

# 臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

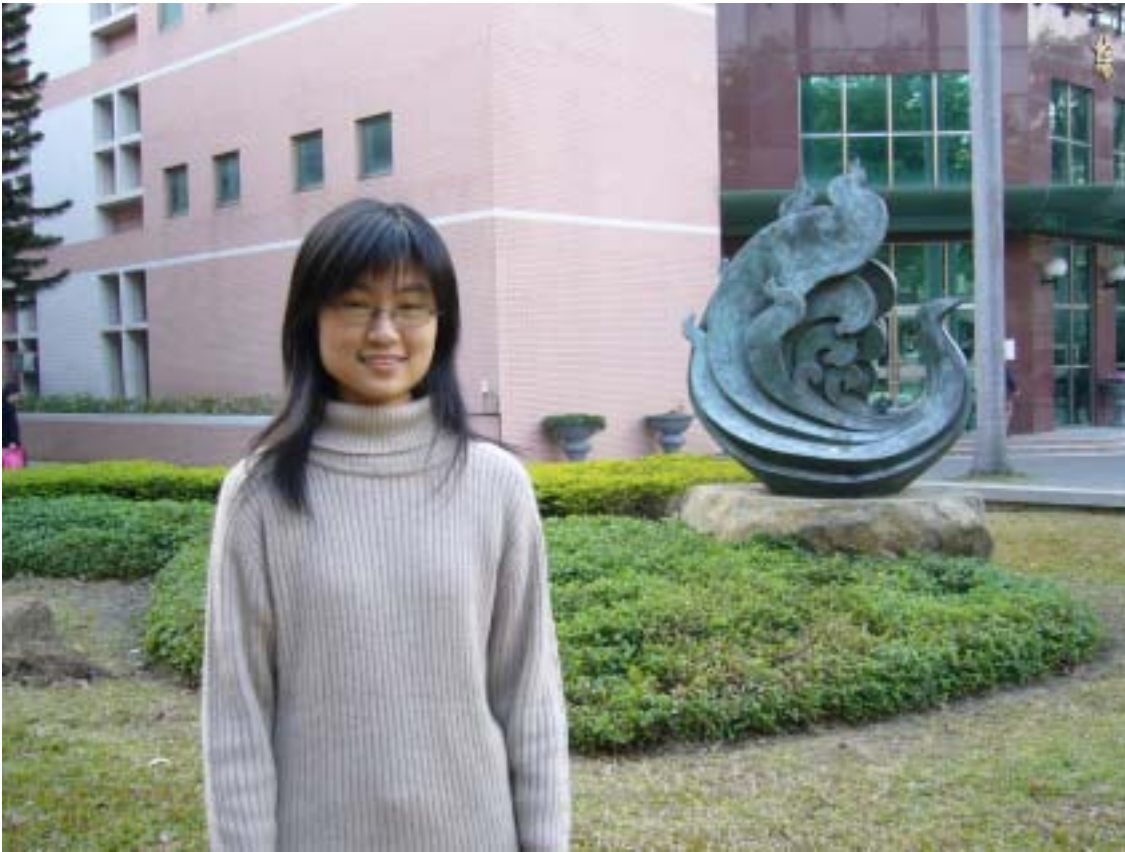
科 別：化學

作 品 名 稱：天然植物色素與人工染料敏化之太陽能電池

得 獎 獎 項：佳作

學校 / 作者：國立臺中女子高級中學  
國立臺中女子高級中學

徐敏賀  
劉映君



我是台中女中二年級的學生徐敏賀，喜歡彈鋼琴、畫畫、寫自己的文字。當然，做實驗、嘗試各種儀器、充實科學新知也為我所喜愛。在這次作科展的過程中，我學習到了很多，除了良好的實驗習慣與實驗精神，以及化學方面的知識，我更學習到了如何與夥伴、學長學姊、教授相處，還有如何忍受挫折、再接再厲。期望自己在未來能不斷進步，成為一名優秀的「科學人」。



我叫劉映君，從小就是個樂觀開朗，好奇心旺盛且愛問問題的小孩。今年高二，興趣很廣泛，喜歡看電影、游泳、跳舞，和看他人的文字：) 這次做國際科展，給我很難忘的回憶。從從一開始構思題目，找尋指導教授，到真正進入實驗室，每一步都是既新奇又堅難卻也充滿了挑戰性。學會如何迅速表達自己的想法，與人溝通，介紹自己，與教授師長間的應對，化解衝突，體會在真實實驗中很多不可行的現實因素，以及因為想要了解更多所以積極尋找該方面的資料而吸收，與老師學長同伴間的腦力激盪，無時無刻都有新的問題產生，再訓練統整能力，將舊有的想法與新得到的啟示結合在一起成為新的架構...等等，當然還有難忘的爆肝趕報告，再在都是非常寶貴且富裕的一課。我從中學習到身為一名科學家（有點誇大）的偉大與存在感，不論這次挑戰中的名次為何，我都已得到最寶貴的知識了！

# 目錄

壹、中英文摘要.....	<u>1</u>
貳、研究動機.....	<u>3</u>
參、研究目的.....	<u>5</u>
肆、研究設備及器材.....	<u>7</u>
伍、研究過程或方法.....	<u>9</u>
陸、研究結果.....	<u>21</u>
柒、討論.....	<u>31</u>
捌、結論.....	<u>45</u>
玖、參考資料及其他.....	<u>46</u>
拾、附錄	

# 天然植物色素與人工染料敏化之太陽能電池

## 摘要

本實驗以吸附染料之二氧化鈦奈米結構電極層為承載基材的太陽能電池為研究對象，旨在增進其光電轉換效率，促使染料有效地吸收光能後造成電荷分離，再經由二氧化鈦傳導帶向外傳出而形成電流，即所謂染料敏化太陽能電池。實驗主軸共分三：

- 1、合成染料 N3：觀察吸附度與浸泡時間之關係，發現在 18~20 小時電池有最佳吸附；改變電解液濃度，求得最佳電解液濃度範圍；酸化二氧化鈦極板。
- 2、天然植物色素：改變溶劑，得出高極性之丙酮對電池最佳；酸、鹼化植物色素；觀察電池隨著光照時間增加，性質趨於穩定。
- 3、混合色素與染料：此實驗旨在印證不同吸能範圍之染料在極板混合浸泡後，電池吸能帶是否有疊加、擴充的效果，並觀察分開浸泡與混合色素一起浸泡之不同效應，量測 IPCE 以茲比較。實驗結果可知，確實對於電池吸光範圍有所增加，且分開浸泡之效果較好。

# Photosynthetic Pigments and Ruthenium(II) -Complexed Dye-Sensitized Solar Cell

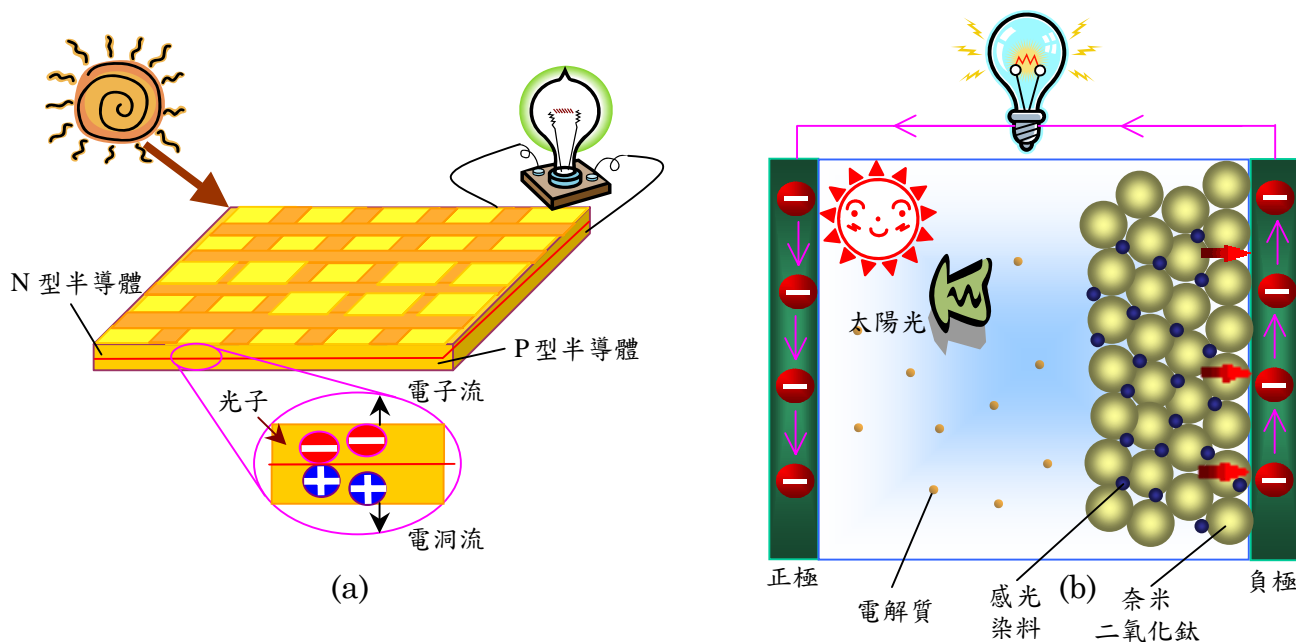
## *Abstract*

This experiment is mainly about the photosensitization of TiO<sub>2</sub> solar cell, aiming at improving the energy conversion efficiency, promoting the electric charge to separate from TiO<sub>2</sub> and spread out through after the dye absorbs light. That is so-called dye-sensitized solar cell. The experiment mainly divides into three parts:

1. Ruthenium(II): Observing the connection between adsorption and dipped-time, find out that solar cell has best to adsorb in 18 to 20 hours; change the concentration of electrolyte; acidification TiO<sub>2</sub>.
2. Photosynthetic pigments: Change solvent, and get the conclusion that pigment has better adsorption in high polar solvents such as acetone; acidification/basification pigments; observe the changing of energy conversion efficiency while the illumination time increases.
3. Mixed the dye and pigment: This experiment is aim at proofing that the absorption spectrum of soaked-TiO<sub>2</sub> may mix after dipped in different dye and pigment. Furthermore, we compares the differences between TiO<sub>2</sub> dipped in one mix solution and dipped in several solutions separately, measure its IPCE. According to the experiment, the spectrum of soaked-TiO<sub>2</sub> is certainly larger, and dipping in solution separately has better effect to the battery.

## 壹、研究動機

高一上化學課的時候，老師曾經提及太陽能電池（solar battery）係以矽或鍺單晶製成之 P-N 半導體將太陽能變成電能，是一種物理性電池，不過目前化學家在太陽能電池的研究領域也不遑多讓，利用奈米二氧化鈦做成多孔薄膜，再製成染料感光薄膜電池，開啟了奈米材料應用於太陽能電池的先端，也渴望取代既昂貴、笨重之以矽或鍺為主的太陽能電池。



圖一 傳統性太陽能電池(a)和奈米二氧化鈦之太陽能電池(b)的示意圖

我們對此一主題非常好奇，主要原因如下：

- 一、目前地球能源短缺，使用了將近一世紀的石化能源將近枯竭，燃料儲存量預估在一、二世紀內就會被用完。且石油價格日漸抬升，和十年前的油價相比約漲了約 10 元/升左右，石化能源運用後所產生的二氧化碳等氣體也造成了溫室效應等環境負荷，尋找、開發及應用新的能源已成為勢在必行。
- 二、太陽能是地球最清淨、最經濟且最易獲得的能量來源。太陽光每年照到地球上的能量約有  $3 \times 10^{24}$  焦耳，相當於人類每年大約消耗能量的 10000 倍。換句話說，我們只要能將照到地球上的所有太陽能的 0.1%，利用轉換效率 10% 的太陽能電池，把光能轉換為化學能或電能，就足以提供現今人類能源的使用了，因此目前許多有關能源危機的研究也朝太陽能應用的方向進行。

三、矽晶太陽能電池使得太陽能的應用不再成為空談，然而卻面臨價格昂貴、難以普及的問題，因此發展價格低廉、容易取得的電池，將有助於解決這個問題。染料敏化太陽能電池正符合此需求，相較於傳統的半導體太陽能電池，用以製作染料敏化太陽能電池的  $\text{TiO}_2$  既無毒，價格又便宜，相信未來有機會成為具競爭力的能源，但目前其效率不盡理想，有待改良。

四、有鑑於製成染料敏化太陽能電池的染料多為人工合成，相較於人工合成染料，把天然植物色素作為染料敏化太陽能電池的染料更符合「回歸自然」、「取之於自然」的環保理念，尤其天然色素取得方便，成本便宜，適合大功率之大面積太陽能電池的製作，因此我們想尋找可代替人工染料的天然色素；又植物光合作用的電子傳遞鏈與電池機制有相似之處，所以用葉綠素、花青素等天然的植物色素作為染料，製作染料敏化太陽能電池。



## 貳、研究目的

### 一、合成染料敏化太陽能電池

- (一)觀察染料之吸附度變化，推測其吸附飽和點，以決定最佳浸泡時間。
- (二)比較不同電解液組成，試圖找出最佳電解液組成的比例。
- (三)酸化  $\text{TiO}_2$  電極，其對效率的影響。

### 二、天然色素敏化太陽能電池

- (一)採用不同極性之有機溶劑浸泡色素，觀察其對電池性質的影響。
- (二)觀察酸、鹼化色素對電池的影響。
- (三)觀察照光時間對電池的影響。

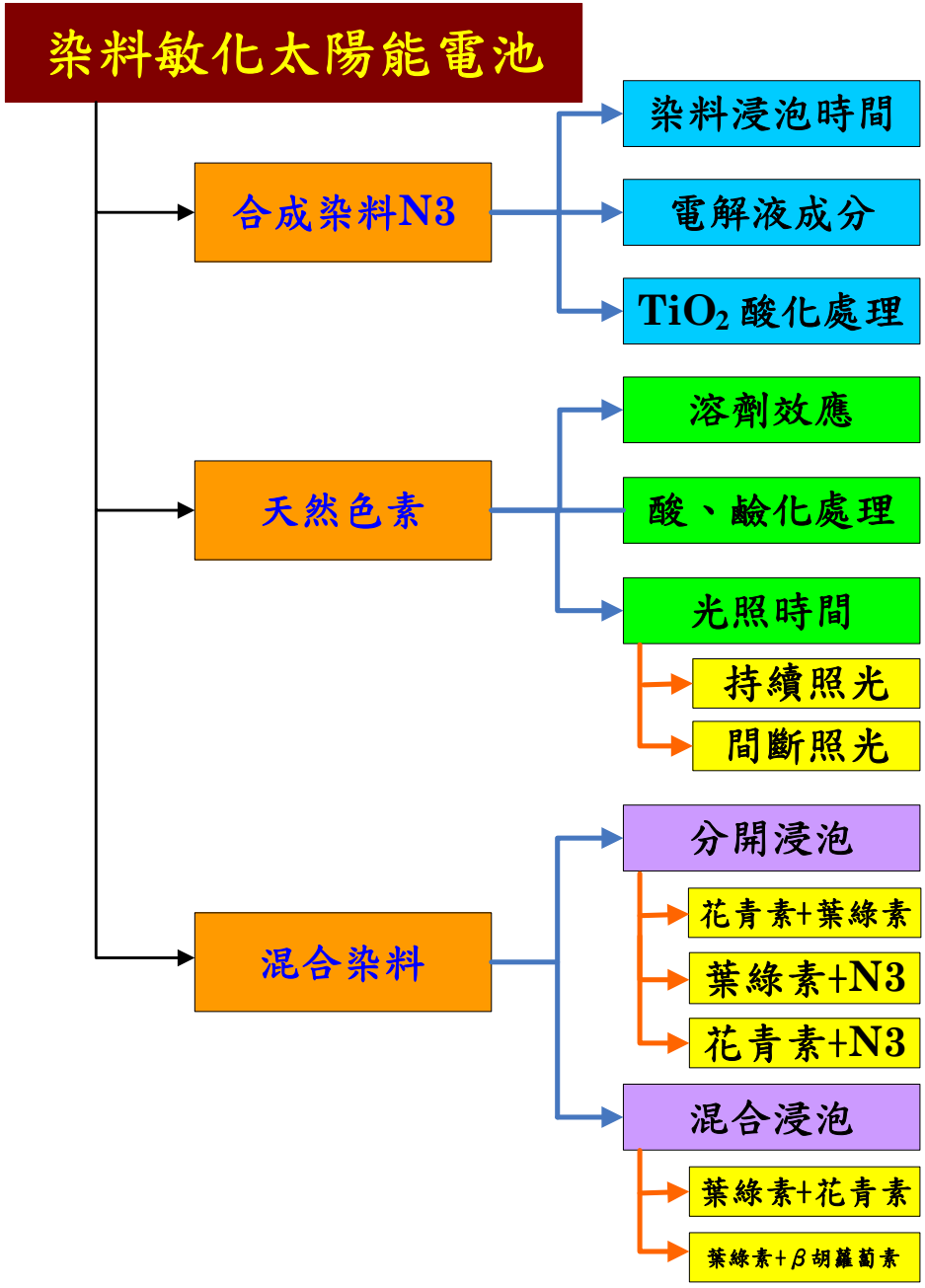
### 三、觀察混合染料之吸收光譜、光電流光譜 (IPCE) 以及光電轉換效率 ( $\eta$ )，以驗證具有光譜互補性的混合染料之光譜範圍與電池光吸收效率的關係。

#### (一)分開浸泡

- 1、花青素+葉綠素
- 2、葉綠素+N3
- 3、花青素+N3

#### (二)混合浸泡

- 1、葉綠素+花青素
- 2、葉綠素+ $\beta$ 胡蘿蔔素



圖二 實驗架構

## 參、研究設備及器材

### 一、器材

- (一)光源及 AM1.5 太陽光濾鏡，Oriel 66924 Arc lamp source with 6266 450W Xe lamp, and Oriel 81088 Air Mass 1.5 Global Filter
- (二)單光器，Oriel Cornerstone 130 1/8m Monochromator
- (三)旋轉式真空抽氣機，EYEVVA Rotary vacuum evaporation
- (四)澳製覆有 TiO<sub>2</sub> 膜的導電玻璃，買自於澳洲澳大利亞國際永續技術公司(Sustainable Technology International, STI)，厚度為 15 微米
- (五)導電玻璃（澳製 FTO，購自 STI 公司）與鉑電極
- (六)超音波震盪器
- (七)旋轉塗布機（spin-coating instrument）
- (八)功率測量儀（power meter）
- (九)三用電表
- (十)電壓電流計
- (十一)磁石攪拌機/加熱板
- (十二)電源供應器（Source Meter）：Keithley 2400

### 二、藥品

- (一) N3 染料(( cis-di(thiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) 系列化合物))，購自工研院及 solaronix 公司
- (二)電解液
  1. 碘化鋰/碘 (LiI/I<sub>2</sub>)
  2. 第三丁基吡啶 (tert-butylpyridine, TBPY)
  3. 戊腈 (Valeronitrile, VCN)
  4. 乙腈 (acetonitrile, CH<sub>3</sub>CN(ACN))
  5. 3-甲基-2-噁唑啉酮 (3-methyl-2-oxazolidinone, NMO)
  6. 碘化丁基甲基咪唑啶 (butylmethylimidazolium iodide, BMII)

(四)丙酮、乙醇、甲醇、乙醚、正己烷等有機溶劑

(五)鹽酸、氫氧化鈉、醋酸、氨水

(六)從菠菜葉、紫高麗菜葉、茂谷極柑，提製自製葉綠素、花青素、 $\beta$ -胡蘿蔔素

(七)液態氮

### 三、檢測儀器

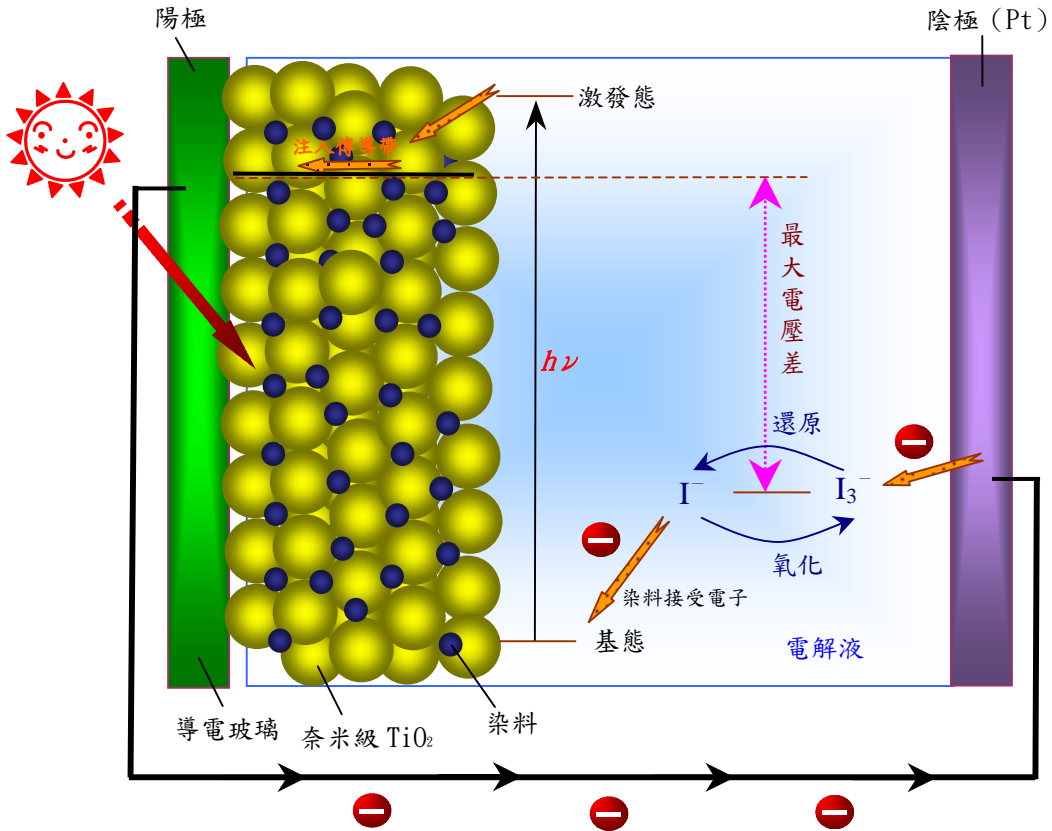
紫外線/可見光光譜儀(UV/Vis)，型號 Hitachi U-3310 UV-Vis spectrophotometer

JASCO V570 UV/Vis/NIR Spectrophotometer with Integrated Sphere

## 肆、研究過程及方法

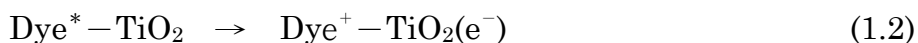
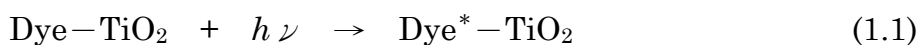
### 一、實驗原理

#### (一)染料敏化太陽能電池 (dye-sensitized solar cell) 原理



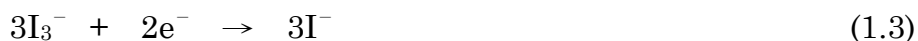
圖三 染料敏化太陽能電池示意圖

此光敏性染料電池主要是利用奈米級顆粒大小的  $\text{TiO}_2$  結晶層，均勻塗布在一片透明的導電玻璃 (FTO) 上，接著將染料吸附在  $\text{TiO}_2$  膜。這些奈米結構的  $\text{TiO}_2$  電極層，因為具有多孔洞特性而提高它的表面積，比起單層的  $\text{TiO}_2$  電極層，它大大的增加了染料的吸附量。 $\text{TiO}_2$  是一個半導體，它的價帶與傳導帶間的能階差約為  $3.2\text{eV}$ 。當吸附於其上的染料吸收光能後，電子會由原先的基態被激發而至激發態，此時位於激發態電子的能階，超過  $\text{TiO}_2$  半導體傳導帶的能階，因此電子就由染料上注入至  $\text{TiO}_2$  的傳導帶，並藉由外電路向外導出：



而向外導出的電子流至陰極時，便由電解液中的三碘錯離子 ( $\text{I}_3^-$ ) 產生還原反應形成

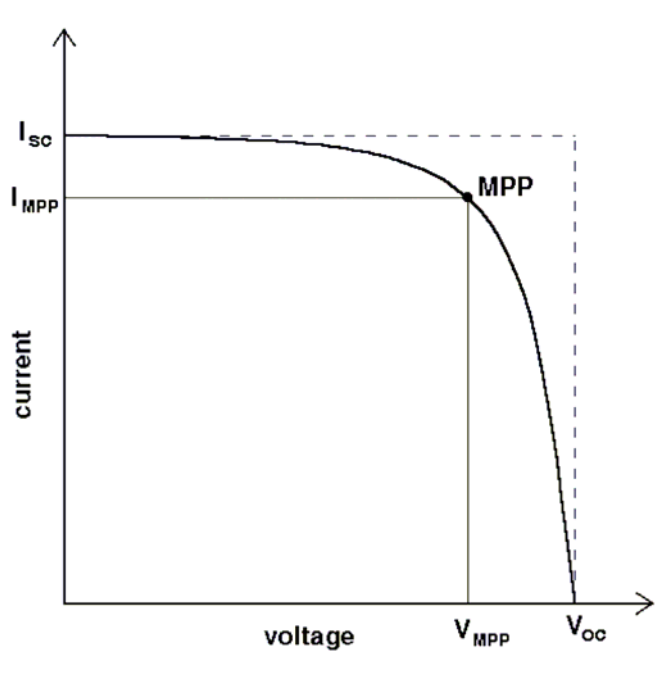
碘離子(I<sup>-</sup>)，已變成氧化態的染料分子就會與電解液中的碘離子(I<sup>-</sup>)產生還原反應而回到原本基態的分子：



如此一來，整個太陽能電池便會形成一個循環的通路，不會中斷，整個光敏性染料電池也可以重複的再運作。其中，電解液中的 I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup> 更是扮演著重要的平衡電荷之角色，可以使電池吸光後不斷的循環而產生源源不絕的電流。此種電池和 70 年代的太陽能電池最大的不同點在於使用奈米大小的 TiO<sub>2</sub>，使得吸附的光敏劑大大增加吸光率，以提升效率。

## (二) 太陽能電池效率之計算

本實驗使用 Oriel 的 450W 氙燈，搭配 AM 1.5 太陽光濾鏡，模擬太陽光(AM 值 = 1/cos θ，θ 為太陽與天頂的夾角，AM 1.5 即為 θ = 48.19°)。測量時光強度為 100 mW/cm<sup>2</sup>，即一日光強度。然後，利用 Keithley 2400 電源供應器，輸出不同電壓值，並測量不同電壓下的電流值，可得電池的電壓-電流曲線。



$$ff = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

$$P_{max} = ff \times I_{sc} \times V_{oc}$$

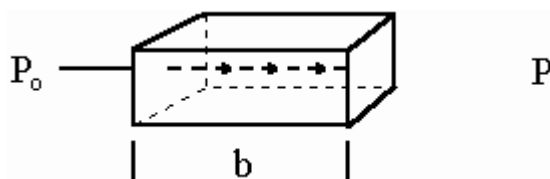
$$\text{Efficiency } \eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot ff}{P_{input}}$$

圖四 電壓-電流曲線圖 (N3 染料敏化太陽能電池)

由電壓-電流曲線可得到幾個太陽能電池的性質，包括短路電流(short circuit current,  $I_{sc}$ )，開路電壓(open circuit current,  $V_{oc}$ )，最大功率 ( $P_{max}$ )，填滿因子(Fill Factor,  $ff$ )以及光電轉換效率(light-to-electric energy conversion efficiency,  $\eta$ )等。短路電流  $I_{sc}$  為外加電壓為零時的電流值，開路電壓  $V_{oc}$  則為電流為零時的外加電壓值，最大功率 ( $P_{max}$ ) 即為電壓電流值相乘後的最大值，代表電池所能提供的最大功率。填滿因子 ( $ff$ ) 為最大功率除以開路電壓與短路電流的乘積，理論上最大值為 1。電池效率  $\eta$  則為最大功率除以照光的功率，代表光電轉換能量的效率。

### (三)吸收度之計算

設一束輻射能率為  $P_0$  之平行輻射線，垂直投射於長方形物體（固體、液體或氣體）面上，經途徑長  $b$ ，因受物體吸收而使能率減為  $P$ ，如下圖所示：



透過試料之輻射能率 ( $P$ ) 與入射試料之輻射能率 ( $P_0$ ) 之比值稱為透過率 ( $T$ , transmittance)：

$$T = P / P_0 \quad (1)$$

又定義吸收度， $A$  (absorbance) 為：

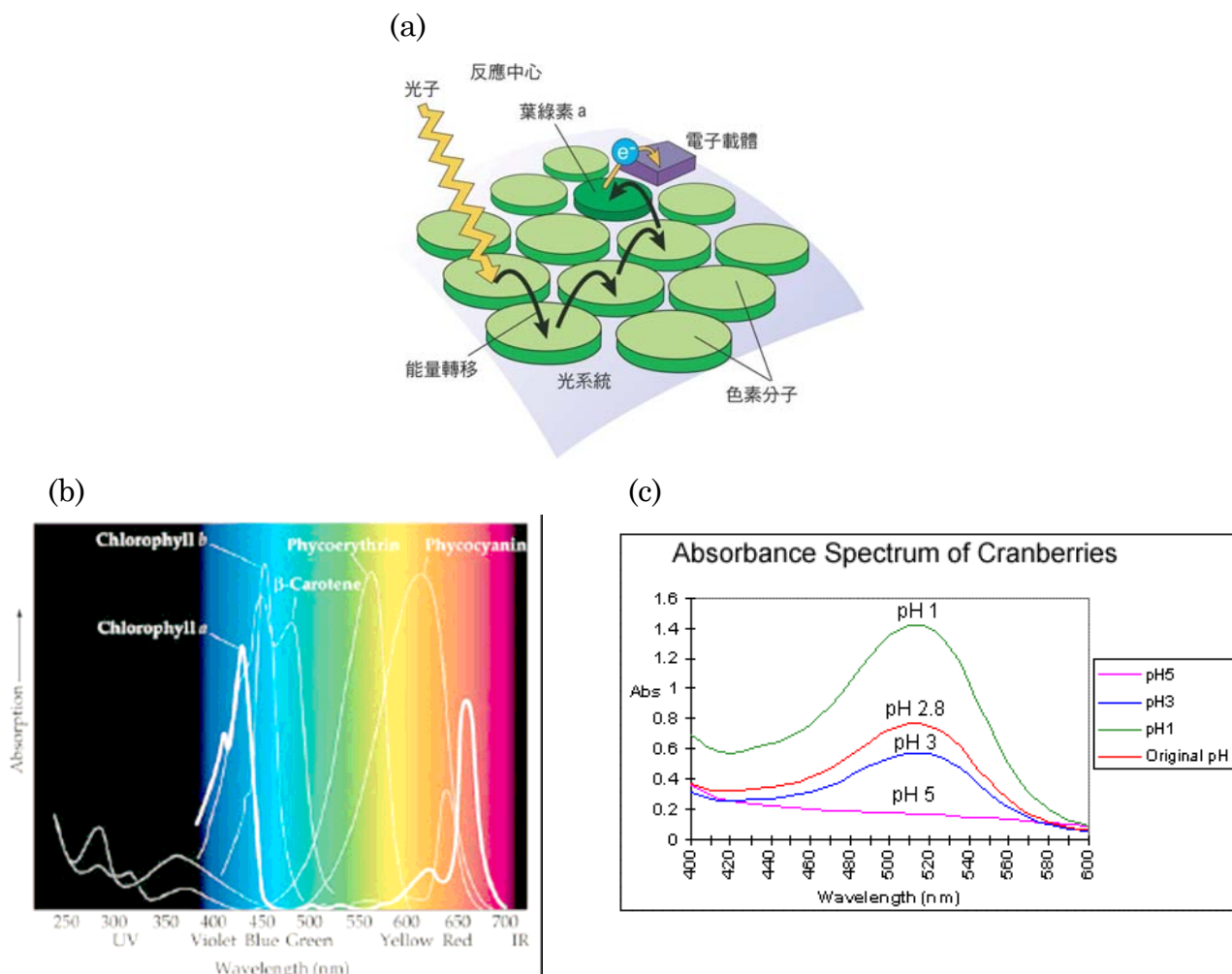
$$A = -\log T \quad (2)$$

$$A = e \times b \times c \quad (3)$$

式 (3) 稱為比爾吸收定律，其中， $e$  為莫耳吸收係數 (molar absorptivity)，單位為  $\text{cm}^{-1} \times \text{M}^{-1}$ ； $b$  為光通過容槽之路徑長度，單位為  $\text{cm}$ ； $c$  為濃度，單位為  $\text{M}$ ；此定律只適用於低濃度範圍。當所測物種之莫耳吸收係數以及光之路徑長度為已知

時，則由該物種在分析波長的吸收度，可計算出該物種之體積莫耳濃度。或者，使用一系列已知濃度的標準試樣，測其在分析波長下的吸收度，以吸收度對濃度作圖，可得一校準曲線；繼而測定未知試樣之吸收度，利用上述校準曲線，也可求得未知試樣的濃度。

#### (四)光合作用 (photosynthesis) 之光反應原理



圖五 (a)光合作用之光系統 (b)葉綠素與(c)花青素之 UV-Vis 吸收光譜

光合作用中的光系統 (photo system)，包含了反應中心主要色素 (葉綠素 a) 及輔助色素 (葉綠素 b、葉黃素、胡蘿蔔素)。在植物體中，葉綠素 a 吸收光能後激發高能電子，並轉移至電子傳遞鏈以合成 ATP 供暗反應使用。在本實驗中則預期葉綠素 a 所激發的高能電子流入二氧化鈦膜中，經外電路流至 Pt 電極，再經電解液的自身氧化還原反應平衡電荷，並使氧化態的葉綠素恢復至還原態，而形成一流通迴路。



## 二、實驗步驟與流程

### (一) 染料敏化太陽能電池基本操作

1. 清洗導電玻璃：以拭鏡紙沾酒精擦拭玻璃後，將玻璃放入超音波震盪器中，分別以水、清潔劑和乙醇充分震盪清洗，接著夾出擦乾後，再把乾燥之玻璃放入電漿洗淨器中洗淨。
2. Pt 電極的製作：清洗玻璃後，進行旋轉塗布(spin-coating)。塗布方法係用幫浦吸住玻璃，使其旋轉，並滴上一滴鉑化合物( $\text{H}_2\text{PtCl}_6$ )，讓它均勻的分布在玻璃的表面上。接著將塗上鉑化合物的玻璃放入高溫爐中加熱至  $400^\circ\text{C}$ ，玻璃上即有鉑析出。
3. 電解液  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$  的配製：秤量 0.0635 克  $\text{I}_2$ 、0.0669 克  $\text{LiI}$ 、0.0338 克 TBPY、0.7985 克 BMII、2.25 毫升 VCN、2.25 毫升 ACN、0.5 毫升 NMO，以超音波震盪得 5 毫升電解液（原濃度）。



圖六 電解液的配製

4. 製作基本的染料敏化太陽能電池：二氧化鈦模板，放入 N3 染料浸泡。利用透明膜割成口字型圍住二氧化鈦，並以 Pt 電極模板蓋住透明膜。人工染料敏化太陽能電池以熱熔封裝，天然染料敏化太陽能電池則直接以黑色文書夾夾住固定，注入電解液。使用 Oriel 的 450W 氙燈，搭配 AM 1.5 太陽光濾鏡，模擬太陽光為光源，利用 Keithley 2400 電源供應器測出短路電流及開路電壓，並算出電池效率。
5. 染料敏化太陽能電池光電轉換效率 ( $\eta$ ) 的測定：
  - (1) 以氙燈為光源，以濾鏡模擬太陽光，將二氧化鈦電極一面朝向光源，夾上黑色

鱈魚夾（負極），Pt 電極則夾上紅色鱈魚夾（正極），前方置一面積決定器。

模擬太陽光之光強度為  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ，由 power meter 於面積決定器之後方測得總光強度為  $12.56\text{mW}$ ，回推得二氧化鈦照光面積為  $0.1256\text{ cm}^2$ 。

(2) 連接電壓電流計，測量太陽能電池的電壓及功率，並以電壓電流計連接電腦，數據輸入電腦中，利用 origin 軟體進行數據處理，如圖七(a)。

6. 染料敏化太陽能電池之光電流作用光譜 (photocurrent action spectra) 的測定：

(1) 以氬燈為光源，透過單波儀將全光分成單一波長之光線，於光前置一面積決定器，以功率測量儀 (power meter)、每  $10\text{nm}$  波長為單位，測量面積決定器後方之光強度，紀錄下來。

(2) 於面積決定器後方置上電池，二氧化鈦電極一面朝向光源，夾上黑色鱈魚夾(負極)，Pt 電極則夾上紅色鱈魚夾（正極），用膠帶固定住電池。再度以單波儀每  $10\text{nm}$  打出單波光，讀取各波長下電壓電流計顯示之電流值，紀錄下來。

(3) 將光強度與電流值輸入電腦，利用 origin 軟體進行數據處理，可得各波長下電池之 IPCE 值 (incident photon to current efficiency)。

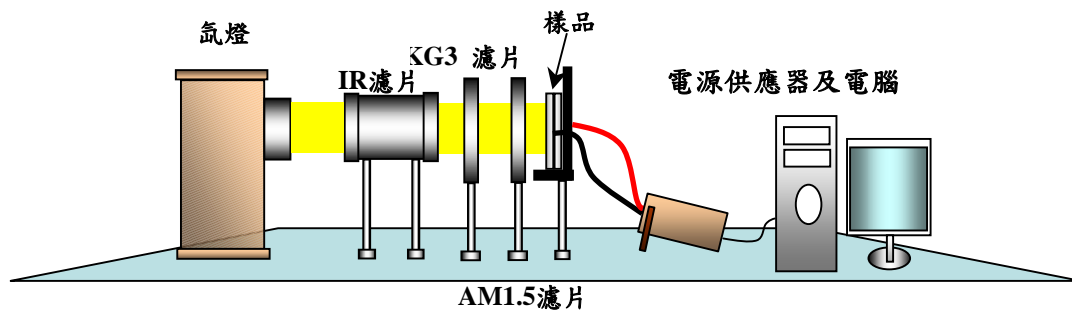
※以下為 IPCE 之公式；

其意義為，在單一波長下，將所接收到的光子數轉換成電子數的效率。

其中光子數的測量是首先以 power meter 測量其光電流，再予以轉換。

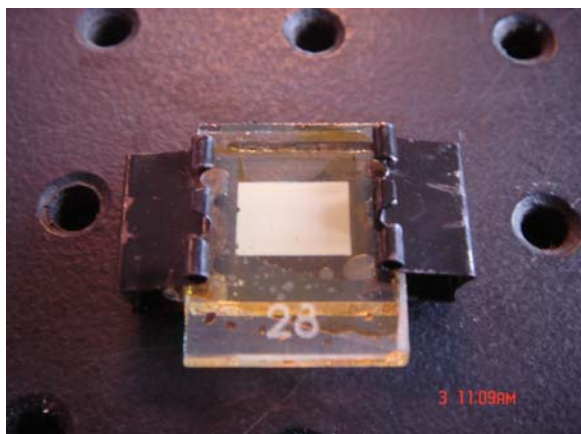
$$\text{IPCE} = \frac{[(1.25 \times 10^3) \times \text{photocurrent density } [\mu\text{A}/\text{cm}^2]]}{[\text{wavelength } [\text{nm}] \times \text{photon flux } [\text{W}/\text{m}^2]]}$$

(a)

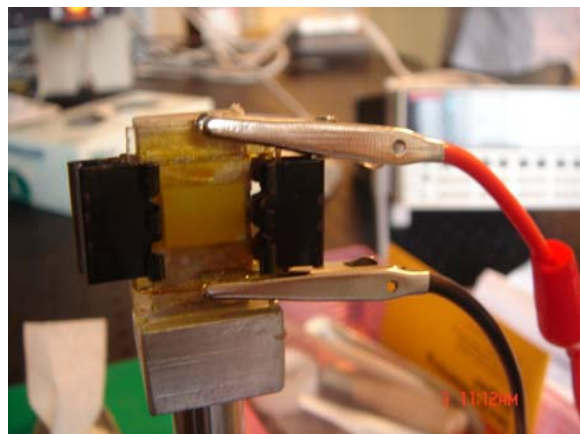


圖七(a) 測定電壓-電流曲線之太陽光模擬光源及相關裝置示意圖

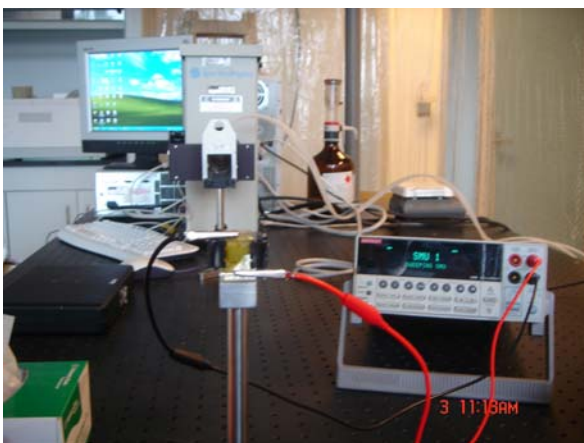
(b)



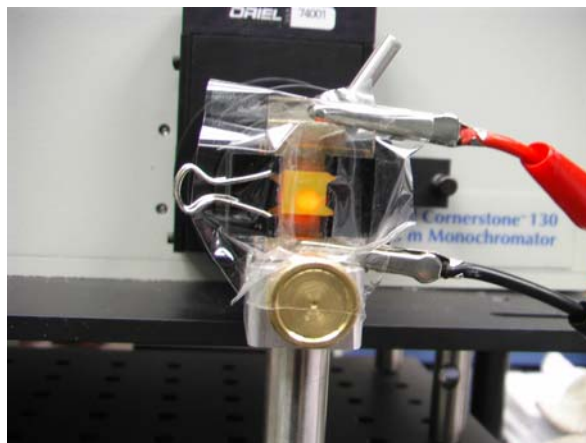
(c)



(d)



(e)



圖七 (b)染料敏化太陽能電池之完成品

(c)、(d)為測定電壓-電流曲線之裝置、(e)為測量光電流光譜之裝置

## (二)人工染料敏化太陽能電池

1. 染料 N3 的配製：稱量 0.021 克 N3，加入 100ml 的乙醇，以超音波震盪均勻後得之。
2. 二氧化鈦模板浸泡時間長短實驗：
  - (1) 量測效率：取二氧化鈦模板，分別浸泡 N3 染料 2 小時、6 小時、10 小時、14 小時、18 小時、22 小時，取出後製成電池測效率。
  - (2) 量測吸附度：重複上述步驟，取出後以 0.01M 之  $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$  浸泡 2 小時，待洗下吸附於二氧化鈦電極上之 N3 染料後，以  $3 \times 10^{-5} \text{ M}$ （原濃度稀釋十倍）之 N3 作標準吸收值，測量其 UV-Vis 吸收光譜，由比爾定律（Beer's Law）計算出洗下之溶液濃度，進一步回推吸附率。
3. 電解液組成實驗：
  - (1) 電解液  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$  的配製

標準電解液：稱量 0.0635 克  $\text{I}_2$ 、0.0669 克 LiI、0.0338 克 TBPY、0.7985 克 BMII、2.25 毫升 VCN、2.25 毫升 ACN、0.5 毫升 NMO，以超音波震盪得 5 毫升電解液 standard。

    - ①第一組（以碘化鋰 LiI 為變因）
      - a. 稱量 0.0635 克  $\text{I}_2$ 、0.1339 克 LiI、0.0338 克 TBPY、0.7985 克 BMII、2.25 毫升 VCN、2.25 毫升 ACN、0.5 毫升 NMO，以超音波震盪得 5 毫升電解液 a。
      - b. 如同 a 組成，除了碘化鋰改為 0.2008 克，記為電解液 b。
      - c. 如同 a 組成，除了碘化鋰改為 0.2676 克，記為電解液 c。
      - d. 如同 a 組成，除了碘化鋰改為 0.3345 克，記為電解液 d。
      - e. 如同 a 組成，除了碘化鋰改為 0.4014 克，記為電解液 e。
    - ②第二組（以第三丁基吡啶 TBPY 為變因）
      - f. 稱量 0.0635 克  $\text{I}_2$ 、0.0669 克 LiI、0.0101 克 TBPY、0.7985 克 BMII、2.25 毫升 VCN、2.25 毫升 ACN、0.5 毫升 NMO，以超音波震盪得 5 毫升電解液 f。

- g. 如同 f 組成，除了第三丁基吡啶改為 0.0135 克，記為電解液 g。
- h. 如同 f 組成，除了第三丁基吡啶改為 0.0169 克，記為電解液 h。
- i. 如同 f 組成，除了第三丁基吡啶改為 0.0676 克，記為電解液 i。
- j. 如同 f 組成，除了第三丁基吡啶改為 0.0845 克，記為電解液 j。

③第三組（以碘化丁基甲基咪唑啉 BMII 為變因）

- k. 稱量 0.0635 克 I<sub>2</sub>、0.0669 克 LiI、0.0338 克 TBPY、1.1976 克 BMII、2.25 毫升 VCN、2.25 毫升 ACN、0.5 毫升 NMO，以超音波震盪得 5 毫升電解液 k。
- l. 如同 k 組成，除了碘化丁基甲基咪唑啉改為 1.5968 克，記為電解液 l。
- m. 如同 k 組成，除了碘化丁基甲基咪唑啉改為 1.9960 克，記為電解液 m。
- o. 如同 k 組成，除了碘化丁基甲基咪唑啉改為 2.3952 克，記為電解液 o。
- p. 如同 k 組成，除了碘化丁基甲基咪唑啉改為 2.7944 克，記為電解液 p。

④第四組

- q. 稱量 0.0635 克 I<sub>2</sub>、0.0669 克 LiI、2.25 毫升 VCN、2.25 毫升 ACN、0.5 毫升 NMO，以超音波震盪得 5 毫升電解液 q。

(2) 取二氧化鈦模板，放入 N3 染料浸泡 20 小時，製成電池分別加入 standard、a~q 之電解液，測效率。

(3) 放置 1 小時後，重新灌入電解液，再測一次效率。

4. 二氧化鈦電極酸化實驗：將二氧化鈦模板放入鹽酸溶液中浸泡，兩小時後取出模板。最後使玻璃浸入 N3 中 20 小時，製成電池測效率。

(三)天然染料敏化太陽能電池

1. 萃取葉綠素：摘下葉綠素葉片，以預冷之逆滲透水（RO water）清洗，拭乾後切碎菠菜葉片置於研鉢中加入液態氮研磨至菠菜成綠色粉末狀，每 1 克菠菜粉末加入 5mL 丙酮，震盪攪拌 24 小時後，過濾掉 2~4 層表面的纖維狀物，將濾液於 12000G 之重力下離心 20 分鐘，取上清液。

※ 全程皆須操作於黑暗、4°C 之環境中進行實驗

2. 萃取花青素：取適量花青素以逆滲透水（RO water）清洗，切碎後加入適量去

離子水與花青素以  $90^{\circ}\text{C}$  共煮，至水呈深紫色。待其冷卻後以濾紙過濾即得花青入溶液。

3. 萃取  $\beta$ 胡蘿蔔素：除去椗柑之皮及膜，收集果肉，以杵及研鉢磨碎，以  $1\text{mL/g}$  之比例加入丙酮與正己烷等體積混合之溶液，震盪攪拌 2.5 小時，取出上清液(含正己烷與  $\beta$ 胡蘿蔔素)，以濾紙過濾即得  $\beta$ 胡蘿蔔素。



4. 溶劑效應實驗：利用旋轉式真空抽氣機將以丙酮萃取之葉綠素溶液抽乾，得葉綠素粉末。取等量粉末分別加入 20mL 丙酮、乙醇、甲醇、乙醚、正己烷，將二氧化鈦模板放入其中，浸泡 20 小時後製成電池，量測效率。



5. 酸化和鹼化天然色素實驗：各取兩份 8.5mL 葉綠素與花青素，分別加入 18M 醋酸溶液及 18M 氨水溶液 0.5mL，製成 1M 之酸/鹼化色素溶液，將二氧化鈦模板放入其中，浸泡 20 小時後製成電池，量測效率。



6. 光照時間實驗：將二氧化鈦模板放入葉綠素中，浸泡 20 小時後製成電池，分別以 Oriel 的 450W 氙燈，搭配 AM 1.5 太陽光濾鏡，模擬太陽光為光源 ( $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ) 照光。

(1) 持續照光：照光 0、2、3、8、11、15、21、25、120 分鐘後，測量其效率。

(2) 間斷照光：

間隔五分鐘不照光，然後持續照光五分鐘，再間隔五分鐘、照光五分鐘，持續三小時。照光時每分鐘測效率。

7. 天然染料敏化太陽能電池之色素吸附度量測：因為天然色素不如人工染料可直接洗下，所以先測量浸泡二氧化碳模板前色素之 UV-Vis 吸收光譜，待取出電極再量測浸泡二氧化碳模板後色素之 UV-Vis 吸收光譜，分別以比爾定律算出溶液濃

度後再相減、除以浸泡前之濃度，即得吸附度。

#### (四)混合染料敏化太陽能電池

##### 1. 分開浸泡實驗：

- (1) 葉綠素與 N3：將二氧化鈦模板浸泡葉綠素 12 小時，再浸泡 N3 溶液 12 小時，取出後製成電池。
- (2) 花青素與 N3：將二氧化鈦模板浸泡花青素 12 小時，再浸泡 N3 溶液 12 小時，取出後製成電池。



- (3) 花青素與葉綠素：將二氧化鈦模板浸泡花青素 12 小時，再浸泡葉綠素 12 小時，取出後製成電池，
- (4) 測(1)~(3)之 IPCE，並於一小時後，測量效率。

##### 2. 浸泡混合色素實驗：

- (1) 葉綠素與花青素：利用旋轉式真空抽氣機將葉綠素及花青素溶液抽乾，量取 0.06g 葉綠素四份，分別加入花青素 0g、0.02g、0.06g、0.18g，以及丙酮 8mL，將二氧化鈦模板放入其中，浸泡 20 小時後製成電池，測其 IPCE，並於一小時後，測量效率。
- (2) 葉綠素與  $\beta$ 胡蘿蔔素：分別取 4mL 葉綠素與  $\beta$ 胡蘿蔔素混合，再取  $\beta$ 胡蘿蔔素 8mL 作對照組，將二氧化鈦模板放入此兩種溶液中，浸泡 20 小時後製成電池，量測效率。

(五)誤差值計算：當數據較少時，常利用標準偏差 (standard deviation) 來表示測量的

不標準度。其標準偏差的算法如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

而以統計學的觀點而言，對於重複的量度，通常有 68% 的重複測量數據落在平均值加減一個標準差內 ( $\pm \sigma$ )。



## 伍、研究結果

### 一、N3 染料敏化太陽能電池之變因探討

#### (一) 浸泡時間對電池的影響

我們把二氧化鈦模板浸泡 N3 染料中，當浸泡不同時間時，測量電池性質。

表一 染料浸泡時間與電池性質的影響

浸泡時間	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta (\%)$
2hrs	6.67±0.56	444±7	17.4±0.4	1.70±0.13
6hrs	8.16±0.43	481±8	17.8±1.3	2.20±0.06
10hrs	8.56±0.46	481±8	17.4±0.2	2.40±0.18
15hrs	7.59±0.39	508±40	16.8±0.6	2.30±0.15
18hrs	9.71±0.81	478±5	16.7±0.6	2.71±0.27
22hrs	7.95±0.16	483±2	17.3±0.1	2.22±0.05

※ 上列數據皆為 3~4 次的平均值

※ 15hrs 維拆封後又重新組裝者

#### (二) 浸泡時間對 TiO<sub>2</sub> 極板上 N3 染料之吸附度的影響

我們將不同浸泡時間的模板上的染料，用洗液洗下，並取出測量 UV-Vis 光譜吸收度，以觀察不同浸泡時間對於 N3 吸附度的影響。關於吸附度的定義如下：

$$\text{染料吸附莫耳數} = \frac{\text{吸收值 (Abs.)}}{\text{N3std吸收值 (Abs.)}} \times \text{N3std的莫耳數} = \frac{\text{吸收值 (Abs.)}}{0.0386} \times 3 \times 10^{-7}$$

$$\text{吸附度} = \frac{\text{洗液含染料之莫耳數}}{\text{原浸泡染料之莫耳數}} \times 100\% = \frac{\text{洗液含染料之莫耳數}}{3 \times 10^{-6}} \times 100\%$$

表二 染料浸泡時間與吸附度之比較

	吸收峰 (nm)	光譜吸收度 (Abs)	染料吸附度 mole × 10 <sup>-6</sup>	吸附度 %
N3 standard	501	0.0386	—	—
Dip 6hrs	501	0.1714	1.332	44.4
Dip 10hrs	501	0.1735	1.348	44.9
Dip 15hrs	501	0.2129	1.655	55.2
Dip 18hrs	501	0.2569	1.997	66.6
Dip 22hrs	501	0.2671	2.076	69.2

(三)不同電解液組成對合成染料敏化太陽能電池效率影響的比較

【第一組：操作變因為電解液中的 LiI】

表三 電解液中 LiI 對電池性質的影響

[LiI] (M)	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff$ (%)	光電轉換效率 $\eta$ (%)	1 小時後光電轉換效率 $\eta$ (%)	延遲 1 小時後 $\eta$ 之增加率(%)
0.10	12.39±0.79	519±22	19.20	3.35±0.18	3.43±0.09	2.33
0.20	13.23±1.63	547±6	18.56	3.90±0.62	3.90±0.12	0
0.30	12.08±0.45	509±9	19.02	3.23±0.18	3.55±0.04	9.01
0.40	16.06±3.47	502±22	24.56	3.28±0.45	3.71±0.70	11.59
0.50	12.75±1.94	495±6	19.20	3.29±0.12	4.31±0.92	23.67
0.60	13.39±0.67	483±4	20.13	3.21±0.10	3.56±0.28	9.83

※ 上列數據皆為 3~5 次的平均值

【第二組：操作變因為電解液中的 TBPY】

表四 電解液中 TBPY 對電池性質的影響

[TBPY] (M)	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff$ (%)	光電轉換效率 $\eta$ (%)	1 小時後光電轉換效率 $\eta$ (%)	延遲 1 小時後 $\eta$ 之增加率(%)
0.15	12.18±0.77	525±7	18.81	3.40±0.20	3.73±0.03	8.85
0.20	11.44±0.29	501±2	17.53	3.27±0.03	4.46±0.96	26.68
0.25	12.30±1.33	517±4	18.12	3.51±0.39	4.51±0.74	22.17
0.50	12.39±0.79	519±3	19.20	3.35±0.18	3.43±0.09	2.33
1.00	10.60±0.14	524±1	17.47	3.18±0.09	3.97±0.42	19.90
1.25	12.66±2.04	528±6	19.32	3.46±0.43	4.09±0.62	15.40

※ 上列數據皆為 3~5 次的平均值

【第三組：操作變因為電解液中的 BMII】

表五 電解液中 BMII 對電池性質的影響

[BMII] (M)	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff$ (%)	光電轉換效率 $\eta$ (%)	1 小時後光電轉換效率 $\eta$ (%)	延遲 1 小時後 $\eta$ 之增加率(%)
0.60	12.39±0.79	519±3	19.20	3.35±0.18	3.43±0.09	2.33
0.90	11.82±0.31	540±6	17.49	3.65±0.16	4.26±0.58	14.32
1.20	16.00±0.79	535±4	18.45	4.64±0.25	5.06±1.00	8.30
1.50	15.43±2.64	561±6	12.62	4.44±0.25	4.50±0.16	1.33
1.80	12.3±0.51	547±2	11.22	3.72±0.10	4.07±0.18	9.41
2.10	11.03±0.89	543±4	17.93	3.34±0.34	4.69±0.62	28.78

※ 上列數據皆為 3~5 次的平均值

【第四組：LiI 為 0.1M，I<sub>2</sub> 為 0.05M 之電解液，電解液中不含 TBPY、BMII】

表六 僅含 LiI/I<sub>2</sub> 之電解液的電池性質

實驗項目	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta$ (%)
1	1.65±0.13	460±28	23.72	0.32±0.03

※ 上列數據為 4 次的平均值

#### (四)酸化處理對合成染料敏化太陽能電池的影響

我們將二氧化鈦模板浸泡鹽酸 2 小時後，測量電池性質如下表。

表七 酸化二氧化鈦之電池性質

	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta$ (%)
1	11.60	452	18.5	2.84
2	11.80	452	18.6	2.86
3	11.70	460	18.2	2.95
4	11.45	455	17.5	2.98
平均值	11.7±0.15	455±4	18.4±0.5	2.91±0.07

## 二、天然色素敏化太陽能電池之變因探討

(一)採用不同極性之有機溶劑浸泡色素，觀察其對電池性質的影響。

利用旋轉式真空抽氣機將以丙酮萃取之葉綠素溶液抽乾，得葉綠素抽乾物。取等量粉末分別加入 20mL 丙酮後，將二氧化鈦模板放入其中，浸泡 20 小時後製成電池，測量效率。

依次將 20mL 丙酮置換成等量乙醇、甲醇、乙醚、正己烷，重複上述步驟。

表八 有機溶劑對電池的影響

溶劑	偶極矩 (Debye)	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta$ (%)
丙酮	2.91	0.42±0.48	506±15	8.50	0.25±0.08
乙醇	1.69	0.52±0.06	464±11	2.68	0.09±0.03
甲醇	1.69	0.61±0.02	456±20	2.32	0.12±0.01
乙醚	1.15	0.29±0.37	412±53	2.39	0.05±0.07
正己烷	0	0.49±0.03	438±13	2.38	0.09±0.01

※ 上列數據皆為 3~5 次的平均值，偶極矩數據來源：<http://en.wikipedia.org/wiki>

## (二)觀察酸、鹼化色素對電池的影響

各取兩份 8.5mL 葉綠素與花青素，分別加入 18M 醋酸溶液及 18M 氨水溶液 0.5mL，製成 1M 之酸/鹼化色素溶液，將二氧化鈦模板放入其中，浸泡 20 小時後製成電池，量測效率。

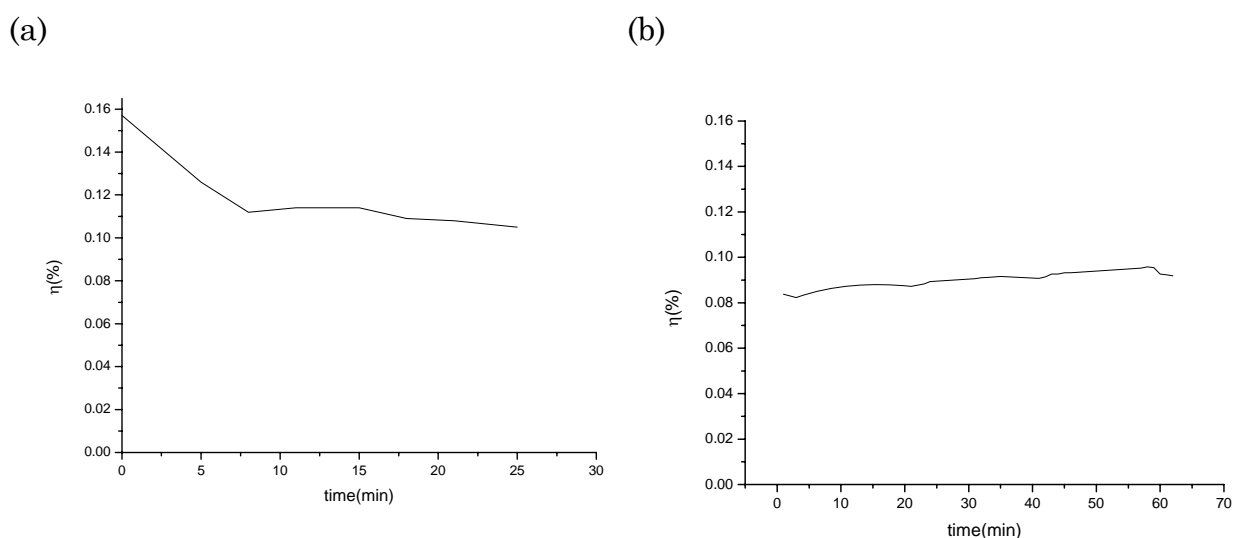
表九 酸/鹼化色素對電池的影響

酸/鹼化色素與原色素	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta(\%)$
花青素酸化	1.08±0.13	430±4	16.01	0.29±0.03
花青素鹼化	0.41±0.04	464±16	21.13	0.09±0.01
葉綠素酸化	0.45±0.05	482±22	19.71	0.11±0.02
葉綠素鹼化	0.34±0.32	401±52	16.83	0.08±0.08
未經處理花青素	0.99±0.13	187±5	17.42	0.28±0.05
未經處理葉綠素	0.46±0.02	441±11	2.00	0.10±0.01

※ 上列數據皆為 3~4 次的平均值

## (三)光照時間實驗：

將二氧化鈦模板放入葉綠素中，浸泡 20 小時後製成電池，分別以 Oriel 的 450W 氙燈，搭配 AM 1.5 太陽光濾鏡，模擬太陽光為光源 (100mW/cm<sup>2</sup>) 照光。分別持續照光以及間斷照光 (照光五分鐘後，關掉光源五分鐘，持續至 65 分鐘為止)，結果如圖八。



圖八 光照時間對電池性質的影響 (a)持續照光 (b)間斷照光

### 三、混合染料敏化太陽能電池之變因探討

#### (一)分開浸泡實驗

- 1、葉綠素與 N3：將二氧化鈦模板浸泡葉綠素 12 小時，再浸泡 N3 溶液 12 小時，取出後製成電池，量測效率，結果如表十(a)。
- 2、花青素與 N3：將二氧化鈦模板浸泡花青素 12 小時，再浸泡 N3 溶液 12 小時，取出後製成電池，量測效率，結果如表十(b)。
- 3、花青素與葉綠素：將二氧化鈦模板浸泡花青素 12 小時，再浸泡葉綠素 12 小時，取出後製成電池，照光後一個小時，量測效率，結果如表十(c)。

表十 分開浸泡染料之 TiO<sub>2</sub> 模板對電池的影響

實驗項目	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta (\%)$
(a)	3.79±0.12	550±4	16.50	1.26±0.05
(b)	3.64±0.57	506±5	16.69	1.11±0.20
(c)	1.13±0.12	486±4	16.57	0.33±0.02

※ 實驗(a)~(c)是分開浸泡 TiO<sub>2</sub> 模板後之電池性質，依序(a)是先浸泡葉綠素、再浸泡 N3，(b)是先浸泡花青素、再浸泡 N3，實驗 c 是先浸泡花青素、再浸泡葉綠素  
※ 上列數據皆為 3 次的平均值

#### (二)浸泡混合色素實驗

##### 1、葉綠素與花青素混合色素之浸泡：

利用旋轉式真空抽氣機將葉綠素及花青素溶液抽乾，量取 0.06g 葉綠素四份，分別加入花青素 0g、0.02g、0.06g、0.18g，以及丙酮 8mL，將二氧化鈦模板放入其中，浸泡 20 小時後製成電池，量測效率。

測量浸泡 TiO<sub>2</sub> 模板前色素溶液之 UV-Vis 吸收光譜，待取出電極再量測浸泡 TiO<sub>2</sub> 模板後色素溶液之 UV-Vis 吸收光譜，兩者相減，除以浸泡前之濃度，得到吸附度如表十一。

表十一 浸泡混合染料之 TiO<sub>2</sub> 模板對電池的影響

混合染料之成分	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta(\%)$
葉綠素 0.06g	0.46±0.02	441±11	20.02	0.10±0.01
葉綠素 0.06g+花青素 0.02g	0.89±0.20	494±5	16.78	0.23±0.02
葉綠素 0.06g+花青素 0.06g	0.89±0.09	530±6	15.94	0.30±0.06
葉綠素 0.06g+花青素 0.18g	0.77±0.04	527±7	21.41	0.17±0.01

※ 上列數據皆為 4 次的平均值

## 2、混合色素對 TiO<sub>2</sub> 模板之吸附度的測量

表十二 混合色素對 TiO<sub>2</sub> 模板之吸附度的測量

混合染料之成分	吸收峰 (nm)	模板浸泡色素 前之吸收度	模板浸泡色素 後之吸收度	吸附度 %
葉綠素 0.06g	431	0.2515	0.2027	19.40
葉綠素 0.06g+花青素 0.02g	431	0.2521	0.2155	14.52
葉綠素 0.06g+花青素 0.06g	431	0.2610	0.2464	5.59
葉綠素 0.06g+花青素 0.18g	431	0.2920	0.2119	27.43

3、葉綠素與  $\beta$  胡蘿蔔素混合色素之浸泡：取 4mL 葉綠素與 4mL  $\beta$  胡蘿蔔素混合，再取  $\beta$  胡蘿蔔素 8mL 作對照組，將二氧化鈦模板放入此三種溶液中，浸泡 20 小時後製成電池，量測效率。整理原色素與混合色素對 TiO<sub>2</sub> 模板浸泡後之電池性質結果如下。

表十三 浸泡混合色素與原色素之 TiO<sub>2</sub> 模板對電池影響的比較

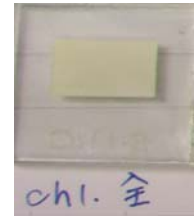
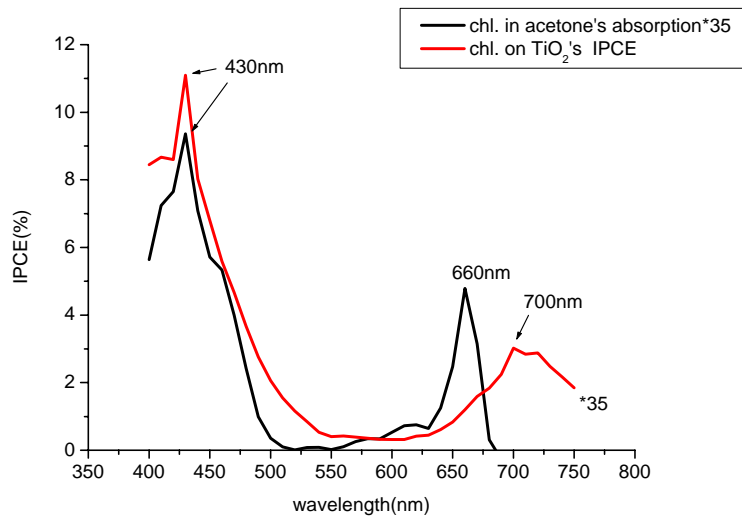
混合染料	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta(\%)$
1:1 之葉綠素+花青素	0.89±0.09	530±6	15.94	0.30±0.06
1:1 之葉綠素+ $\beta$ 胡蘿蔔素	0.35±0.05	458±23	22.57	0.07±0.01
葉綠素	0.46±0.02	441±11	2.00	0.10±0.01
花青素	0.99±0.13	187±5	17.42	0.28±0.05
$\beta$ 胡蘿蔔素	0.26±0.01	371±12	2.20	0.04±0.00

※ 上列數據皆為 4 次的平均值

#### 四、混合染料敏化太陽能電池之光電流光譜

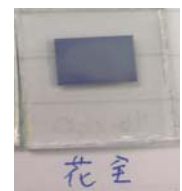
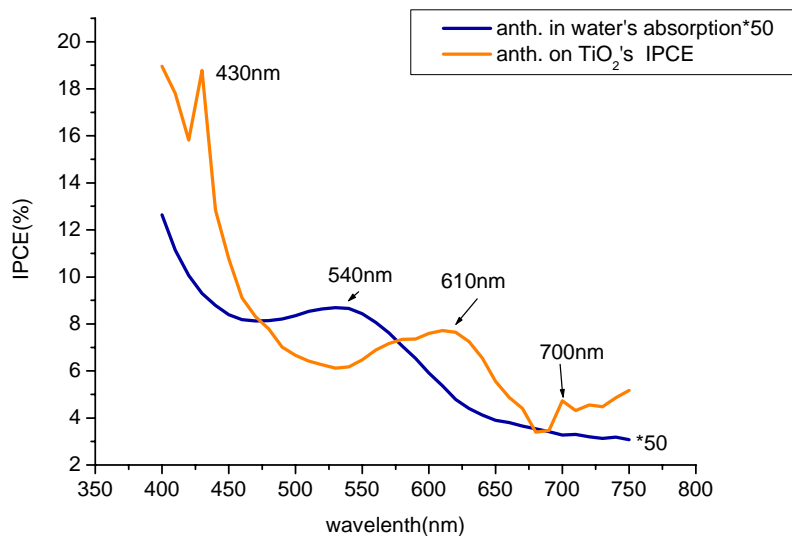
將二氧化鈦極板浸泡花青素 12 小時，再浸泡葉綠素 12 小時，取出後製成電池，將電源供應器接上單光儀，先以電流電壓計接上功率測量儀測量從 400nm 到 700nm 中以每 10 nm 為一間隔之光電流，再效率，結果如下。

(一)天然色素浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流作用光譜 (photocurrent action spectra) 以及該色素溶液之吸收光譜 (absorption spectra)



圖九 葉綠素/丙酮溶液浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流光譜以及該溶液之吸收光譜

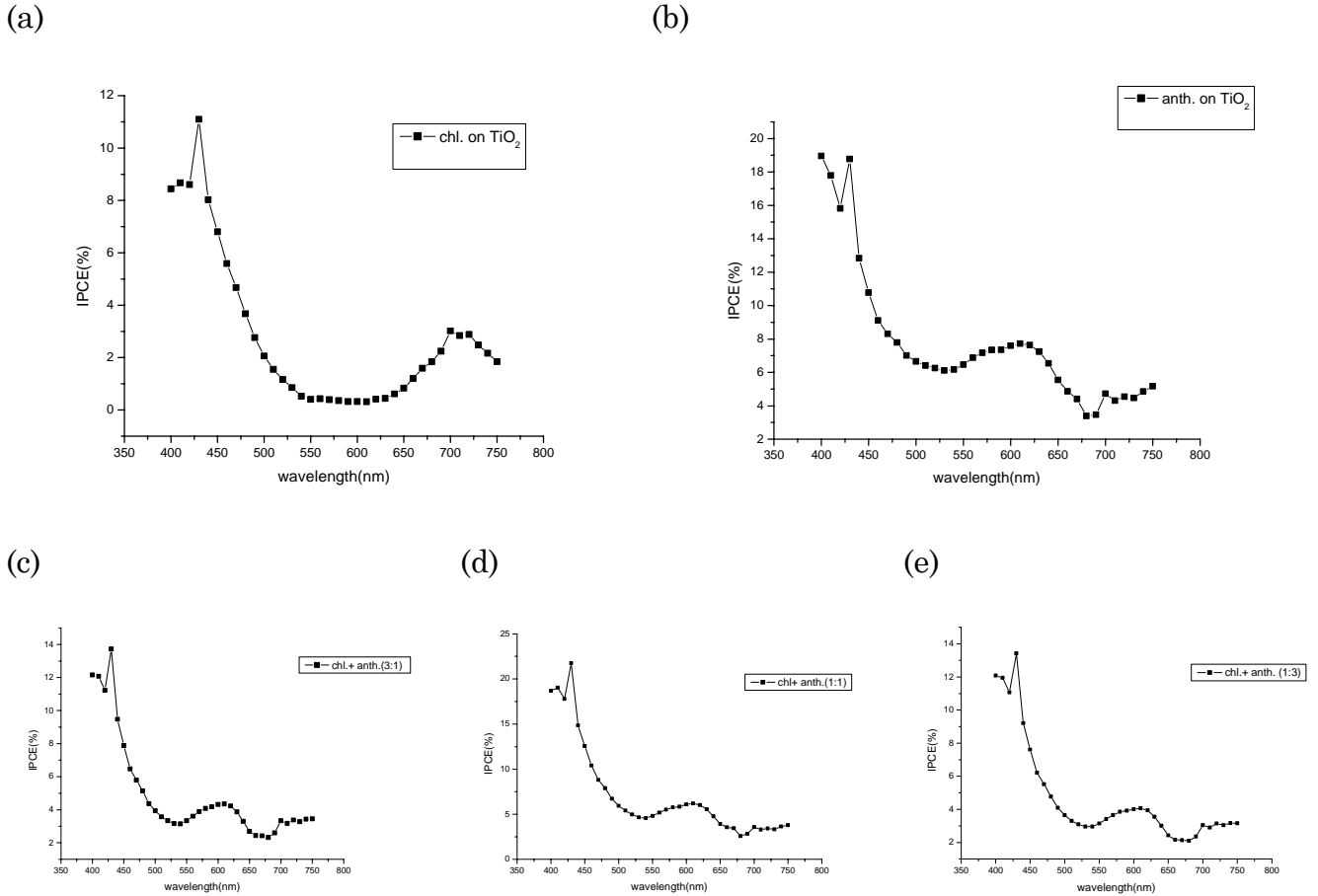
※ IPCE(%) = incident photon to current efficiency



圖十 花青素/水溶液浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流光譜以及該水溶液之吸收光譜

## (二)混合色素浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流作用光譜與原色素之比較

將全花青素、全葉綠素、以及各比例之混合色素分別浸泡極板 20 小時後，測量光電流作用光譜(IPCE)，所得結果如圖十一。

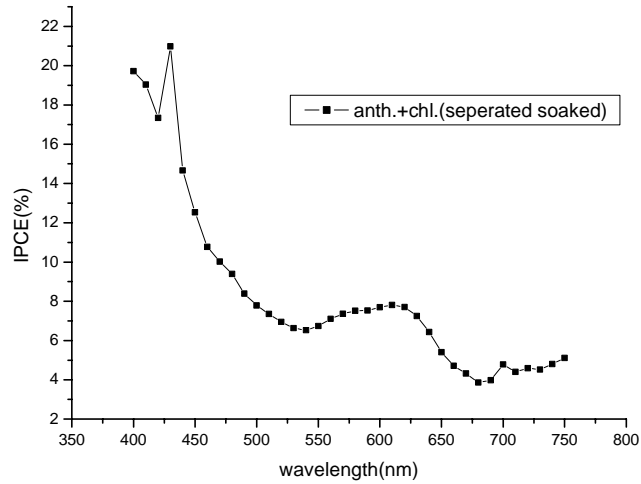


圖十一 (a)、(b)全葉綠素、全花青素 (c)、(d)、(e)為以葉綠素和花青素之重量比為 3 : 1、1 : 1、1 : 3 的混合溶液浸泡的染料吸附在二氧化鈦極板上所測得之光電流光轉換效率曲線 IPCE



### (三) 分開浸泡

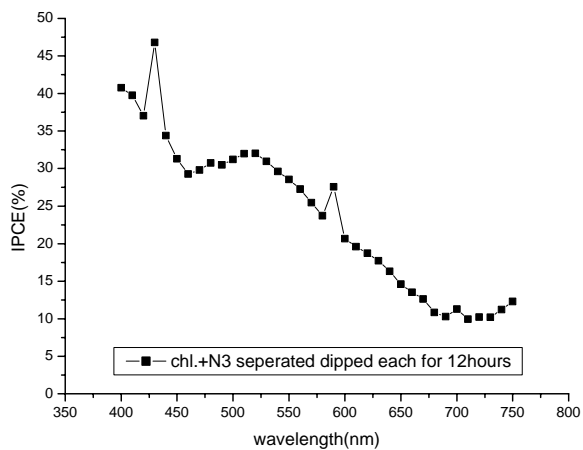
#### 1、天然色素----葉綠素和花青素



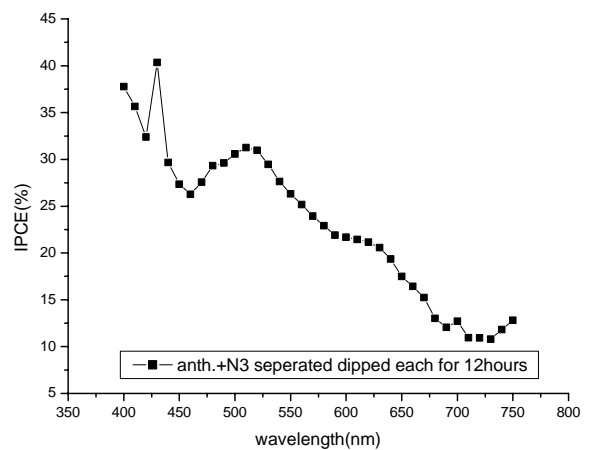
圖十二 先泡葉綠素 12 個小時，再換花青素泡 12 個小時後的 IPCE

#### 2、天然色素+合成染料之光電流作用光譜

(a)



(b)



圖十三 (a) 先泡葉綠素 12 個小時，再換 N3 泡 12 個小時後的 IPCE

(b) 先泡花青素 12 個小時，再換 N3 泡 12 個小時後的 IPCE

## 陸、討論

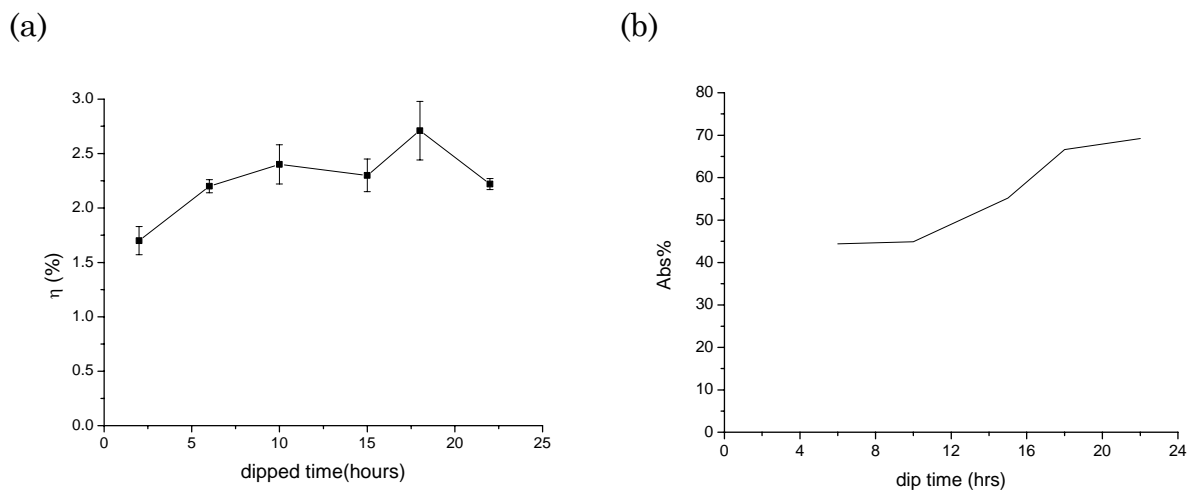
### 一、合成染料 N3 敏化太陽能電池之變因探討

(一)觀察染料之吸附度變化，推測其吸附飽和點，以決定最佳浸泡時間。

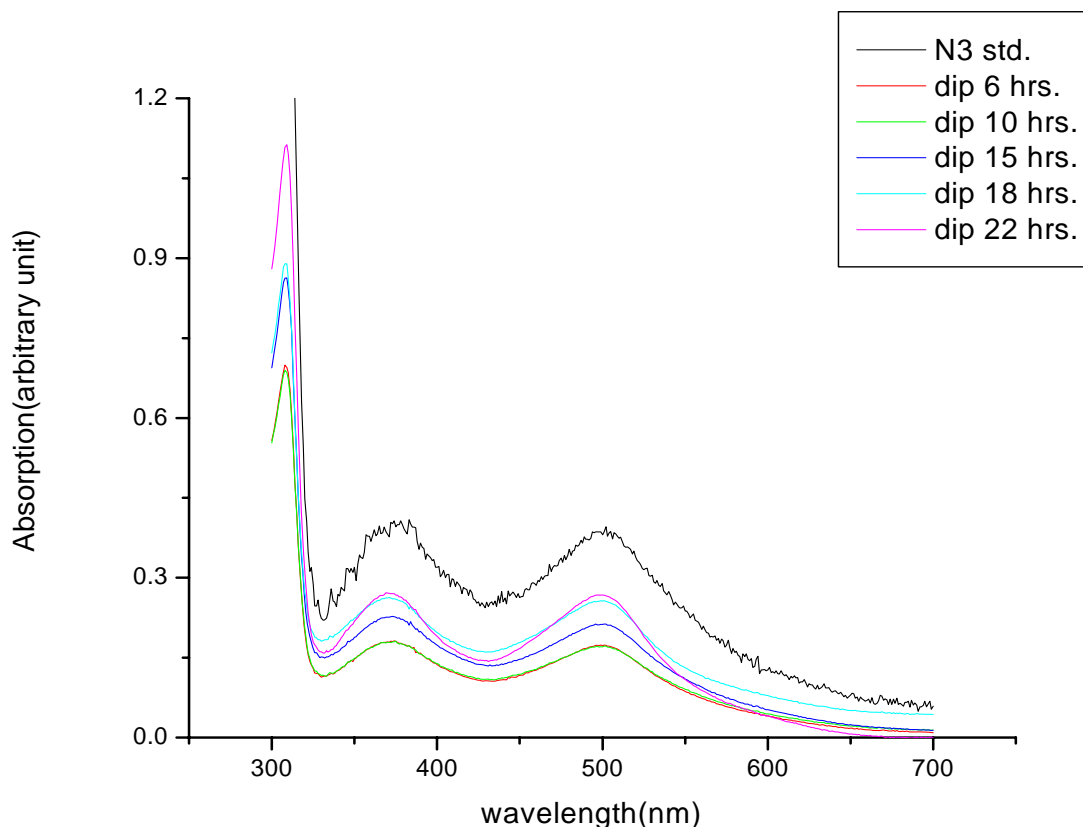
本實驗旨在觀察浸泡的時間長短對於 N3 吸附度的影響，並從中找出吸附度的飽和點。浸泡時間共分為 2 小時、6 小時、10 小時、14 小時、18 小時、22 小時。由表一及圖十二(a)看出，隨著浸泡時間的增加，其電流、電壓及效率皆大致規則性地呈上升趨勢，直到 18 小時達最高值，而圖十二(b)可看出吸收百分比%確實隨著時間呈現上升趨勢，至浸泡 22 小時的二氧化鈦極板吸收度趨於平緩。推測原因為 N3 之吸附量約於 18~22 小時間達到飽和，當二氧化鈦極板浸泡時間超過此臨界時間值，將產生不必要之反應，進而對電池效率產生負面影響。

另外，我們將不同浸泡時間的極板上的染料，用洗液洗下，並取出測量 UV-Vis 光譜吸收度，以印證此一說法，從表二及圖十三可看出吸收百分比%確實隨著時間呈現上升趨勢，至浸泡 22 小時的二氧化鈦極板吸收度趨於平緩，故可知時間對於染料吸附度及光電轉換效率有著極密切的影響。

從圖十三可以看出，N3 標準液之光譜與不同浸泡時間之洗液洗下後的 N3 光譜對照，我們可以看出光譜的吸收峰位置相同，顯示二氧化鈦極板吸附染料前後，染料 N3 的性質並未改變。



圖十四 (a)  $\text{TiO}_2$  浸泡 N3 的時間長短對光電轉換效率的影響，以及 (b)  $\text{TiO}_2$  浸泡 N3 的時間長短對吸附百分比的影響

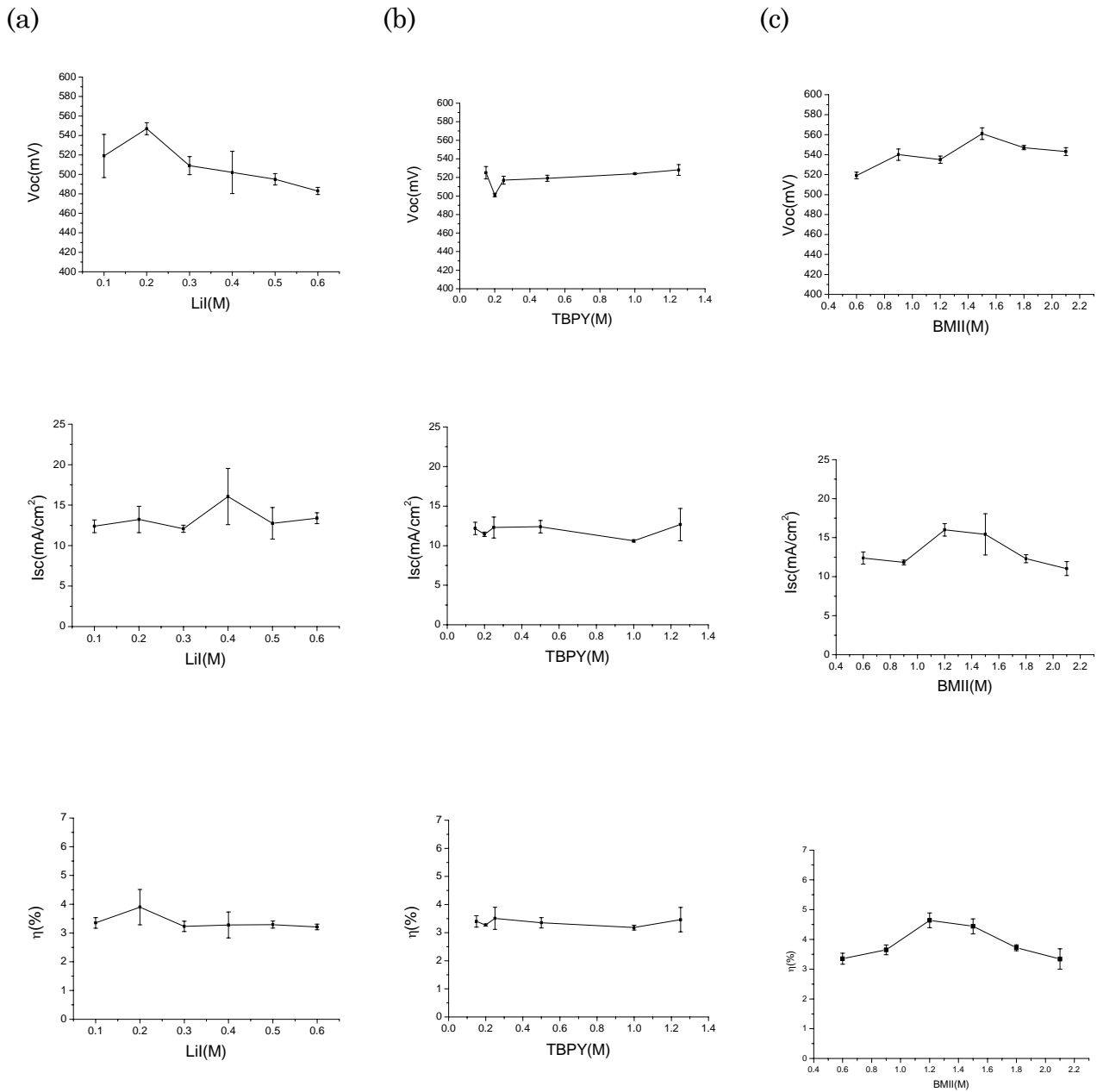


圖十五 浸泡時間對 TiO<sub>2</sub> 極板上染料之 UV-Vis 吸收值的影響

(二)比較不同電解液組成，試圖找出最佳電解液組成的比例

碘與碘離子溶於有機溶劑之中是常用的電解液，在電解液中若加入一些含有孤對電子對之胺類或吡啶衍生物的添加劑，可使該添加劑吸附在沒有吸附到染料的二氧化鈦的表面，如此一來可以阻絕電解質與二氧化鈦的接觸，降低再結合的機率。

本實驗旨在研究電解液的組成對電池光電轉換效率  $\eta$  的影響，我們以 0.10M LiI、0.05M I<sub>2</sub>、0.50M TBPY、0.60M BMII 之比例為基礎，分別調整其中的 LiI 調整為原濃度之 2 倍、3 倍、4 倍、5 倍、6 倍，TBPY 調整為原濃度之 0.3 倍、0.4 倍、0.5 倍、2 倍、2.5 倍，BMII 調整為原濃度之 1.5 倍、2 倍、2.5 倍、3 倍、3.5 倍，期望能得出電解液濃度與電池效率之趨勢，結果如圖十六。



圖十六 不同電解液組成對合成染料敏化太陽能電池效率影響的綜合比較

(a)變因為 LiI 濃度 (b) 變因為 TBPY 濃度 (c)變因為 BMII 濃度

### 1、操作變因為碘化鋰 (LiI)

實驗發現 LiI 在濃度 0.2M 時，電池有最佳光電轉換效率，且濃度大於 0.2M 效率明顯下降，雖各數據點間各有起伏，但皆為於標準差之中，因此本實驗提供一較佳之 LiI 濃度。

電子在電解液中還原的途徑為  $I_3^- + 2e^- \rightleftharpoons 3I^-$ ，隨著  $I^-/I_3^-$  比例之不同，氧化還

原對的氧化還原電位，造成其些微上升或下降。這也就是當 LiI 濃度改變時，電池之  $V_{oc}$  與  $I_{sc}$  會有所不同的原因。

在本次實驗中，我們觀察到  $V_{oc}$  隨著 LiI 濃度上升而下降， $I_{sc}$  則成較不穩定之上下跳動，推測原因如下：由於濃度提高，整個電池的通路變得更快速（本來電子從染料中打出來就較  $I^-/I_3^-$  的氧化還原快上許多，所以當電解質濃度變高後，可以使差距縮小），且電子在已呈激發態的染料與鉑間傳導加速，使得電洞得以填補，後續電子激發之打出更為順暢，因此  $I_{sc}$  上升，且電池穩定度提升。而  $V_{oc}$  下降的原因，其一是因為依勒沙特列原理， $I^-$  濃度增加後  $I_3^- + 2e^- \rightleftharpoons 3I^-$  有利於向左使得電流下降，其二則為電解液濃度可能已經高到某一臨界點，造成電解液搶奪導電玻璃 (FTO) 上的電子，使得  $V_{oc}$  改變，並連帶電流些微下降。

由此可見電解液濃度對於電子傳導的順暢於否有著抗衡之機制，因此電解液成分的濃度比例的研究極有意義，而實驗結果顯示 LiI 濃度為 0.2M 為一臨界濃度，當濃度小於 0.2M，光電轉換效率隨濃度上升而上升，濃度大於 0.2M，光電轉換效率隨濃度上升而下降。

## 2、操作變因為第三丁基吡啶 (TBPY)

數據顯示，TBPY 在 0.25M 時有較佳的光電轉換效率，但影響程度有限。

第三丁基吡啶在電池中有提升電流的作用。它會靠近  $TiO_2$  電極，藉由其結構之立體障礙與氮原子上之孤對電子，使電解質中的陽離子無法搶走電極上的電子，在電子無損失的狀態下， $I_3^-$  與  $I^-$  之濃度不變，因此  $V_{oc}$  應保持相同。但從表四中，我們觀察到隨著第三丁基吡啶濃度的上升， $I_{sc}$  與無明顯變化，但  $V_{oc}$  大致略呈現上升趨勢。推測應為 TBPY 之濃度過大，本身成為電阻造成電子流動不順，因此無法提升  $I_{sc}$ ，堆積之電子造成  $V_{oc}$  上升，進而影響光電轉換效率。

## 3、操作變因為碘化丁基甲基咪唑啉 (BMII)

實驗結果發現，隨著 BMII 濃度上升，光電轉換效率呈現上升趨勢，至 1.2M 為一臨界值，其後之電池效率  $\eta$ 、 $I_{sc}$  與  $V_{oc}$  皆下降。

BMII 的分子量較大，在電池中會較靠近導電玻璃，進而保護玻璃，阻擋電解質中的陽離子搶走其上之電子，因此 BMII 和 TBPY 類似，皆可提升  $I_{sc}$  及穩定  $V_{oc}$ 。由

表九，我們觀察到隨著 BMII 濃度的增加， $I_{sc}$  在 1.2M 之後呈下降狀態， $V_{oc}$  則在 1.8M 之後開始有下降趨勢。推測原因應與 TBPY 類似，皆因濃度過大形成電阻，使得電子傳導不順，影響  $I_{sc}$  與  $V_{oc}$ 。因此由此研究得知，當 BMII 為 1.2M 時，對電池有最佳之效應。

#### 4、只含 LiI 與 $I_2$ 之電解液對電池性質的影響

表六為電解液組成之另一對照組，用以說明 TBPY、BMII 為有意義的電解質。由實驗結果可看出，以此種電解液製成的電池光電轉換效率極低，原因應該為少了 TBPY 與 BMII， $I^-$  與  $I_3^-$  會搶走二氧化鈦極板及導電玻璃上的電子，使得電壓電流值皆降低，因而電池效率低落。

#### 5、靜置一段時間的二次測量對電池性質的影響

由表三～表五可看出，製作完成之電池於第一次量測後靜置一小時後，重新灌入電解液作二次測量，效率均有顯著提升 (2.23%~28.78%)。我們推測在靜置的過程中，電解質溶劑蒸發，使得電解質整體濃度上升，進而提高了電子傳遞的順暢性，提升電池效率。而部分電池效率下降，應為由於濃度過高之電解液破壞吸附於二氧化鈦上之染料與二氧化鈦的鍵結，使得效率不彰。

#### (三)酸化 $TiO_2$ 電極，其對效率的影響

由表十四可以看出，本實驗以 HCl 酸化二氧化鈦電極，與對照組比較後發現效率有顯著提升。我們推測是因為酸化會將  $H^+$  加到  $TiO_2$  薄膜上， $H^+$  間之 N3 染料形成鍵結，如此，二氧化鈦薄膜所吸附之 N3 染料因而增加，被激發的電子數增加，所傳遞出的電子也因此增加，提升了短路電壓值，電池效率隨之提升。

表十四 酸化二氧化鈦與未經酸化處理之電池性質的比較

	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	填滿因子 $ff(\%)$	光電轉換效率 $\eta(\%)$	$\eta$ 之增加 率
未經酸化	7.95±0.16	483±2	17.3±0.1	2.22±0.05	31.1%
酸化二氧化鈦	11.7±0.15	455±4	18.4±0.5	2.91±0.07	

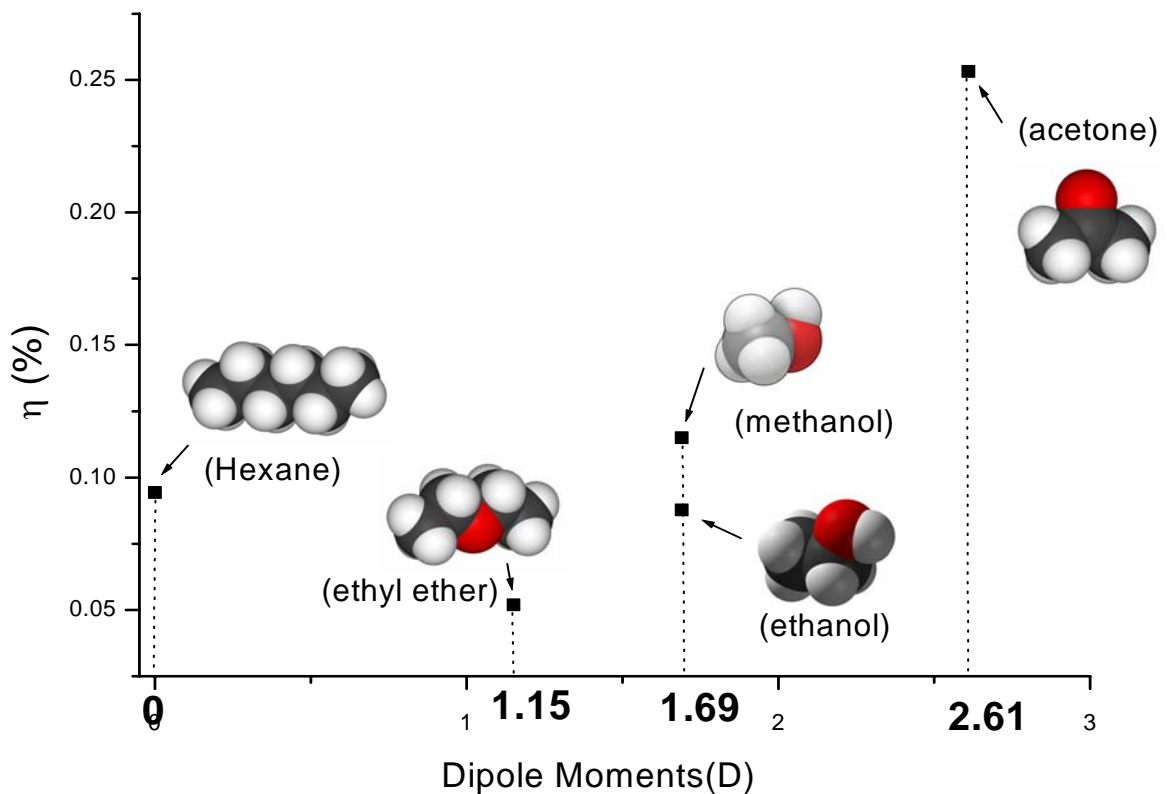
※ 上列數據皆為 4 次的平均值

## 二、天然色素敏化太陽能電池

(一)採用不同極性之有機溶劑浸泡葉綠素乾抽物，觀察其對電池性質的影響

由溶劑偶極矩與電池效率相關圖得知，表現效率最佳的溶劑是極性最高的丙酮，而極性次高的甲醇和乙醇又以碳數較低的甲醇的效率較佳。推測由於所使用的TiO<sub>2</sub>極板為親水性表面，因此越高極性之溶劑，使得染料與親水性極板間的吸附度越佳。至於乙醚與正己烷之效率較低，則是因為乙醚及正己烷與親水性TiO<sub>2</sub>極板表面間的作用力較弱所致。

原本實驗希望能夠測量染料在各種溶劑中之吸附度，以佐證溶劑的極性對於吸附度的影響，但是由於有機溶劑具有高揮發性，因此暫無法進行吸附度的實驗。



圖十七 有機溶劑浸泡葉綠素乾抽物之對電池效率的影響





九。

由表九可看出，鹼化色素對電池有負面影響，酸化部分理論上應可提昇效率，因為酸化除可能將酯基水解成羧基外，亦可能將  $H^+$  加到二氧化鈦薄膜上， $H^+$  與色素形成鍵結，增強吸附，提升效率。但目前數據顯示，這方面仍有待進一步努力。

實驗顯示花青素在酸性環境中呈現紫紅色，鹼性呈現藍綠色，而表九中酸化花青素的效率較鹼化佳，推測酸化後花青素之能階價帶恰落於二氧化鈦之價帶間，使得電子容易打出，使得電池效率提升。

我們在 2006 年的一份論文上有找到一種酵素，可水解掉  $R_1$  鏈換上  $OH$ ，但由於此酵素是藉由基因轉植工程以細菌生產，不易取得，所以此一方向我們仍須努力。

### (三)光照時間對電池的影響

實驗旨在觀察葉綠素電池隨著光照時間之增加，電壓、電流與效率的變化。我們原推論光能應可激活葉綠素 a，使得吸附在較內層的葉綠素也能參與電子傳遞的反應，則電子的激發及氧化還原的速率將增加，電池效率提升；同時由資料顯示自葉綠素打出電子至陽極板接收只需  $10^{-12}$  秒，電子由陰極板釋還使得  $I_3^-$  還原為  $I^-$  卻需要  $10^{-6}$  秒，因而隨著光照時間的增加，理論上電壓會因為此兩種反應的時間差而有所上升，但實驗結果顯示電池效率並未有明顯提升，推測有以下兩點原因：

1、葉綠素一旦離開植物活體後，不再受蛋白質的保護，暴露於光照及室溫環境下極易分解死亡，致使效率降低。而推測其分解的主因在於，葉綠素吸光後打出電子是取決於或然率，因此吸光後卻未能打出電子的分子，其多餘的能量使得結構不穩定，進而分解。

2、製作葉綠素電池時由於葉綠素加溫即死亡，故未進行熱熔封裝，只以燕尾夾夾住固定，實驗期間除了電解液蒸發損耗以外，空氣中的水氣亦有可能進入電池中吸附於二氧化鈦之上，阻礙電子傳遞，對光電轉換造成不良影響。

因此，我們亦做了一組間斷照光的實驗，預期葉綠素在未照光的間隔中能釋出過多能量，回復穩定狀態，並且將電池以 AB 膠加以封裝，使得外界物質無法進入干擾電子傳導，電解液亦不會有所蒸發。然而，由圖可觀察出電池之光電轉換效率雖有提

升卻不明顯，綜合以上兩實驗，我們推測隨著光照時間增加，電池狀態將趨於穩定，直至某一臨界點葉綠素完全分解，效率將降為零。

### 三、浸泡混合色素對於電池性質的影響

#### (一)分開浸泡實驗

由於混合溶液往往因為物質性質不同(如：葉綠素為脂溶性、花青素為水溶性)，兩者難以互溶，致使電池效率不彰。因此，我們改進實驗，採用分開浸泡的方式，先浸泡一種色素一段時間，取出極板後再浸泡另一種色素，觀察其對電池光電轉換效率的影響，並與混合溶液製成之電池相比較。

由表十可看出，先浸泡天然色素、再浸泡合成染料的電池，效率皆落於單一浸泡天然色素及合成染料的電池之效率間，此原因有可能為浸泡時間不夠久，使得吸附不佳。然而，先浸泡花青素、再浸泡葉綠素的光電轉換效率結果卻達 0.33%，無論較浸泡單一色素、或是浸泡混合溶液的效率值都要來得高，除了顯示混合溶液有助於擴充吸光範圍、打出更多電子，亦證明溶液不互溶的情形確實對電池有負面影響。

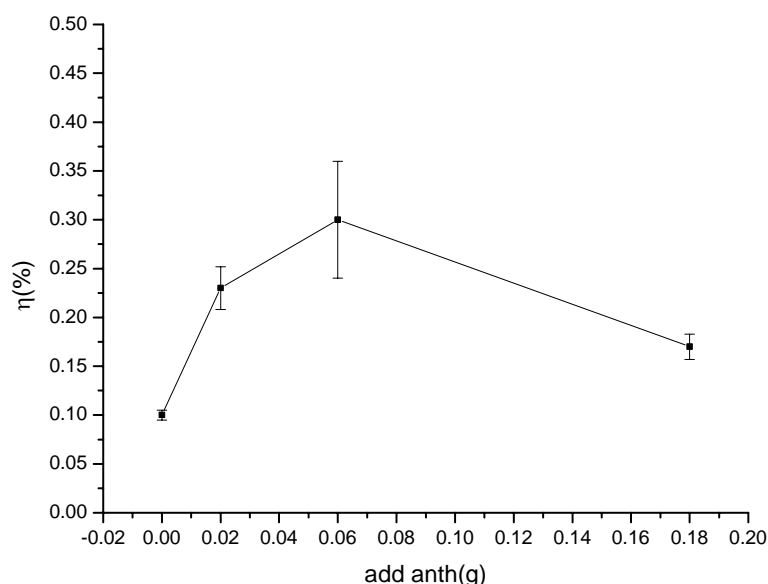
#### (二)浸泡混合色素

從圖五(b)以及(c)看出葉綠素之吸收光譜落於 400~450nm 與 650~700nm 之間，花青素之吸收光譜落於 400~600nm 之間，因此我們設想若將葉綠素與花青素混合在一起，將二氧化鈦極板浸泡其中後，製成之電池將為一可吸收全光譜的太陽能電池，改善天然色素吸光範圍不如合成染料的缺點，進而吸收更多能量、打出更多光子，提升電池光電轉換效率。

我們先將葉綠素與花青素以體積比例方式，混合體積比 3：1、1：1、1：3 之葉綠素與花青素製成混合溶液，與純葉綠素及純花青素作電池效率比較，卻發現混合溶液電池效率皆不如單純色素來得好，我們推測原因有兩點：一為葉綠素為脂溶性物質，而花青素之溶劑為水，兩者相加混合時葉綠素將析出成顆粒狀，非但難以吸附於二氧化鈦上，更會對電池造成負面影響(如：形成電阻)，我們嘗試先將萃取出的花青素和葉綠素抽乾成乾燥物，再以酒精(因為酒精同時為有機溶劑亦溶於水)溶解之，結果效果不彰，與前述情形相同；另一原因為在以體積比例混合的過程中使兩種色素

濃度皆下降，造成吸附不佳，因此我們改良實驗設計，將體積比例混合改為質量比例混合，在等克數(等濃度)之葉綠素中分別加入不等克數之花青素，提高色素濃度。實驗結果如表十一。

由表十一看出，1:1 混合溶液製成的電池有最佳效率，其皆比單純色素高，原因應為前述之吸收光譜互補，使得吸光範圍增加，進而影響效率。但同時由表十二之吸收光譜我們又發現，1:1 混合液的吸附度是四組中最低落的，除了可能是量測時的誤差所致，亦有可能確實吸附較差，但同時吸附葉綠素與花青素使得電池效率提升，影響效率。



圖十九 在固定葉綠素重量下加入花青素之光電轉換效率

另外，光電轉換效率與 IPCE 之值並不完全相吻合（由圖二十 IPCE 量測之結果為葉綠素、花青素比例 1:3 者最佳，且吸附度亦為此組為最高），原因可能是因為光電轉換效率為測量完 IPCE 一小時後才量測，灌入之電解液已對吸附於二氧化鈦上之染料造成破壞，所以產生不同結果。

浸泡葉綠素與  $\beta$  胡蘿蔔素之混合色素的結果並不甚佳，由表十三可知，雖混合結果較單一  $\beta$  胡蘿蔔素來得好，但亦未高於單一葉綠素，與花青素更是相差甚遠。原因除了  $\beta$  胡蘿蔔素萃取量並不多，容易濃度不高造成吸附低落，更可能是  $\beta$  胡蘿蔔素與

葉綠素的吸光範圍有較多重複(430nm~450nm、630~650nm 皆為重複區塊)，造成相互混合的意義並不高。

#### 四、浸泡混合色素對於電池性質的影響

(一)天然色素浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流作用光譜 (photocurrent action spectra) 以及該色素溶液之吸收光譜 (absorption spectra) 的比較

##### 1、葉綠素/丙酮溶液浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流光譜以及該溶液之吸收光譜

在此圖十七中，紅線代表葉綠素吸附上 TiO<sub>2</sub> 奈米結構電極層後，在不同波長下將入射的光子轉換成電子的光電流轉換效率；而黑線則代表尚未吸附之前葉綠素溶在丙酮溶液中的吸收光譜圖。由圖觀察得知，葉綠素的光譜第一個訊號峰為 430nm，第二個在 660nm；而對照其在不同波長下之光電流換效率 (IPCE)，發現第一個訊號峰在 430nm 是相同的，但第二個訊號峰為 700nm 時，除了訊號峰變寬且有紅位移(red-shifted)至 720nm 的現象。推測原因可能是與葉綠素和極性 TiO<sub>2</sub> 電極層間的作用力以及葉綠素在電極的大量聚集有關 (A.Kay, M.Grätzel, 文獻十)。

##### 2、花青素/水溶液浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流光譜以及該水溶液之吸收光譜

由圖二十觀察得知，花青素吸收光譜僅在 540nm 有一明顯訊號峰；而對照其光電流光譜 (IPCE)，第一個訊號峰出現在 430nm，第二、三個則出現在 610、700nm。兩相對照顯示，主要波峰段已明顯改變，其改變較葉綠素更為明顯。

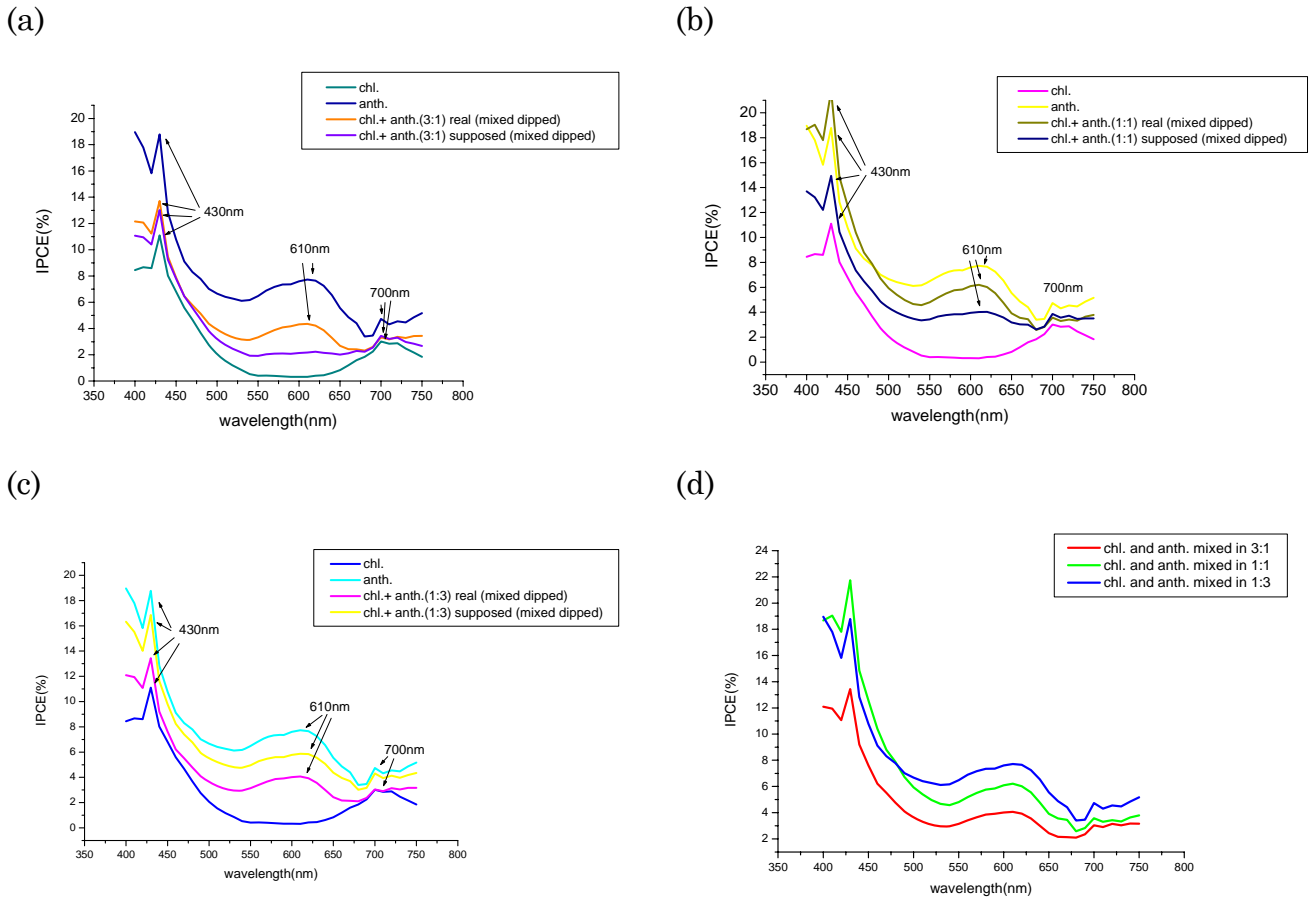
我們猜測波峰的改變與染料和極板間作用力有關，亦即花青素與極板間作用力較葉綠素大，且因花青素浸泡極板後顏色較深 (呈現明顯藍紫色)，也證實花青素之吸附度較葉綠素佳。

另外，由圖得知吸附在電極層上的花青素對於 430、610、700nm 等波段的光效率較佳，其中 610nm 是葉綠素所沒有的訊號峰，因此如果能將葉綠素和花青素同時浸泡，可以增廣電池的吸光範圍。但如前述所提，混合溶液會因溶質析出，故改以分開浸泡進行實驗。

(二)混合色素浸泡 TiO<sub>2</sub> 極板之光電流作用光譜與原色素之比較

將全花青素、全葉綠素、以及各比例之混合色素分別浸泡極板 20 小時後，測量

光電流作用光譜(IPCE)，所得結果如下圖。



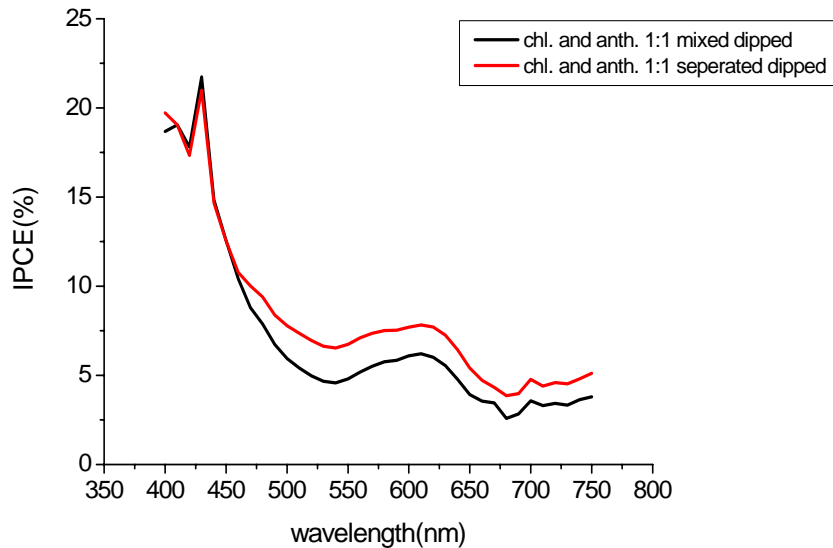
圖二十 各種比例之混合色素浸泡極板 20 小時後，與全花青素、全葉綠素之 IPCE 比較  
 ※ 選擇重量比原因為，所萃取出之葉綠素和花青素溶液皆為混合物，無法得知其分子量  
 ※ 其中預測值的算法係將葉綠素訊號乘以 3/4，花青素乘以 1/4 後相加而得。

假想奈米級二氧化鈦極板上有 100 個座位，且色素的每一個分子都確實吸附在座位上（而非擠在走道或扶手之間，亦即用同一種鍵結位置），那麼當葉：花=3：1 之混合染料浸泡時，理論上，其顯現出的效果應該接近於有 75 個座位為葉綠素分子所佔據，有 25 個位子為花青素分子所佔據（即圖二十(a)中之預測的紫線）。但實際測得之橘線，雖在 430、700nm 時訊號峰幾近相同，証實了吸附上去的葉綠素和花青素的比例如上述推論之 3：1，但卻在 610nm 附近橘線大幅提升，此係因混合色素之光譜加成性所致。

推測在 430、700nm 波段，葉綠素與花青素兩者一樣活潑，因此加乘效果並不明顯；但在 610nm 附近時，可能是花青素吸收該波段的光子後，將光子傳至鄰近的葉綠素，整體提升了混合色素之吸收光子效率，也就是說原本葉綠素完全沒有此波

段之訊號，由於花青素的加入才會有如此顯著的提升，這是個令人振奮的結果，因為混合色素確實比原色素之電池吸光範圍廣泛。

### (三)分開浸泡以及混合浸泡天然色素之比較



圖二十一 分開浸泡以及混合浸泡葉綠素和花青素之光電流光譜之比較

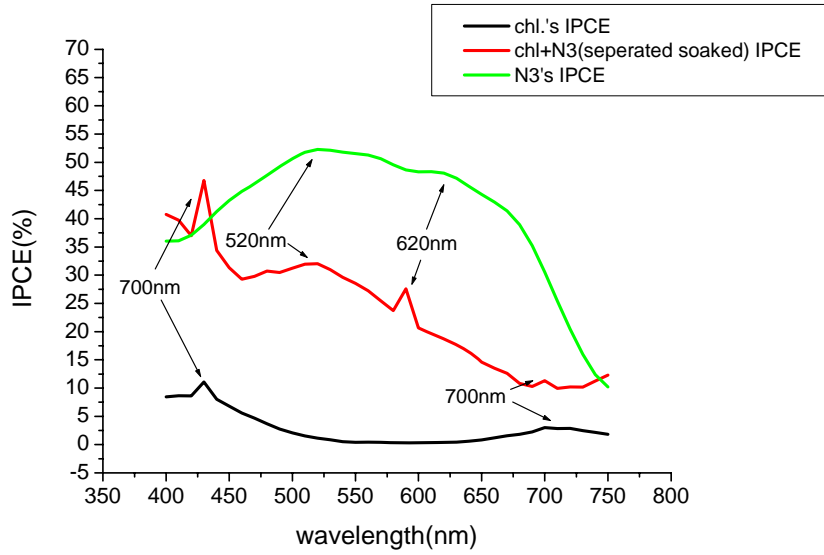
由圖中觀察可知，分開浸泡的效果較混合浸泡者為佳。推測當混合浸泡時，是由兩混合染料同時競爭吸附位置，所以總吸附上去的染料數會減少；另外，當分開浸泡時不會遭遇”兩個染料不互溶的情況”，因此在沒有染料析出的情況下，分開浸泡時的染料濃度會較混合浸泡時的高。

### (四)分開浸泡天然色素與合成染料之光電流作用光譜與原色素之比較

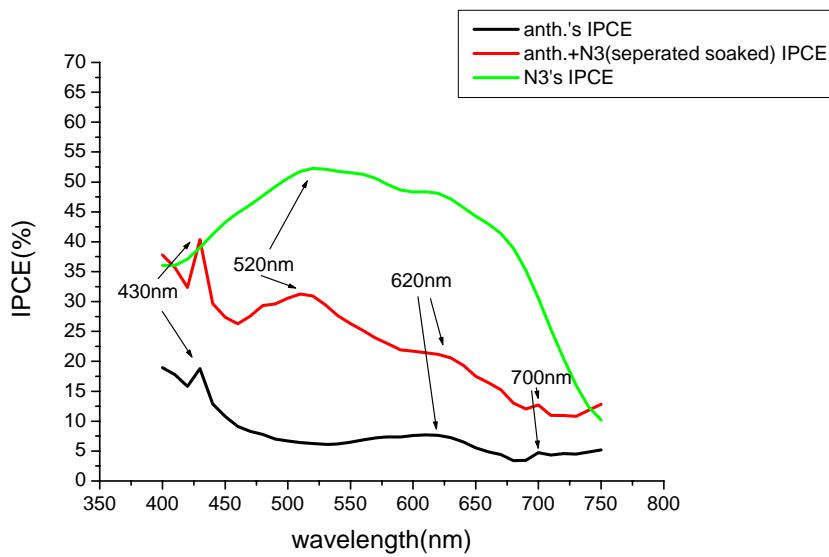
另外，分開浸泡葉綠素與 N3、花青素與 N3，測量光電流作用光譜之 IPCE 值，結果發現二氧化鈦極板在浸泡天然色素再浸泡合成染料 N3 後，IPCE 值將介於兩者之間，且效率高峰有相互補足的疊加現象，如在波長 520nm 與 620nm 兩個 N3 吸光之高峰處，混合浸泡的 IPCE 值皆出現峰點，由此可知混合浸泡對電池效率有正

向影響，唯需加強兩者於二氧化鈦之吸附度（如：延長個別浸泡時間），推測如此應可產生更顯著之混合加乘的效果。

(a)



(b)



圖二十二 天然色素與合成染料之分開浸泡之 IPCE 比較

## 柒、結論

矽晶太陽能電池價格昂貴，至今難以普及，因此發展價格低廉、容易取得的電池，將有助於解決這個問題。相較於傳統的半導體太陽能電池，用以製作染料敏化太陽能電池的  $\text{TiO}_2$  既無毒，價格又便宜。

由實驗結果可知，二氧化鈦電極對染料與色素的吸附度隨著浸泡時間的增加而增加，臨界點應介於 18~22 小時之間，在此時間中吸附可達飽和。而當電解液組成為  $\text{LiI}$  0.1M、 $\text{I}_2$  0.05M、 $\text{TBPY}$  0.5M、 $\text{BMII}$  1.2M 時，電池將有最佳光電轉換效率 ( $\eta$  可達  $4.64 \pm 0.25\%$ )，且每一電解值皆有其存在之意義與必要性。酸化二氧化鈦電極亦對光電轉換效率有正向影響，約有 31.1% 的提升，效果顯著，是一個可再探討之方向。

天然色素方面，我們採用不同極性之有機溶劑浸泡葉綠素抽乾物，發現效率最佳者為極性最高之丙酮。酸、鹼化結果雖然效率提升並不顯著，但酸化色素對電池光電轉換效率應仍屬有正向影響，而酸鹼化色素主要牽涉到色素與染料的改質，此一部分對我們而言難度較高，但極有深入研究之價值。另外，我們發現隨著光照時間增加，電池狀態將趨於穩定，甚至在光照前期有略略上升之趨勢，直至葉綠素完全分解死亡，效率才轉為零，且不受持續或間斷照光之影響。

混合染料的部份，我們嘗試了分開浸泡極板與浸泡混合色素兩種方法，並測量其光電流作用光譜 (photocurrent action spectra)，由 IPCE 值 (incident photon to current efficiency) 以及光電轉換效率 ( $\eta$ ) 顯示，分開浸泡對電池有較佳之影響。且在各項混合的結果中，皆可觀察出 IPCE 有疊加的效果，雖不如預期地有顯著加乘效果，但大致上吸收光譜與 IPCE 皆能互補，擴充電池之吸能範圍，且能明顯地看出訊號峰在染料與色素混合後的出現，顯示混合染料確實有其意義。因此，只要可以克服染料/色素對於二氧化鈦極板的吸附問題，以混合染料增加電池吸光範圍方式，將可大大提升本電池之實用價值。

隨著科技的發展，人類對於自然、環保無污染之乾淨能源的需求日益殷切，染料敏化太陽能電池若能持續發展，成為高效能之太陽能電池，對於面對能源短缺的現代社會將是一大助益。因此，我們期望未來能打破目前光電電池的種種限制，改善其不符合經濟效益的低落效率，生產出永續發電、低成本的綠色太陽能電池。



## 捌、參考資料

- 一、高一龍騰版基礎化學第四章
- 二、高三選修化學第六章
- 三、高二康熙版生命科學上冊第三章
- 四、化學實驗，吳淑黎，吳紹琦，眾光文化事業出版民 88 年 7 月
- 五、從綠葉到激光光盤——顏色與化學，田禾，陳孔常著，牛頓出版公司 2001
- 六、地球上最重要的化學反應—光合作用，沈允鋼著，同上
- 七、呂宗昕，圖解奈米科技與光觸媒，商周出版社，2003
- 八、第 46 屆中區小學科學展覽會科展，電池的神奇彩衣—染料敏化太陽能電池
- 九、原著 Neil a. Campbell , Lawrence g. Mitchell , Jan b. Reece, 編譯 楊怡真 林彥嵐 江志文 林岳晟 洪珮瑄 郭舒婷 陳志昇 簡福記，彩色圖說生物學，合記圖書出版社，2003，p108~124
- 十、A.Kay, M.Grätzel “Artificial Photosynthesis. 1.Photosensitization of  $\text{TiO}_2$  Solar Cells with Chlorophyll Derivatives and Related Natural Porphyrins” J. Phys. Chem. 1993, 97, 6272~6277.
- 十一、 M. K. Nazeeruddin, A. Kay, I. Rodicio, R. Humphry-Baker, E. Müller, P. Liska, N. Vlachopoulos, and M. Grätzel “Conversion of Light to Electricity by cis- $\text{X}_2$ Bis (2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) Charge-Transfer Sensitizers (X =  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{CN}^-$ , and  $\text{SCN}^-$ ) on Nanocrystalline  $\text{TiO}_2$  Electrodes” J. Am. Chem. Soc. 1993,115,6382~6390
- 十二、 G. P. Smestad, M. Grätzel “Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology: A Natural Dye-Sensitized Nanocrystalline Energy Converter” J. Chem. Edu. 1998 75, 752~756
- 十三、 Mechanisms and Applications of Plasmon-Induced Charge Separation at  $\text{TiO}_2$  Films Loaded with Gold Nanoparticles ,JACS, Published on Web 04/29/2005,
- 十四、 Electronic properties of metal nanorods probed by surface-enhanced Raman

spectroscopy, Received (in Cambridge,UK) 5<sup>th</sup> April 2000,Accepted 21<sup>st</sup> July 2000,Published on the Web 9<sup>th</sup> August 2000

十五、 Langmuir 2005,21, 4272-4276 ,Significant Efficiency Improvement of the Black Dye-Sensitized Solar Cell through Protonation of TiO<sub>2</sub> Films

十六、 [http://www.landfood.ubc.ca/courses/fnh/410/colour/3\\_22.htm](http://www.landfood.ubc.ca/courses/fnh/410/colour/3_22.htm)

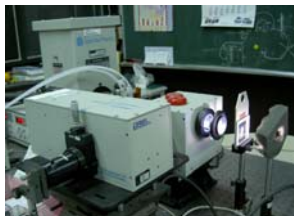
十七、 <http://www-class.unl.edu/biochem/labs/student/exp7.htm>

十八、 <http://www.enorth.com.cn>

## 附錄：研究器材與設備之照片

### (一)器材

1.光源及 AM1.5 太陽光濾鏡



2.高溫爐



3.三用電表



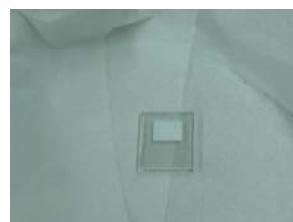
4.真空抽氣機



5.導電玻璃 (澳製 FTO)



6.澳製覆有 TiO<sub>2</sub> 膜的導電玻璃



7.澳製鉑 Pt 電極



8.研鉢



9.超音波震盪器



10.功率測量儀(power meter)



11. 電壓電流計



12. 磁石攪拌機/加熱板



13. 電源供應器



14. 旋轉塗布機 spin-coating instrument



15. 微量滴管

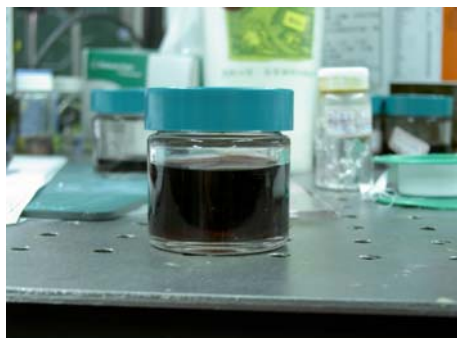


16. 滴管



## (二) 藥品

1. N3 染料(bis(2,2'-bipyridyl) ruthenium(II)-type 一系列化合物)



3. 液態氮



#### 4. 電解液藥品



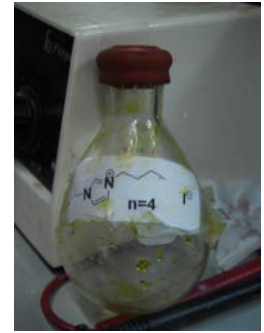
TBPY



I<sub>2</sub>



LiI



BMII

(三)、檢測儀器：紫外線/可見光光譜儀(UV/Vis)



## 評語

- 一、 本作品以天然色素塗佈二氧化鈦敏化太陽能電池。
- 二、 光能轉換效率不佳。
- 三、 葉綠素增進花青素吸附力的原因與結果皆不明確。
- 四、 實驗過程與工作份量不小，作品具發展性。