8.67±0.46	23.97±0.39	0.74±0	0.49±0.02	0.652
		96	7.70	7.23±0.29	24.31±0.75	0.68±0	0.44±0.01	0.544
		120	7.35	6.72±0.37	24.53±0.47	0.65±0	0.42±0.02	0.506
		168	7.08	6.42±0.37	24.26±1.17	0.63±0	0.42±0.01	0.483
		264	6.65	5.97±0.34	23.61±0.55	0.62±0	0.41±0.01	0.449
3000	13	Initial	12.65	12.23±0.35	26.08±0.55	0.83±0	0.57±0.01	1
		48	10.49	10.14±0.40	26.12±0.69	0.76±0	0.51±0.02	0.829
		72	8.85	8.18±0.30	27.1±0.49	0.71±0	0.43±0.01	0.669
		96	7.73	7.52±0.21	26.48±0.42	0.68±0	0.42±0.01	0.615
		120	7.70	7.23±0.36	26.85±0.64	0.67±0	0.40±0.01	0.591
		168	6.87	6.47±0.29	25.45±0.78	0.64±0	0.39±0.02	0.529
		264	6.31	5.77±0.33	25.54±0.49	0.60±0	0.37±0.01	0.472
2500	18	Initial	13.63	13.37±0.19	25.18±0.49	0.84±0	0.64±0.02	1
		48	10.87	10.47±0.28	25.50±0.69	0.77±0	0.53±0	0.783
		72	9.03	8.55±0.35	23.77±0.29	0.74±0	0.48±0.01	0.639
		96	7.68	7.44±0.18	24.94±0.31	0.68±0	0.44±0	0.556
		120	7.21	6.91±0.21	25.02±0.37	0.65±0	0.42±0.01	0.517
		168	6.53	6.28±0.28	24.66±0.48	0.63±0	0.40±0.01	0.470
		264	5.92	5.78±0.18	23.61±0.6	0.62±0	0.39±0.01	0.432
2000	21	Initial	13.49	13.21±0.30	24.89±0.35	0.83±0	0.64±0.02	1
		48	11.12	10.50±0.37	26.65±0.69	0.76±0	0.52±0.02	0.795
		72	8.73	8.38±0.30	23.75±0.41	0.72±0	0.49±0.01	0.634
		96	7.15	6.96±0.27	25.54±0.31	0.52±0	1.12±1.53	0.527
		120	6.70	6.28±0.32	25.40±0.35	0.59±0	0.42±0.01	0.475
		168	6.61	5.90±0.48	25.13±1.13	0.59±0	0.40±0.02	0.447
		264	6.49	5.86±0.42	25.28±1.07	0.57±0	0.40±0.01	0.444

由上述實驗結果分析，儘管 13 nm(3000 rpm)的鈍化層 C<sub>60</sub> 元件初始光電轉換效率較低，但在經過 264 小時的紫外光照射後，其歸一化效率 (R) 值顯著高於其他厚度元件。因此，綜合考量元件的初始效率及紫外光穩定性，後續鈍化層 C<sub>60</sub> 的旋塗製程參數條件將制定為 3000 rpm。

#### 4.1.2 活性層添加不同 CN 濃度影響

有機太陽能電池 (OPV) 因其製程簡便、成本低廉及可撓性等優勢，在再生能源領域備受關注。PM6:Y6 二元系統作為高效能活性層材料，近年來已展現出優異的光電轉換效率。然而，活性層溶液的成膜品質對元件效能及穩定性具有關鍵影響。本研究旨在探討添加 CN 助溶劑對 PM6:Y6 二元系統活性層成膜品質的影響，並進一步分析不同 CN 濃度（未加、0.75%、1.5%）下，OPV 元件的光電轉換效率及使用壽命穩定性。透過實驗分析，本章節研究期望能優化活性層溶液的製備條件，進而提升 OPV 元件的整體效能與壽命。

為探討 CN 濃度對元件光電轉換效率 (PCE) 的影響，我們針對未添加 CN、添加 0.75% CN 及 1.5% CN 的三種元件進行 PCE 量測。初始量測結果如圖 4-4 及表 4-3 所示。由實驗數據顯示，活性層添加 0.75% CN 的元件具有最高的 PCE，達到 14.06%，而其他兩種元件的 PCE 均低於 14%。

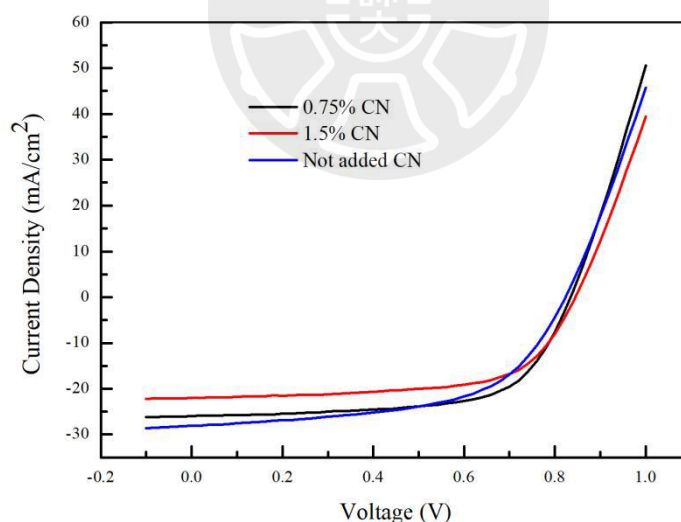


圖 4-4 活性層添加不同 CN 濃度 I-V 圖

表 4-3 活性層添加不同 CN 濃度初始效率

Process	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.
0.75% CN	14.06	13.84±0.22	26.13±0.22	0.84±0	0.63±0.01
1.5% CN	11.94	11.57±0.30	22.23±0.43	0.84±0	0.62±0.01
Not added CN	13.07	12.64±0.37	27.89±0.68	0.82±0	0.55±0.01

為探討活性層中不同 CN 濃度對元件紫外光穩定性的影響，我們持續以紫外光照射元件 504 小時，實驗數據如表 4-2 所示。觀察結果顯示，添加 0.75% CN 的元件在經過 504 小時紫外光照射後，其效率及歸一化效率壽命表現最佳（圖 4-5 及表 4-4）。因此，綜合考量元件的初始效率及紫外光穩定性，後續研究實驗將採用活性層添加 0.75% CN 助溶劑的旋塗製程條件。

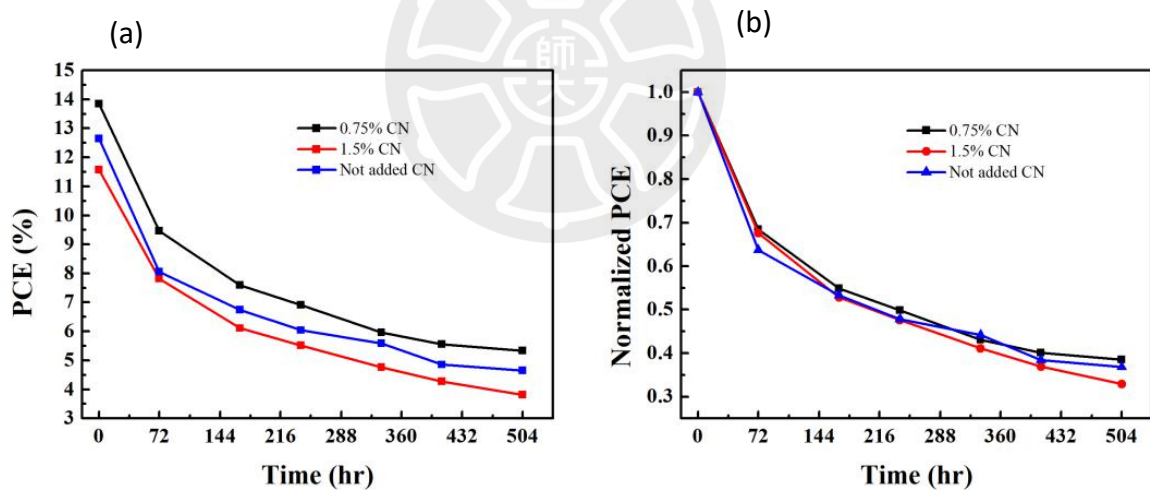


圖 4-5 活性層添加不同 CN 濃度元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現

表 4-4 活性層添加不同 CN 濃度元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化

Process	Time(hr)	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.	R-value
0.75% CN	Initial	14.06	13.84±0.22	26.13±0.22	0.84±0	0.63±0.01	1
	72	9.70	9.46±0.12	28.99±0.25	0.72±0	0.45±0	0.684
	168	7.98	7.60±0.38	27.89±0.48	0.66±0	0.41±0.01	0.549
	240	7.24	6.91±0.25	27.10±0.46	0.64±0	0.40±0.01	0.499
	336	6.20	5.96±0.27	26.42±0.80	0.60±0	0.38±0.01	0.431
	408	5.76	5.55±0.16	26.55±0.30	0.56±0	0.37±0	0.401
	504	5.80	5.33±0.27	25.66±0.36	0.58±0	0.36±0.01	0.385
1.5% CN	Initial	11.94	11.57±0.30	22.23±0.43	0.84±0	0.62±0.01	1
	72	8.09	7.82±0.21	24.5±0.15	0.71±0	0.45±0.01	0.676
	168	6.58	6.11±0.33	23.24±0.38	0.62±0	0.42±0.01	0.528
	240	5.99	5.51±0.36	22.85±0.43	0.59±0	0.41±0.01	0.476
	336	5.35	4.76±0.39	22.30±0.71	0.54±0	0.39±0.02	0.411
	408	4.57	4.27±0.27	21.55±0.46	0.52±0	0.38±0.01	0.369
	504	4.33	3.81±0.33	21.17±0.54	0.50±0	0.36±0.02	0.329
Not added CN	Initial	13.07	12.64±0.37	27.89±0.68	0.82±0	0.55±0.01	1
	72	8.46	8.05±0.25	27.45±0.56	0.72±0	0.41±0.01	0.637
	168	7.04	6.74±0.28	26.45±0.55	0.66±0	0.38±0	0.533
	240	6.26	6.04±0.25	26.02±0.42	0.63±0	0.37±0.01	0.478
	336	5.92	5.59±0.32	25.68±0.95	0.60±0	0.36±0.01	0.442
	408	5.13	4.85±0.27	24.54±0.21	0.58±0	0.34±0.02	0.384
	504	4.80	4.65±0.14	24.12±0.57	0.56±0	0.35±0.01	0.368

綜合 4.1.1 與 4.1.2 小節的實驗結果，我們確立了單層鈍化層 C<sub>60</sub> 的最佳製程條件：C<sub>60</sub> 厚度對應於 3000 rpm 的旋塗速率，活性層 (PM6:Y6) 中 CN 助溶劑的添加濃度為 0.75%。此條件下製備的元件將作為後續雙層鈍化層研究的標準對照組。接下來，我們將進一步探討雙層鈍化層結構是否能有效提升元件的紫外光穩定性。

#### 4.2 反式有機太陽能電池雙層鈍化層元件之紫外光穩定性改善研究

於上一章節所制定的單層 C<sub>60</sub> 鈍化層參數，以此作為後續雙層鈍化層研究的標準對照組。雙層鈍化層的研究將重點關注以下兩個方面：

1. 溶劑效應比較：探討不同溶劑對雙層 C<sub>60</sub> 鈍化層性能的影響，旨在優化雙層鈍化層的製程。

2. 穩定性提升研究：比較雙層 C<sub>60</sub> 鈍化層及雙層 C<sub>60</sub> 鈍化層與 PCBM 在提升元件紫外光照穩定性方面的效果，以期找到更有效的鈍化層材料。

本章節中元件結構為 ITO/ZnO/C<sub>60</sub>/C<sub>60</sub> 或 PCBM/PM6:Y6/MoO<sub>3</sub>/Ag，如圖 4-6 所示。

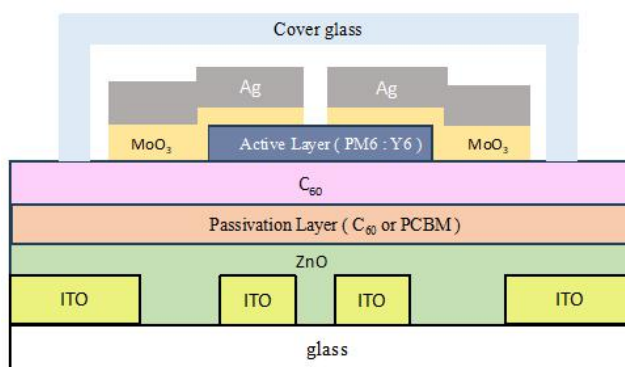


圖 4-6 反式有機太陽能電池雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 側面圖

#### 4.2.1 雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 添加不同溶劑的穩定性研究

由於 C<sub>60</sub> 在多數溶劑中的溶解度極低，因此溶劑的選擇對後續的雙層鈍化層製備至關重要。如表 4-5 所列之 C<sub>60</sub> 在常見有機溶劑中的溶解度數據，選用氯苯 (chlorobenzene, CB) 與鄰二氯苯 (1,2-dichlorobenzene, ODCB) 作為雙層鈍化層的溶劑，其單層鈍化層 C<sub>60</sub>(CB)溶液與 C<sub>60</sub>(ODCB)溶液 SEM 圖如圖 4-7 所示。

我們配製兩種 C<sub>60</sub> 溶液如下：

1. 氯苯(CB)溶劑配置 C<sub>60</sub> 溶液： C<sub>60</sub> 濃度為 3 mg/mL。
2. 鄰二氯苯(ODCB)溶劑配置 C<sub>60</sub> 溶液： C<sub>60</sub> 濃度為 16 mg/mL。

表 4-5 C<sub>60</sub> 在常見溶劑中之溶解度

Solvent	Solubility(mg/mL)
ethanol	0.001
chloroform	0.160
benzene	1.700
toluene	2.800
chlorobenzene	7.000
1,2-dichlorobenzene	27.000

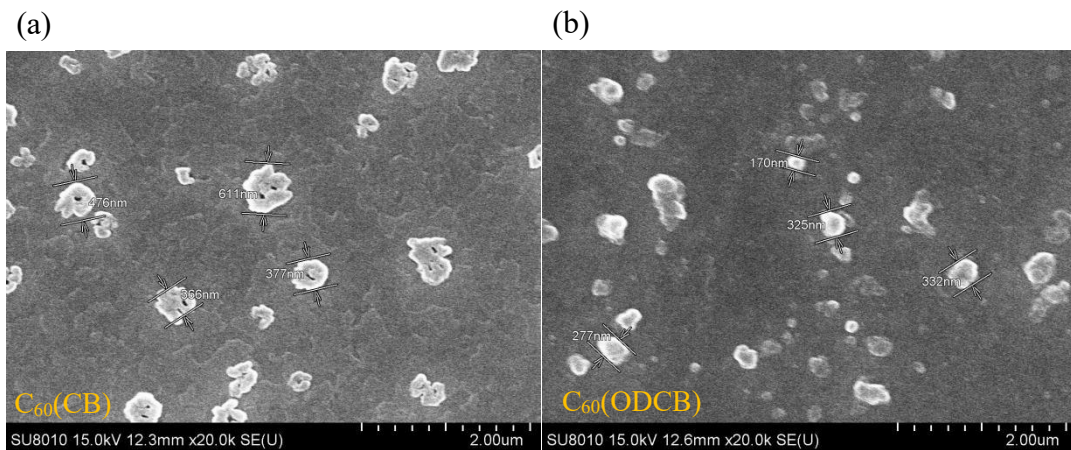


圖 4-7 不同溶劑之  $C_{60}$  溶液 SEM 圖(a) $C_{60}$ (CB)溶液(b) $C_{60}$ (ODCB)溶液

為探討不同溶劑對  $C_{60}$  鈍化層溶液性能的影響，我們製備以下元件：

1. 單層鈍化層標準片：單層  $C_{60}$  ODCB
2. 雙層鈍化層：雙層  $C_{60}$  ODCB、 $C_{60}$  ODCB /  $C_{60}$  CB、 $C_{60}$  CB /  $C_{60}$  ODCB、 $C_{60}$  CB /  $C_{60}$  CB

對上述元件進行光電轉換效率 (PCE) 的初始量測，結果如圖 4-8 與表 4-6 所示。數據顯示，雙層鈍化層  $C_{60}$  ODCB 與雙層鈍化層  $C_{60}$  CB 的元件初始 PCE 較單層鈍化層  $C_{60}$  ODCB 佳，其中雙層鈍化層  $C_{60}$  CB 的元件 PCE 達到 13.07%，顯著優於其他雙層元件。

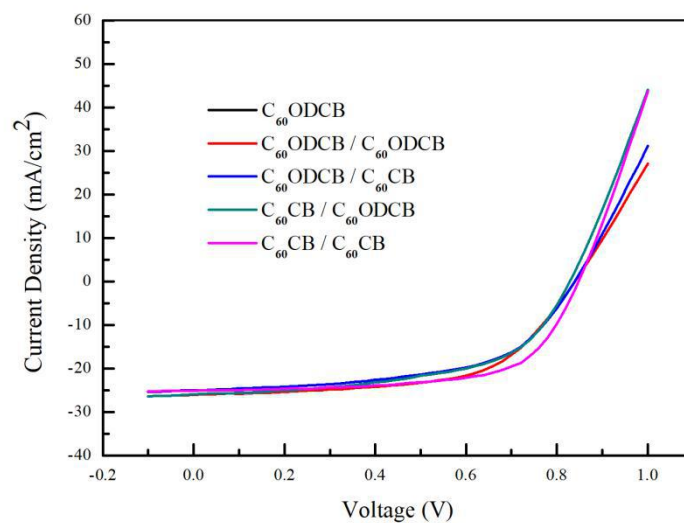


圖 4-8 不同溶劑之  $C_{60}$  溶液元件 I-V 圖

表 4-6 不同溶劑之 C<sub>60</sub> 溶液元件初始效率

Process	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.
C <sub>60</sub> ODCB	13.09	12.60±0.46	25.87±1.03	0.84±0	0.58±0.02
C <sub>60</sub> ODCB / C <sub>60</sub> ODCB	13.39	12.82±0.47	26.59±1.03	0.84±0	0.56±0.03
C <sub>60</sub> ODCB / C <sub>60</sub> CB	12.01	11.78±0.19	25.25±0.79	0.84±0	0.56±0.01
C <sub>60</sub> CB / C <sub>60</sub> ODCB	12.15	11.64±0.47	27.16±1.41	0.82±0	0.52±0.03
C <sub>60</sub> CB / C <sub>60</sub> CB	13.87	13.07±0.53	24.95±0.41	0.84±0	0.62±0.02

為了評估不同溶劑調配的雙層 C<sub>60</sub> 溶液元件在紫外線下的穩定性，我們將這些元件持續暴露於紫外光照射 504 小時，並記錄相關數據如表 4-7 所示。實驗結果揭示，使用 ODCB 溶劑製備的雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 溶液元件，在經過長時間的紫外線照射後，其性能衰減最少，展現出最高的效率和最佳的歸一化效率壽命，如圖 4-9 及表 4-7 所示。這一發現為後續深入研究雙層鈍化層的材料特性和應用潛力奠定了基礎。

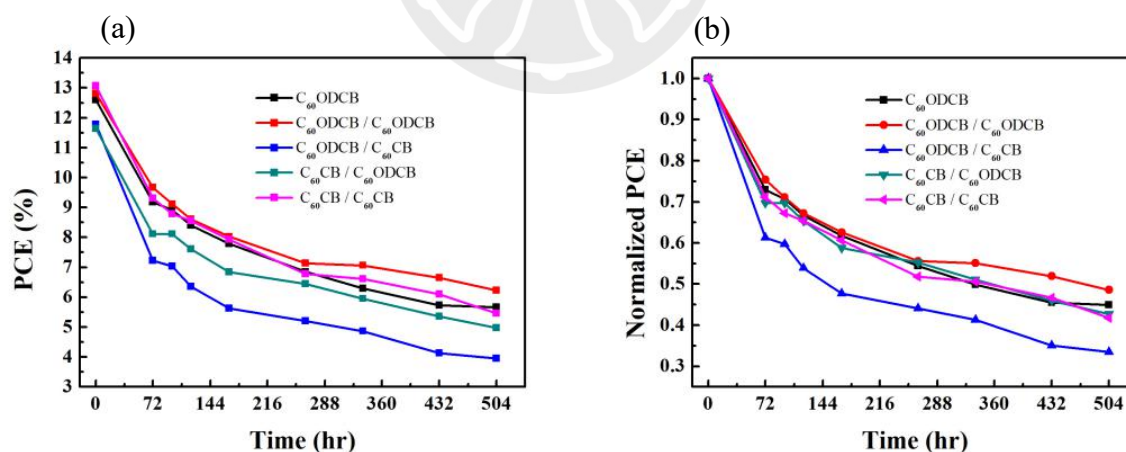


圖 4-9 不同溶劑之 C<sub>60</sub> 溶液元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現

表 4-7 不同溶劑之 C<sub>60</sub> 溶液元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化

Process	Time(hr)	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.	R-value
C <sub>60</sub> ODCB	Initial	13.09	12.60±0.46	25.87±1.03	0.84±0	0.58±0.02	1
	72	9.72	9.18±0.46	32.47±1.80	0.74±0	0.39±0.02	0.729
	96	9.57	8.91±0.45	31.91±2.56	0.72±0	0.39±0.02	0.707
	120	9.33	8.40±0.47	31.38±2.65	0.70±0	0.38±0.02	0.667
	168	8.59	7.79±0.48	31.28±2.64	0.68±0	0.37±0.02	0.618
	264	7.52	6.85±0.51	30.49±2.57	0.63±0	0.36±0.01	0.544
	336	6.81	6.29±0.35	30.51±2.30	0.61±0	0.34±0.02	0.499
	432	6.12	5.73±0.30	29.17±1.61	0.58±0	0.34±0.02	0.455
	504	6.00	5.66±0.40	29.10±1.06	0.55±0	0.35±0.01	0.449
C <sub>60</sub> ODCB / C <sub>60</sub> ODCB	Initial	13.39	12.82±0.47	26.59±1.03	0.84±0	0.56±0.03	1
	72	10.23	9.67±0.41	34.60±3.13	0.73±0	0.39±0.03	0.754
	96	9.55	9.11±0.44	34.11±2.60	0.71±0	0.38±0.03	0.711
	120	9.18	8.61±0.30	33.92±3.13	0.69±0	0.37±0.03	0.672
	168	8.44	8.02±0.36	33.30±2.51	0.66±0	0.36±0.03	0.626
	264	7.39	7.13±0.17	33.49±1.88	0.62±0	0.34±0.01	0.556
	336	7.39	7.06±0.34	32.83±2.28	0.61±0	0.35±0.02	0.551
	432	6.89	6.65±0.20	32.11±2.38	0.58±0	0.36±0.02	0.519
	504	6.43	6.23±0.17	30.96±1.80	0.57±0	0.35±0.02	0.486
C <sub>60</sub> ODCB / C <sub>60</sub> CB	Initial	12.01	11.78±0.19	25.25±0.79	0.84±0	0.56±0.01	1
	72	7.61	7.22±0.39	29.48±1.59	0.68±0	0.36±0.02	0.613
	96	7.38	7.03±0.33	30.80±2.29	0.64±0	0.36±0.02	0.597
	120	6.90	6.35±0.44	29.54±1.41	0.61±0	0.35±0.02	0.539
	168	6.16	5.62±0.40	28.8±1.64	0.57±0	0.34±0.01	0.477
	264	5.67	5.20±0.37	28.62±1.82	0.54±0	0.34±0.02	0.441
	336	5.14	4.86±0.29	28.00±2.10	0.52±0	0.33±0.01	0.413
	432	4.59	4.13±0.36	26.97±1.17	0.48±0	0.32±0.01	0.351
	504	4.43	3.95±0.47	26.24±1.18	0.47±0	0.32±0.02	0.335
C <sub>60</sub> CB / C <sub>60</sub> ODCB	Initial	12.15	11.64±0.47	27.16±1.41	0.82±0	0.52±0.03	1
	72	8.78	8.11±0.51	34.86±1.34	0.67±0	0.35±0.01	0.697
	96	8.45	8.11±0.31	32.92±2.94	0.69±0	0.36±0.02	0.697
	120	8.10	7.61±0.42	33.04±1.27	0.66±0	0.35±0.02	0.654
	168	7.35	6.84±0.31	32.4±2.61	0.61±0	0.35±0.02	0.588
	264	6.79	6.44±0.33	32.56±1.5	0.58±0	0.34±0.01	0.553
	336	6.38	5.95±0.37	34.01±0.38	0.54±0	0.33±0.01	0.511
	432	5.71	5.36±0.21	31.68±1.71	0.52±0	0.33±0.01	0.460
	504	5.37	4.97±0.41	31.73±1.36	0.49±0	0.32±0	0.427
C <sub>60</sub> CB / C <sub>60</sub> CB	Initial	13.87	13.07±0.53	24.95±0.41	0.84±0	0.62±0.02	1
	72	9.93	9.31±0.45	28.20±0.56	0.75±0	0.44±0.01	0.712
	96	9.49	8.78±0.37	28.42±0.45	0.73±0	0.42±0.01	0.672
	120	8.90	8.55±0.32	28.44±0.41	0.71±0	0.42±0.01	0.654
	168	8.35	7.92±0.33	28.42±1.12	0.69±0	0.41±0.01	0.606
	264	7.27	6.77±0.24	27.6±0.63	0.63±0	0.39±0.01	0.518
	336	6.90	6.61±0.23	28.11±0.51	0.61±0	0.39±0	0.506
	432	6.36	6.10±0.25	27.38±0.27	0.58±0	0.38±0.01	0.467
	504	5.71	5.46±0.23	26.35±0.49	0.56±0	0.37±0.01	0.418

#### 4.2.2 雙層鈍化層 C<sub>60</sub>、雙層鈍化層 C<sub>60</sub>與 PCBM 的穩定性比較研究

由 4.12 小節所示，雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 能顯著提升元件的紫外光穩定性。此章節將探討另一種鈍化層材料：PCBM(C<sub>60</sub> 衍生物)。PCBM 不僅對 ZnO 具有良好的鈍化效果，還能有效提升元件的電子傳輸特性。因此，本章節研究旨在探討雙層鈍化層，即 PCBM 疊加 C<sub>60</sub> 溶液，是否能進一步提升元件的紫外光穩定性。

PCBM 具有以下對鈍化 ZnO 的特性：

1. 電子傳輸增強：PCBM 能有效改善 ZnO 表面的電子傳輸，減少缺陷引起的載流子陷阱，從而提升元件的整體效能。
2. 表面鈍化：PCBM 能與 ZnO 表面形成良好的界面，減少表面缺陷，降低紫外光照射引起的材料降解。
3. 光吸收特性：PCBM 本身具有一定的光吸收能力，能進一步吸收紫外光，減少其對 ZnO 材料的損害。

透過結合 C<sub>60</sub> 的優異紫外光吸收能力和 PCBM 的電子傳輸增強及表面鈍化特性，我們期望雙層鈍化層 C<sub>60</sub> 與 PCBM 能實現更優異的元件紫外光穩定性。

為了評估雙層鈍化層中 C<sub>60</sub> 與 PCBM 對於提升元件紫外光穩定性的影響，我們製作兩種結構的元件：一種使用雙層 C<sub>60</sub> 溶液，另一種則採用 C<sub>60</sub> 溶液與 PCBM 的雙層鈍化層，另單層鈍化層 C<sub>60</sub> 溶液為標準片對照組。接著，我們對這些元件進行 PCE 的初始測試，初始量測結果如圖 4-10 及表 4-8 所示。實驗結果顯示，採用雙層 C<sub>60</sub> 溶液的元件表現出較佳的 PCE，數值達到 15.28%，而 C<sub>60</sub> 與 PCBM 雙層鈍化層元件，其 PCE 則相對較低。

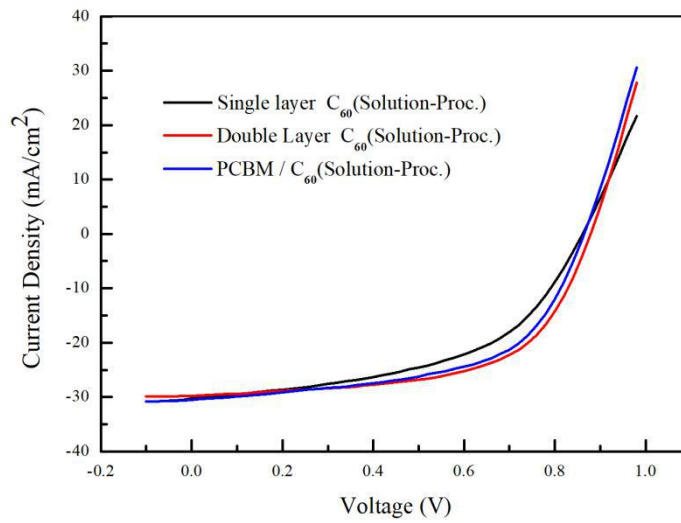


圖 4-10 不同的雙層鈦化層溶液元件 I-V 圖

表 4-8 不同的雙層鈦化層溶液元件初始效率

Process	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.
Single layer C <sub>60</sub> (Solution-Proc.)	14.52	13.69±0.44	27.51±1.65	0.87±0	0.58±0.04
Double Layer C <sub>60</sub> (Solution-Proc.)	15.67	15.28±0.59	29.85±0.57	0.87±0.01	0.59±0.03
PCBM / C <sub>60</sub> (Solution-Proc.)	15.09	14.24±0.44	30.57±0.70	0.86±0.01	0.54±0.01

為探討雙層鈦化層 PCBM 疊加 C<sub>60</sub> 元件對元件紫外光穩定性的影響，我們持續以紫外光照射元件 504 小時，實驗數據如表 4-9 所示。觀察結果顯示，雖然雙層鈦化層 C<sub>60</sub> 溶液的初始效率較高，但是元件在經過 504 小時紫外光照射後，雙層鈦化層 PCBM 與 C<sub>60</sub> 效率及歸一化效率壽命表現較佳（圖 4-11 及表 4-9），綜合考量元件的長期穩定性與實際應用需求，我們選擇具備較長壽命的 PCBM/C<sub>60</sub> 雙層鈦化層結構，作為後續製程優化和性能提升的重點。

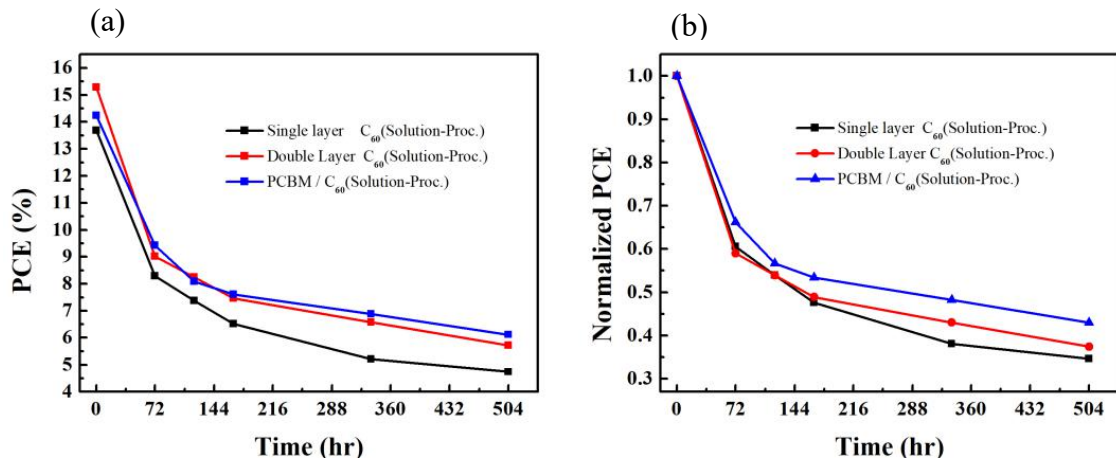


圖 4-11 不同的雙層鈦化層溶液元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現

表 4-9 不同的雙層鈦化層溶液元件隨時間在紫外光照射下之特性的變化

Process	Time(hr)	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.	R-value
Single layer C <sub>60</sub> (Solution-Proc.)	Initial	14.52	13.69±0.44	27.51±1.65	0.87±0	0.58±0.04	1
	72	8.90	8.29±0.47	29.61±1.71	0.7±0.02	0.40±0.02	0.606
	120	8.11	7.38±0.51	28.86±1.58	0.66±0.03	0.39±0.02	0.539
	168	6.88	6.52±0.27	28.81±1.79	0.61±0.03	0.37±0.01	0.476
	336	5.81	5.21±0.39	27.55±1.79	0.55±0.04	0.34±0.01	0.381
	504	5.08	4.74±0.19	26.76±1.45	0.52±0.03	0.34±0.01	0.346
Double Layer C <sub>60</sub> (Solution-Proc.)	Initial	15.67	15.28±0.59	29.85±0.57	0.87±0.01	0.59±0.03	1
	72	9.31	9.02±0.32	33.24±1.47	0.7±0.02	0.39±0.02	0.590
	120	8.87	8.24±0.41	32.72±1.38	0.66±0.02	0.38±0.02	0.539
	168	7.87	7.47±0.45	32.75±1.17	0.63±0.02	0.36±0.02	0.489
	336	7.05	6.57±0.43	31.31±1.27	0.59±0.01	0.35±0.01	0.430
	504	6.09	5.72±0.24	30.72±1.34	0.54±0.02	0.34±0.01	0.374
PCBM / C <sub>60</sub> (Solution-Proc.)	Initial	15.09	14.24±0.44	30.57±0.70	0.86±0.01	0.54±0.01	1
	72	9.75	9.42±0.24	33.59±1.74	0.70±0.01	0.40±0.02	0.662
	120	8.35	8.08±0.23	32.55±2.10	0.66±0.01	0.38±0.02	0.567
	168	8.23	7.61±0.43	32.49±3.09	0.63±0.01	0.38±0.02	0.534
	336	7.00	6.88±0.12	32.06±0.88	0.59±0.01	0.36±0.02	0.483
	504	6.86	6.12±0.48	32.15±1.70	0.54±0	0.35±0.01	0.430

我們將表 4-9 中的短路電流、開路電壓和填充因子，依照紫外光照射時間的變化，繪製成圖 4-12。從圖 4-12(a) 的短路電流變化趨勢中，觀察到一個的現象：雙層鈦化層的元件較單層鈦化層佳，在經過紫外光照射後，短路電流並未立即下降，反而呈現先上升後下降的趨勢。這種初期上升的現象，很可能是由於光浸潤效應所導致。光照會激發元件內的光載子傳輸，促使離子擴散和重新分布，從而減少界面電荷的累積，進而促進載子分離，最終使短路電流增加<sup>18</sup>。在後續的觀察中，我們發現經過 120 小時後，使用雙層鈦化層 C<sub>60</sub> 與 PCBM 的元件，其

短路電流( $J_{sc}$ )的下降趨勢相較於僅使用  $C_{60}$  溶液的雙層鈍化層元件更趨於穩定。此外，如圖 4-12(b)和圖 4-12(c)所示，在短時間 (72 小時) 內，紫外光的照射會導致開路電壓與填充因子出現明顯的急遽衰退。

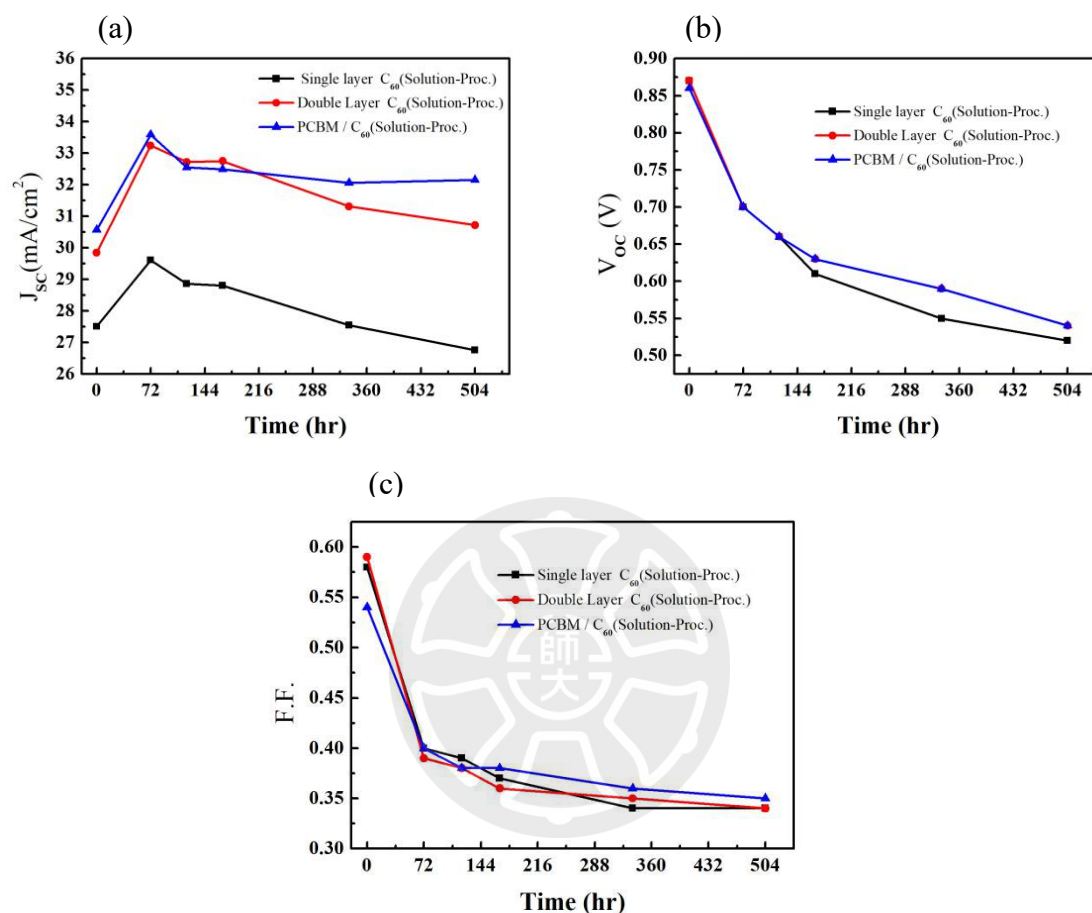


圖 4-12 不同的雙層鈍化層溶液元件隨時間在紫外光照射之(a)短路電流、(b)開路電壓、(c)填充因子變化

### 4.3 反式有機太陽能電池雙層鈍化層 $C_{60}$ 與 PCBM 優化製程改善

在 4.2.2 小節中，我們已驗證雙層鈍化層  $C_{60}$  與 PCBM 在提升元件紫外光穩定性方面的有效性。本小節將延續此研究方向，進一步探討 PCBM 鈍化層的濃度對元件性能的影響，旨在優化雙層鈍化層  $C_{60}$  與 PCBM 的製程參數，以期進一步提升元件的效率和穩定性。

#### 4.3.1 鈍化層 PCBM 濃度影響

PCBM 作為一種有效的電子傳輸和鈍化材料，其濃度對元件性能有著顯著的

影響。為了找到 PCBM 的最佳濃度，我們製備 PCBM 濃度分別為 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 的元件。

依據圖 4-13 和表 4-10 的初始量測結果，觀察到鈍化層 PCBM 濃度對元件性能的影響。具體而言，當 PCBM 為 5 mg/mL 時，元件展現出最佳的 PCE，數值達到 14.81%。此外，PCBM 濃度為 7.5 mg/mL 和 10 mg/mL 的元件也顯示出優異的性能，其 PCE 均超過 14%。

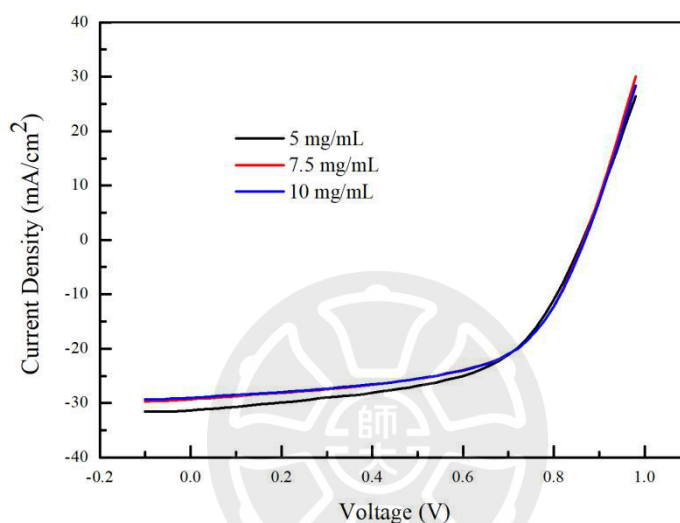


圖 4-13 PCBM 濃度 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 之元件 I-V 曲線圖

表 4-10 PCBM 濃度 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 之元件初始效率

PCBM Process	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.
5 mg/mL	15.27	14.81±0.23	30.20±1.12	0.87±0	0.57±0.02
7.5 mg/mL	14.88	14.03±0.51	30.30±1.41	0.86±0.01	0.54±0.03
10 mg/mL	14.90	14.38±0.51	29.72±1.49	0.87±0	0.56±0.03

後續，我們持續以紫外光照射元件 504 小時，藉此探討不同鈍化層 PCBM 濃度元件照射紫外光穩定度，實驗數據結果呈現於表 4-11。我們觀察發現，在 PCBM 濃度為 7.5 mg/mL 的元件於 504 小時經紫外光照射後，效率及歸一化效率壽命表現最佳，如圖 4-14 與表 4-11 所示。

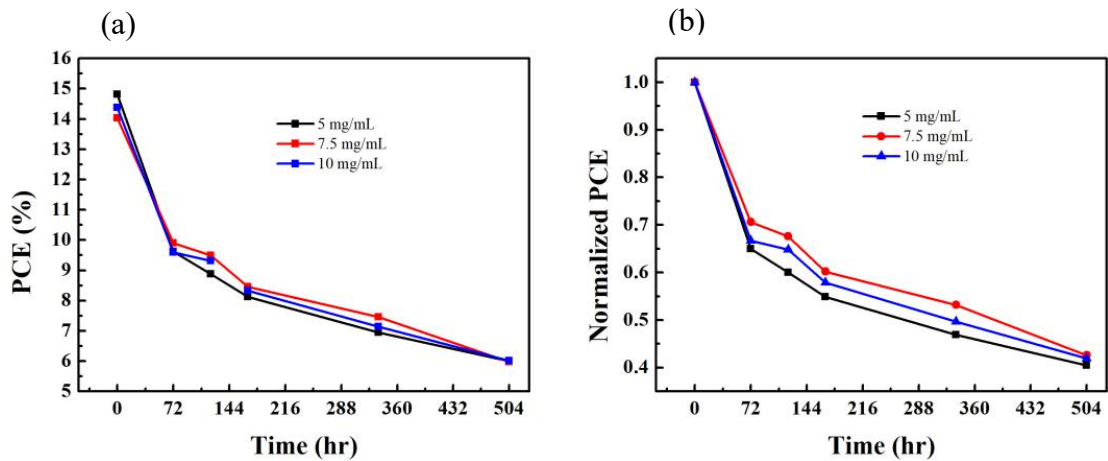


圖 4- 14 PCBM 濃度 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 元件之(a)效率及(b)歸一化效率壽命表現

表 4- 11 PCBM 濃度 5 mg/mL、7.5 mg/mL、10 mg/mL 元件隨時間在紫外光照射下之特性變化

PCBM Process	Time(hr)	Best PCE (%)	PCE (%)	JSC (mA/cm <sup>2</sup> )	VOC (V)	F. F.	R-value
5 mg/mL	Initial	15.27	14.81±0.23	30.20±1.12	0.87±0	0.57±0.02	1
	72	10.22	9.62±0.33	36.64±1.52	0.70±0.01	0.37±0.01	0.650
	120	9.45	8.88±0.41	36.91±1.96	0.66±0.01	0.36±0.02	0.600
	168	8.71	8.13±0.41	35.22±1.58	0.65±0.01	0.36±0	0.549
	336	7.44	6.95±0.38	33.15±1.61	0.60±0.01	0.35±0.01	0.469
	504	6.29	6.00±0.23	32.93±1.08	0.54±0.01	0.34±0.01	0.405
7.5 mg/mL	Initial	14.88	14.03±0.51	30.30±1.41	0.86±0.01	0.54±0.03	1
	72	10.25	9.90±0.31	36.65±2.04	0.72±0.01	0.38±0.01	0.706
	120	9.83	9.49±0.22	37.49±1.82	0.68±0.01	0.37±0.01	0.676
	168	8.66	8.45±0.20	34.91±1.69	0.66±0.01	0.37±0.01	0.602
	336	7.99	7.46±0.28	33.72±1.91	0.62±0.01	0.36±0.01	0.532
	504	6.31	5.97±0.28	32.49±1.09	0.55±0	0.34±0.01	0.426
10 mg/mL	Initial	14.90	14.38±0.51	29.72±1.49	0.87±0	0.56±0.03	1
	72	10.17	9.59±0.53	37.74±1.40	0.70±0.02	0.37±0.02	0.667
	120	10.01	9.32±0.50	38.63±1.63	0.66±0.02	0.36±0	0.648
	168	8.94	8.33±0.55	36.72±1.38	0.64±0.02	0.36±0.01	0.579
	336	7.77	7.14±0.49	34.18±1.10	0.60±0.02	0.35±0.01	0.497
	504	6.72	6.02±0.50	33.81±1.29	0.53±0.02	0.33±0.01	0.419

最後，本論文研究發現元件初始的  $J_{SC}$  數據存在浮動性，最高可達  $30 \text{ mA/cm}^2$ 。我們觀察到，在材料中添加  $C_{60}$  後， $J_{SC}$  值會呈現偏高的趨勢。此一現象為未來的研究提供了重要的方向，可以更進一步探討  $C_{60}$  材料對於  $J_{SC}$  數據影響的具體機制。

## 第五章、結論與未來展望

有機太陽能電池的最終應用場域為戶外，因此本研究採用紫外光照射元件，模擬太陽光照射下的情況，藉此探討元件對紫外光壽命。相較於過去研究多在氮氣環境中進行量測，本研究於室溫紫外燈箱中進行照射後量測，更貼近實際應用情境。

首先，我們先制定單層鈰化層 C<sub>60</sub> 溶液製程參數，作為後續研究的標準對照組。接著，探討不同溶劑對雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 溶液的影響，實驗結果顯示，以 ODCB 溶劑製備的雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 溶液元件效果最佳。而後，我們發現使用 C<sub>60</sub> 溶液與 PCBM 材料作為雙層鈰化層，相較於雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 溶液，更能有效提升紫外光照射下的元件穩定性，經過 504 小時紫外光照射後，單層鈰化層 C<sub>60</sub> 溶液元件之效率衰減至 5.08%，而雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 溶液與 PCBM 元件之效率衰減至 6.86%，其保有 43% 的初始效率值。基於此發現，我們進一步優化雙層鈰化層 C<sub>60</sub> 溶液與 PCBM 的製程，PCBM 濃度為 7.5 mg/mL 使其壽命表現更為優異。

在未來研究方向上，針對元件於紫外光照射 72 小時內效率快速衰減的問題，可著重於探索新型鈰化層材料或優化鈰化層結構，以期提升元件的紫外光穩定性。此外，本研究已驗證雙層鈰化層的有效性，未來可進一步探索其他雙層鈰化層結構，以實現更優異的元件性能和穩定性。最後，本研究主要聚焦於小面積元件的性能優化，未來可將研究成果應用於大面積模組元件的製備，以加速有機太陽能電池的商業化進程。

## 參考文獻

1. Bi, P., Zhang, S., Wang, J., Ren, J., & Hou, J. (2021). Progress in organic solar cells: materials, physics and device engineering. *Chinese Journal of Chemistry*, 39(9), 2607-2625.
2. Sun, L., Fukuda, K., & Someya, T. (2022). Recent progress in solution-processed flexible organic photovoltaics. *npj Flexible Electronics*, 6(1), 89.
3. Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2022). A review on organic photovoltaic cell. *International Journal of Energy Research*, 46(13), 17813-17828.
4. Öner, İ. V., Yilmaz, E. Ç., Yesilyurt, M. K., Ömeroglu, G., & Özakin, A. N. (2017). Operational stability and degradation of organic solar cells. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 5(2).
5. Dipta, S. S., Schoenlaub, J., Rahaman, M. H., & Uddin, A. (2022). Estimating the potential for semitransparent organic solar cells in agrophotovoltaic greenhouses. *Applied Energy*, 328, 120208.
6. Rhaman, M. M., & Matin, M. A. (2015, December). Organic Solar Cells: Historical developments and challenges. In *2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)* (pp. 26-29). IEEE.
7. Chen, K., Cao, T., Sun, Z., Wang, D., Chen, N., & Li, Y. (2018). Performance enhancement of perovskite solar cells through interfacial engineering: Water-soluble fullereneol C60 (OH) 16 as interfacial modification layer. *Organic Electronics*, 62, 327-334.
8. Chen, G. L., Wang, S. H., Tseng, K. W., Huang, C. I., & Wang, L. (2025). Highly Stable Organic Solar Cells with Robust Interface Using Fullereneol as Molecular Linker. *Journal of Materials Chemistry A*.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ta/d4ta07254e>
9. Antolín, E., Urieta-Mora, J., Molina-Ontoria, A., & Martín, N. (2024). Organic Solar Cells: Principles, materials and working mechanism. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 101893.
10. Qi, B., & Wang, J. (2013). Fill factor in organic solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(23), 8972-8982.
11. Yu, R., Wu, G., & Tan, Z. A. (2021). Realization of high performance for PM6: Y6 based organic photovoltaic cells. *Journal of Energy Chemistry*, 61, 29-46.
12. Guo, Q., Guo, Q., Geng, Y., Tang, A., Zhang, M., Du, M., ... & Zhou, E. (2021). Recent advances in PM6: Y6-based organic solar cells. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(8), 3257-3280.
13. Yuan, J., Zhang, Y., Zhou, L., Zhang, G., Yip, H. L., Lau, T. K., ... & Zou, Y.

- (2019). Single-junction organic solar cell with over 15% efficiency using fused-ring acceptor with electron-deficient core. *Joule*, 3(4), 1140-1151.
- 14 Li, Y., Huang, W., Zhao, D., Wang, L., Jiao, Z., Huang, Q., ... & Yuan, G. (2022). Recent progress in organic solar cells: a review on materials from acceptor to donor. *Molecules*, 27(6), 1800.
15. He, X., Chan, C. C., Kim, J., Liu, H., Su, C. J., Jeng, U. S., ... & Choy, W. C. (2022). 1-Chloronaphthalene-induced donor/acceptor vertical distribution and carrier dynamics changes in nonfullerene organic solar cells and the governed mechanism. *Small methods*, 6(3), 2101475.
16. Jao, M. H., Liao, H. C., & Su, W. F. (2016). Achieving a high fill factor for organic solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(16), 5784-5801.
17. Ruoff, R. S., Tse, D. S., Malhotra, R., & Lorents, D. C. (1993). Solubility of fullerene (C60) in a variety of solvents. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(13), 3379-3383.
18. Lin, L., Yang, L., Du, G., Li, X., Li, Y. N., Deng, J., ... & Zhang, J. (2023). Light soaking effects in perovskite solar cells: mechanism, impacts, and elimination. *ACS Applied Energy Materials*, 6(20), 10303-10318.

