

實驗九：染料敏化太陽電池

-奈米 TiO₂ 晶粒和藍莓或覆盆子的汁液作為染料 DIY 製作染料敏化奈米晶化太陽電池

戴明鳳¹ 邱立翰²

¹ 國立清華大學物理系

² 吳鳳技術學院 光機電暨材料研究所

一、實驗目的：

隨著工業文明的迅速發展，現今世界對能源的需求量逐年大增，使得地球上能源的儲存量逐年快速銳減，因而引發嚴重的能源危機。並因過度使用化石燃料，導致全球溫室效應，致使全球暖化問題日趨嚴重，進而對人類所居住的地球環境造成無可復原的污染。使得再生能源的研究與開發已成為全球性刻不容緩的努力方向。在多種再生能源中，除最被看好的風力發電之外，現階段太陽能發電被認為是較具發展潛力和應用價值的再生能源之一。因此，如何將大自然源源不絕的太陽能有效率地轉換為電能，即成為人類解決能源危機和環境污染的重要途徑和希望。

本實驗冀望讀者能夠透過自製太陽電池(solar cell)的機會，得以深入淺出地認識太陽電池科技和其應用的基本知識和關鍵技術，同時，對此能源科技領域產生高度的興趣和認同。本實驗所討論和製作的太陽電池是近年被認為頗具開發應用潛力的染料敏化太陽電池(dye-sensitized solar cell, DSSC)，有別於目前市售之高價位矽質固態半導體/薄膜太陽電池。此類新興太陽電池的製作原理和技術係結合奈米二氧化鈦(TiO₂)的光電半導體科技、染料科學和光觸媒等跨領域多元科技的整合。

從簡易且低製作成本的 DIY 製程學習過程中，不僅可深入了解太陽電池的工作原理、優缺點、應用發展所面臨的瓶頸和其重要性外，並進一步體認跨領域科學整合的必要性。所以，本實驗有下列四項主要目的：

- (1) 學習光伏效應(photovoltaic effect)的原理、二氧化鈦(titanium oxide, TiO₂)奈米晶粉(nano-crystalline powder or nanocrystals, NC)的特性和應用。
- (2) 以自購的新鮮藍莓、覆盆子果粒或澎大海花瓣，以及奈米級的二氧化鈦粉末在家或在一般的教學實驗室中，自製可立即實用的染料敏化太陽電池。
- (3) 將自製的太陽電池使用於日常生活中具低功率的小電器用表，如掌上型計算機、手錶或 LED 手電筒。
- (4) 了解能源科技、再生能源和跨領域科學整合的重要性。

二、能源危機與再生能源

近幾年來世界原油價節節上揚，我們日常汽機車所使用的汽油更是一直處在漲價的聲浪中，進而帶動日常生活用品的物價也隨之節節上揚。油價更於 2007 年 10 月底以每桶高於 US\$92 的創新高價，破有史以來的新高紀錄。油價不斷地上揚且屢創新高點，並且遠遠高過

1980年波斯灣戰爭時的歷史高點，主要原因之一不外乎地球上化石能源的蘊藏量正在快速遞減中。專家評估，若根據人類現有的能源使用習性，且若不儘快將對能源的部分需求轉換使用其他替代能源的話，則地球上除煤資源尚有200年以上的蘊藏量外，其他如石油和天然氣等石化燃料的儲存量可能無法支撐超過50年以上的世界能源總需求量。此外，由於化石燃料在轉換成電能和熱量的過程中，會產生大量的溫室氣體，致使溫室效應所引發的全球暖化問題日趨嚴重，使得地球的平均溫度逐漸上升，進而對地球的大自然環境和生態平衡面臨巨大的挑戰，甚至造成不可挽回的嚴重破壞。

世界能源的高度使用率、有限儲存量極端不足、地球環境嚴重污染和溫室效應與日俱升等等問題所帶來的能源危機和全球暖化問題日趨嚴重，驅使許多有心國家和環保組織組成跨國團隊進行研究，積極規劃適當的防範措施，因而有「京都議定書」的出現，此協議要求各國在限期內必須適度地降低二氧化碳及其他溫室氣體的排放量。在此國際公權力的協定壓力成為事實後，積極尋找新的替代能源、加強推廣再生能源的使用、改變人們使用能源的習慣已是各國能源政策和環境政策迫不及待推廣並執行的國家要務。

再生能源可重複利用的特性，普遍受到各國的重視及積極開發，其中源源不絕的太陽能是最容易取得的自然資源，且較不易受地形限制，於非陰雨的白天隨時隨地就可取得，方便利用。太陽所產生的光和熱，是提供地球多采多姿生態不斷循環進行的主要原動力，也是地球上其他能源資源的最起始產生的源頭，亦即自然界所有的能源和發電資源其實均是來自太陽能作用的結果，如石油、天然氣、煤等化石燃料，水力、風力、溫差、潮汐、核能、生物質能等發電資源。因為有太陽源源不斷的向地球傳遞電磁波能源，植物才得以進行光合作用，將太陽能轉換為自身的養分。而動物再藉由攝取植物，從而得到自身活動所需之能源，所以太陽能也可以說是地球上一切生命的基礎，並經各種能源轉換過程逐漸形成在生活上不可或缺的電力供應資源。

近幾年各國多集中在太陽電池的開發研究，期望取代傳統石化能源發電，積極降低太陽能電池的生產成本和提高其光電轉換效率，並且利用相關經驗、數值分析和理論預測模式，研究高效率光電池之性質，積極開發高效能低成本的太陽能系統，以期能使太陽能電池和發電系統早日邁向普及化的目標。

對幾乎不擁有任何能源資源的台灣而言，政府和各界對此議題更加重視，故早已召集相關單位積極研擬新的能源法案以因應之。現階段多種正在開發的再生能源中最受國際重視、也最具發展潛力的是風力發電，其次是太陽能發電發熱的資源，以及太陽與風力的混合發電。除此之外，生物質能亦頗受重視，特別是以農業為主的國家。

三、太陽電池和矽質太陽電池簡介

太陽電池是運用光伏效應所研製出的一種光能轉電能的能量轉換元件[1]，經由太陽光照射元件內部特殊的半導體材料後，可把光的能量轉換成電能，瞬間就可產生可直接使用的電壓及電流，故稱此元件為太陽電池。太陽電池所採用的光伏原理和我們一般在金屬材料中所觀察到的光電效應(photoelectric effect)實際上是不同的，故太陽電池又稱光伏電池(Photovoltaic cell，簡稱PV cell)，其中的photo即表示光(light)的意思，而voltaic是光能轉換為電能所產生的伏特電位，亦即電力(electricity)之意。太陽電池的發電方式屬於綠色發電方

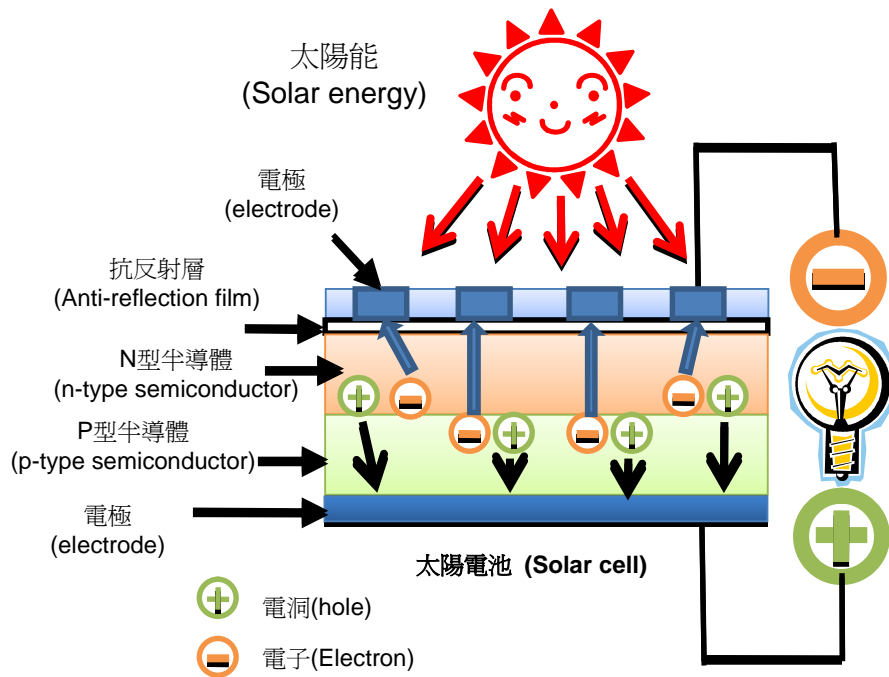
式，發電過程中不會產生溫室氣體，如二氧化碳等對環境有害的氣體，故在發電過程中不會對環境造成污染。

光電效應通常發生在以紫外光線照射金屬材料時，而產生光電流的效應[1]。1887年由Heinrich Hertz於實驗中所發現的現象，愛因斯坦並於1905年以光子(photon)的概念成功地解釋光電效應的現象和實驗結果。此效應是描述以光照射金屬表面，若入射光子的能量高於金屬的功函數(work function)，則金屬原子內的最外層電子吸收了足夠高的光子能量，即可脫離原子核和內層電子的束縛，而跳出金屬表面，成為真空中的自由電子。因照光而從金屬表面脫離的電子可採用正極電壓收集，收集所得的電子在電路迴路中形成電流，稱為光電流(photocurrent)。此實驗證明了電磁波亦具有粒子性，說明了波同時具有波動與粒子的雙重性，故被列為物理發展史上十大重要經典實驗之一。

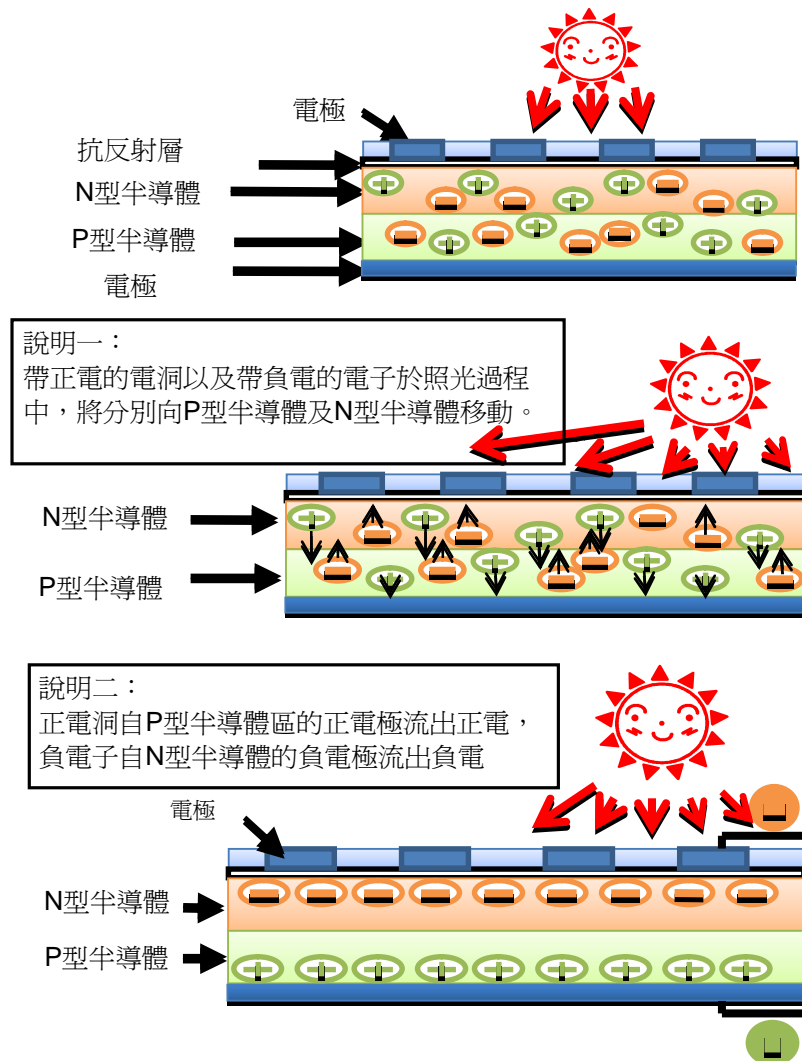
此實驗裝置主要是以二個金屬和一個電壓源連接而成，以被照光的金屬作為陰極的電子放射器(cathode emitter)，不照光的金屬則作為陽極，並做為脫離電子的接收器(anode collector)。外加的正電壓使得照光後脫離金屬原子束縛的電子可從陰極被吸引至陽極，並收集而形成光電流。目前用來偵測光的光倍增器(photomultiplier)即是此效應的主要應用之一。

此效應雖也具有光能轉換電能的效應，但因其能量轉換效率非常低，故對作為發電用的光電能量轉換器而言很不實用。此效應通常發生在金屬材料上，而利用金屬的光電效應做太陽電池的最大限制，在於一般金屬的功函數大部分落在3至5 eV之間，因此，只有能量高於紫外線以上的光子才能被吸收，並產生光電流。但來自太陽光的電磁波，能夠穿透地表上空之大氣層，抵達地球表面的電磁波之中主要為可見光，光子能量高於可見光的紫外線輻射量只占太陽光全光譜中很小的比例。也就是說，根據金屬的光電效應所製作的太陽電池其最大光-電轉換效率可能不超過1%，而實際實驗的結果更只有約0.001%的效率。故利用金屬的光電效應製做太陽電池，所得的輸出電流極微小，輸出電壓也不很高，故可輸出使用的電功率太低。因此該效應在太陽電池得應用上沒有實際的應用價值。

太陽電池雖然可以吸收太陽光能，並將之轉換成電能，具有發電的功能和特性，但其本身並不具備蓄電功能。一般固態半導體型之太陽電池的基本架構和工作原理如圖9.3-1所示。此類型的太陽電池主要是由一個 $p-n$ 接面做為光電轉換元件。



(a) 一般固態半導體型之太陽電池的基本架構



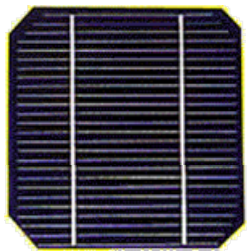
(b) 工作原理示意圖

圖 9.3-1 (a) 現今使用量最大之矽基太陽電池的基本結構和(b)工作原理示意圖。

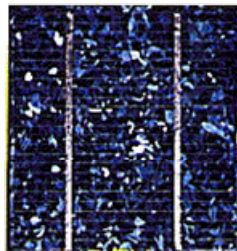
以摻雜少量硼(B)原子的 p 型矽基半導體當作基板(Si substrate)，以高溫熱擴散法將摻雜濃度略高於硼原子濃度的磷原子摻入 p 型的矽基板內，形成 $p-n$ 接面。 $p-n$ 接面是由帶正電的施體離子與帶負電的受體離子所組成，由正、負離子的存在，在此區域內形成一個內建電位(built-in potential)。此內建電位驅動原存在於此區域內的可移動載子分別向兩端移動，使得此區域的流動載子被驅離該區域，故稱之為空乏區(depletion region)。

當太陽光照射具有 $p-n$ 結構的半導體時，光子所提供的能量，可將半導體中的電子激發出來，產生電子-電洞對(electron-hole pairs)。光激發的電子與電洞均會受到內建電位的影響，電洞往電場的方向移動，而電子則往相反的方向移動。可用導線將太陽電池的正負極與外部負載連接，使電流連接起來，形成一個迴路(loop)，如此即會有電流流過外部負載，此即為太陽電池發電的原理。[1-3]

太陽電池所產生的電力可以儲存在蓄電裝置中備用，待需要時再取出使用。目前市面較常見到且電能轉換效率較高的太陽電池主要多是以矽質材料為主的單結晶矽(single crystal silicon)、多晶矽(polycrystalline silicon)和非晶矽(amorphous silicon，簡稱 a-Si)太陽電池，如圖 9.3-2 所示。太陽電池的產品多因不同的應用和需要而將電池元件以不同的串、併聯方式組成不同的集光模組方式運用，如圖三所示，故有許多種不同的規格和型號。購買時須慎選實際所需的規格和產品。以收集光能發電來說，大多是利用所謂的太陽能電池板將光能直接轉換為電能。



(a)單晶矽太陽電池



(b)多晶矽太陽電池



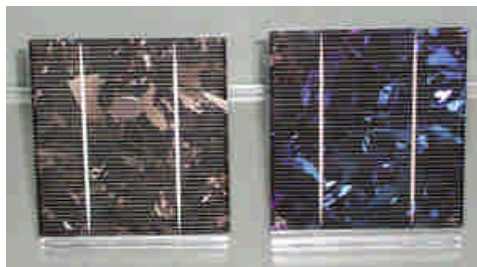
(c)非晶矽太陽電池



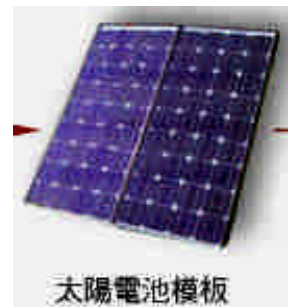
(d)可撓式太陽電池膜



(e)單晶矽太陽電池



(f)多晶矽太陽電池

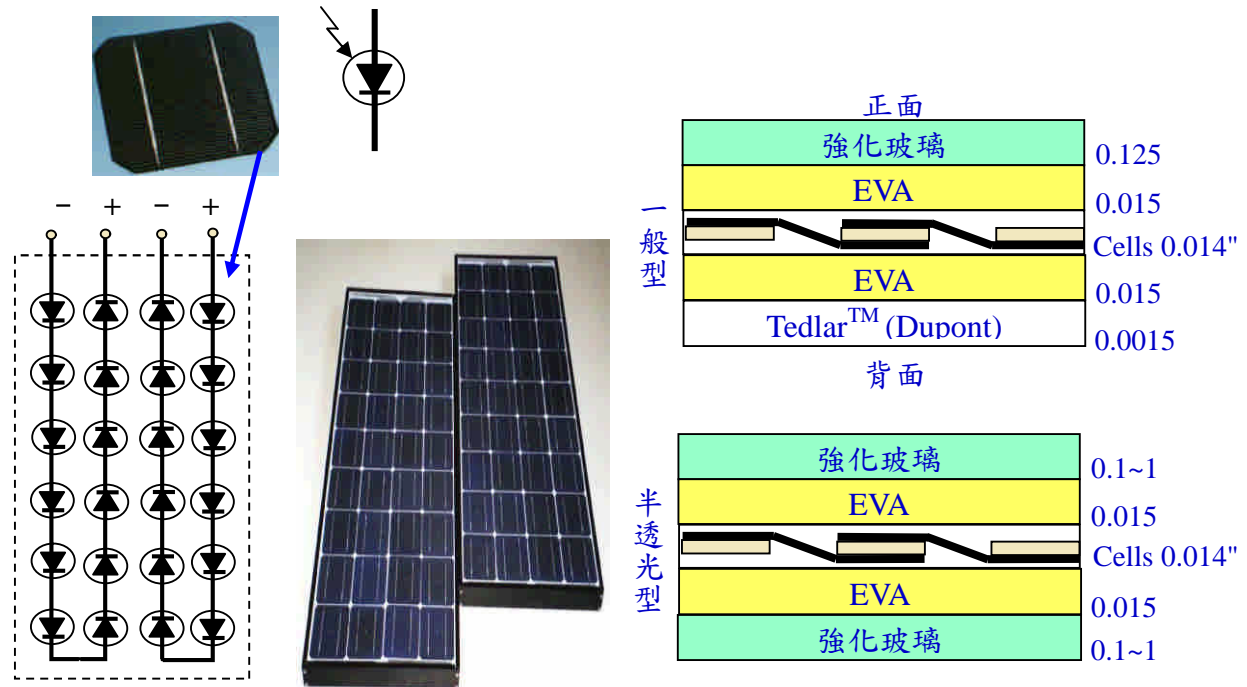


(g)太陽電池模板

圖 9.3-2：現今使用量幾種以矽質材料為基材的太陽電池實體圖，圖片引用自太陽光電發電視示範系統推廣計畫網站[4]。

(a)太陽電池元件單元

太陽電池模板



(b)太陽電池模板接線 (c)太陽電池模板實體照片 (d)太陽電池模板內部的結構

圖三 (a)太陽電池元件單元；(b)太陽電池模板的內部接線；(c)太陽電池模板實體照片；(d)太陽電池模板內部的結構。

太陽電池的種類繁多，依半導體材料的種類區分，除有前述所說的單晶矽、多晶矽、非晶矽等所製作的矽質太陽面板外，還有 III-V 族的砷化鎵(GaAs)、磷化銦(InP)、磷化鎵銦(InGaP)，和 II-VI 族的碲化鎘(CdTe)、硒化銦銅(CuInSe₂)等等各種不同系列的化合物半導體材料。按照更廣泛的材料分類則除一般半導體材料所製的電池外，還有染料敏化電池、有機材料電池等等。對於發電用的太陽電池來說最重要的參數是光能轉電能的轉換效率，目前矽基太陽能電池中的單晶矽電池的最高轉換效率(實驗室)為 29%，多晶矽電池為 24%，非晶矽為 17%。

目前各類太陽電池量產的平均轉換效率約為[2]：

- (1) 單晶矽：24 %
- (2) 多晶矽：20 %
- (3) 非晶矽：15 %
- (4) GaAs：26 %
- (5) CIGS：19 %
- (6) 多接面串疊型(InGaP/GaAs/InGaAs, multijunction tandem cell)：33%。

由於材料特性上的限制，結晶矽太陽電池的轉換效率幾乎已經達到最佳的水準，就材料的觀點來看，能夠再進一步提升的空間實在有限，目前比較有成長潛力的為多接面串疊型太陽電池，根據美國能源部的報導此型太陽電池效率可達到 40% 以上[1-3]，但其結構和製程太複雜，現階段尚不符合商品化的成本。目前實驗室所製造出的太陽電池，雖然其轉換效率幾乎可以

達到材料本身所能提供的最佳水準，但只可惜他們的製造技術和過程多半過於複雜，故價格仍偏昂貴。

製作太陽電池需要有完備且精密的生產設備及高層次的製程技術，如何大幅降低太陽電池的製造成本？及有效地提升其能源轉換效率？太陽能應用若要能推廣到每一戶家庭，成本是最重要且實際的考量問題之一。目前矽質太陽電池雖然提供較高的電能轉換效率，但其效率和成本依矽材的結晶性不同，而有變化，約在 10%-15%。但傳統矽基材之薄膜式太陽能電池必須在無塵、真空的環境下進行生產，製造過程相當繁瑣，且由於受限於特定製程環境的生產設備之尺寸規格限制，所以，矽基材半導體太陽能電池的面積尺寸較小，無法製造大面積的電池元件。

由於所需的製程設備儀器較多且昂貴，製作技術門檻和成本也較高，故相對地售價也較為昂貴。雖經科學家多年來的努力，近年來太陽電池研製技術雖逐漸成熟，以矽質半導體為基質材料的高效率太陽電池也已達量產階段，使得矽基質太陽電池得到迅速的發展，也因半導體製程技術的成熟和快速發展，而大幅降低售價。現今矽太陽電池已有較大面積的商業產品上市。矽太陽電池的價格也已從早期的 50 美元/峰瓦 (瓦 = 1 kW) 降到目前的 3~5 美元/峰瓦，並分別以光能轉換為熱能的加熱方式或發電方式，和以光能直接轉換為電能的方式開始應用於一般社會大眾的日常生活中。商品化的價格也已逐漸降到一般社會大眾可接受的範圍。但在實際使用上，因光電轉換效率不夠高、高成本之矽質半導體材料和高精密製程技術等等因素，致使製作成本仍然偏高，且在使用效能還是偏低的情況下，仍無法達到全面的普及化。若太陽電池的材料和製程沒有任何更進一步的突破，則可再調降其成本的空間已很小了，所以若想在近期內得到大規模的低價應用似乎還不是很容易。若要普遍地應用到日常生活中，並廣為一般大眾所接受，則科學家和生產廠商還有一段很遠路要走。

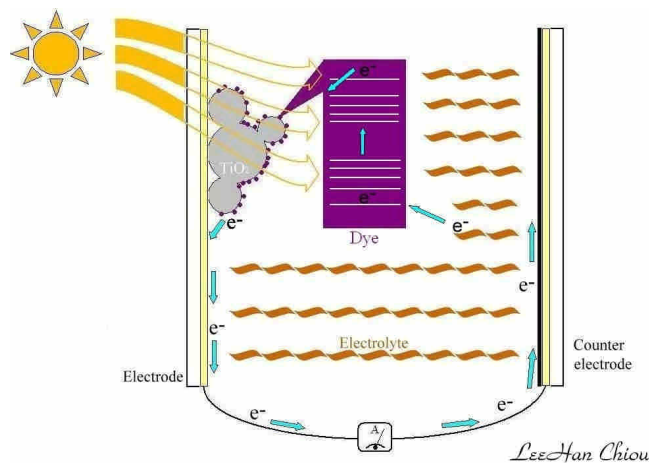
因本書篇幅有限無法在此詳細介紹一般矽質半導體太陽電池的工作原理，有興趣的同學不妨參閱「超高效率太陽電池—從愛因斯坦的光電效應談起」[1]。此篇文章對光電效應及光伏效應的原理和異同，以及此兩效應對太陽電池的應用有極為清楚且深入淺出的介紹和討論，文中並詳細地介紹未來對超高效率太陽電池的研發方向、可能遭遇的瓶頸和前途等等也又很詳盡的描述。此篇文章提供了不少了解太陽電池應該具備的基本知識。當然讀者也可以在國內外網站上收集到各種不同深淺度的相關資料。

欲開發具更高效率更低成本的新型太陽電池，不少科學家致力於將現在正熱門的「奈米材料」和「奈米製程技術」導入太陽電池的領域中。目前較被看好的太陽能電池有兩個系統，除前述所提的矽質多晶矽半導體固態電池模組外，另一為含有液態電解質的染料敏化太陽電池。染料敏化太陽電池的研究與開發由 Prof. M. Graätzel 在 1991 年於 Nature [5] 上發表了其擁有 8% 的能源轉換率，近年來的研究成果將染料敏化太陽電池的光電轉換率更提高至 11%。由於此類電池所使用的原料成本低，且製程容易，僅需簡單的製程設備，故可大幅地降低太陽電池的製作成本，是以染料敏化太陽電池目前被公認為最有發展潛力的再生能源之一。因而啟動了世界各國積極投入染料敏化太陽電池的研究與開發，如美國 NREL、德國 ISE、荷蘭 ECN、韓國 ETRI 日本 NEDO 等著名研究機構。下面即染料太陽電池的原理和發展情形做一些介紹。

四、染料敏化太陽電池的工作原理和製程概述[5-7]

就現階段太陽電池的市場佔有率而言，以矽質固態半導體材料為主。因其單晶矽太陽能電池的轉換率可達 20% 以上，元件品質佳、工作性能穩定，但因售價仍偏高，所以目前還是未能達到全面普及。19 世紀末，科學家發現某些有機染料能夠延長鹵化銀照相膠捲對可見光的使用週期和效率，因而得知可見光可有效地激發有機染料分子與半導體鹵化物晶粒之間的電子或能量轉移機制，而此染料敏化效應即是現代攝影技術發展的主要運用原理。最近科學家發現太陽光對部分染料分子和奈米半導體氧化物微粒間的作用也具有類似的敏化電子轉移效應。因而科學家最近根據類似的工作原理，導入奈米半導體材料和奈米製程技術，特別發展出一種可將太陽光能轉換為電能的新型太陽電池，稱之為「染料敏化太陽電池」。

此新型太陽能電池裝置亦可稱為「分子電子裝置」，其光電轉換的示意圖如圖 9.4-1 所示，是利用奈米材料的小粒徑、高表面積比、高活化的表面電位能和奈米級的多孔性等等奈米特性所開發出來的一種新型太陽電池。此類電池使用奈米級 TiO_2 晶粒與有機分子級染料聚合物做為材料，並導入與環境相容性高的光合作用之仿生技術所研製的第三代新型太陽電池。此技術與元件由 Grätzel 等人在 1991 年首度發表，故又稱為「Grätzel cell」。有別於利用光伏效應所製得的固態物理式矽基太陽電池，DSSC 是透過光電化學反應所製得的太陽電池，因利用帶有色彩的染料光敏化劑將吸收所得的太陽能透過光化學反應轉換成可用的電能，而電能可直接運用，亦可透過蓄電裝置儲存電能。因不同的染料含有不同的顏色，因此，也被稱為「彩色太陽電池(rainbow PV)」。



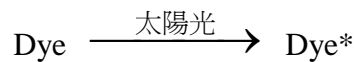
DSSC內材料的化學反應流程：

1. $\text{Dye (基態)} + \text{light} \rightleftharpoons \text{Dye}^* (\text{激發態})$
2. $\text{Dye}^* (\text{激發態}) + \text{TiO}_2 \rightleftharpoons e^-[\text{TiO}_2] + \text{Dye}^+ (\text{離子態})$
3. $e^-[\text{TiO}_2] + [\text{電解質 C.E.}] \rightleftharpoons \text{TiO}_2 + e^-[\text{C.E.}] + \text{energy}$
4. $\frac{1}{2} \text{I}_3^- + e^-[\text{電解質 C.E.}] \rightleftharpoons \frac{3}{2} \text{I}^- + \text{C.E.}$

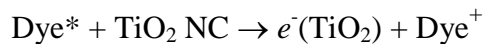
圖 9.4-1 染料敏化太陽能電池之工作原理、光電轉換過程的示意圖與化學反應流程。Dye 表染料，C.E. 為電解質。

DSSC 的工作原理如圖 9.4-1 所示，因有類似自然界的光合作用，其主要工作運作流程為：(1)利用有機染料吸收光能，以產生電子的激發、能帶變遷與轉移而產生電位和電流；(2)並應用複合層疊結構增加光能的吸收率與傳導電子的收集率。製作方式和所需的技術層次相對簡單許多，因而深受學界和產業界的矚目。下面簡單地說明該類元件內電流產生的機制：

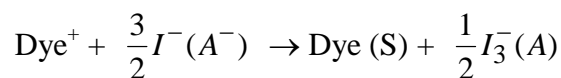
1. 染料有機分子(Dye)吸收太陽光能後，使染料分子內的電子獲得足夠能量從基態躍遷到高能階的激發態(Dye*)。有效的染料分子為含有花菁素的染料，其色澤偏深藍色色系，故主要是吸收太陽光譜內紅外光至紅光範圍的可見光。



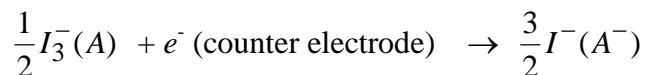
2. 染料分子中處於高能階激發態的電子不穩定，故不穩定的電子易於被與之緊鄰的奈米 TiO₂ 微晶(Nanocrystalline, NC)所吸引，而選擇注入到 TiO₂ 的導帶內，獲得額外電子的 TiO₂ 則形成 *n*-型半導體，而失去電子的染料則轉為帶正電的離子而形成氧化態。



3. 失去電子的染料，會從液態電解質 I^-/I_3^- 中的電子供體補充電子，以使染料恢復電荷平衡而回到基態。



4. 進入 TiO₂ 導帶的傳導電子，在互相連接的奈米 TiO₂ 微晶網絡中交互傳遞導通匯集於透明電極上，最後終將透過外部迴路傳遞到另一電極基板表面的導電層，產生流通的電流稱之為光電流。



DSSC 電池的構造和現在一般市售的矽質半導體光伏太陽電池不同，其基板通常是透光導電玻璃基板，也可以是透明且可彎曲的有機聚合物膜片(polymer foil)，玻璃片或有機聚合膜上塗有一層可讓太陽光穿透，且亦可導電的薄薄透明導電氧化物(transparent conducting oxide, TCO)薄膜。此既可透光又可導電的氧化物通常是使用摻雜氟的二氧化錫(SnO₂:F)玻璃基板，簡稱 FTO 玻璃。

此類新型太陽電池的簡易實際製程，是將奈米級的 TiO₂ 粉末(粒徑約 10~20 nm)直接均勻地溶於有機溶劑內，形成膠質體，然後利用類似網版印刷的塗佈方式將其均勻地塗佈於 FTO 導電玻璃上，形成一奈米多孔薄膜(nano-porous film)。TiO₂ 粉體為便宜、能隙寬廣且蘊藏量豐富的半導體材料之一，此材料因其各種優異的性質，故廣泛地應用於油漆工業、生醫、國防等重要的行業之中。經由熱處理過程，含 TiO₂ 的膠質塗佈層會形成類似海綿狀的薄膜，燒結後的膠質薄膜具多孔性與高表面積比等有利於染料吸收太陽光和電子轉移效率的結構特性。

接著再使多孔性膜上的 TiO₂ 奈米粒周圍均勻地沾塗上一層可以吸收太陽光的有機染料。通常此有機染料是採用含有鈦離子的錯合物，如 ruthenium polypyridyl complex。可將含

多孔性塗佈層浸入含有鈦之染料、花青素或綠色的葉綠素等染料溶劑內。接著在另一片導電玻璃上鍍上一層白金膜或碳觸媒膜當作對應電極。最後，將兩電極如三明治方式疊裝在一起，再從二層電極之間注入含有碘分子和三碘化鉀(iodide/tri-iodide, I_2/KI_3)混合液的電解質(electrolyte)。至此即完成簡易的染料敏化太陽電池的製作。

電池照光即可驅動元件內染料分子和 TiO_2 分子間電子的流動和轉移，使之產生電流和電位，而形成太陽電池裝置。底層的電極除了也是使用含 TCO 膜的 FTO 玻璃基板外，為提昇其光電轉換效率，商品化的產品還會再鍍上一層白金膜作為催化劑(platinum catalyst)，使加速電解質的電解反應。

五、實驗材料和藥品

美國威斯康新州立大學麥迪遜分校化學教育研究所(Institute for Chemical Education, University of Wisconsin-Madison, WI, US)特別發展一套「二氧化鈦(TiO_2)覆盆子染料敏化太陽能電池(Titanium Dioxide Raspberry Solar Cell)」DIY 實驗，讓初學者透過 DIY 製作，能夠在很短的時間內明瞭 DSSC 的工作原理和製作流程。[8] 本章節內部份實驗即參考此研究所網站內的資料，和 Greg Smestad 所發展的「奈米晶化太陽電池套件：再現光合作用」(Nanocrystalline Solar Cell Kit: Recreating Photosynthesis)教學實驗[9]。

以下即根據我們多次實作此實驗的經驗，並經修正所得的詳細實驗步驟流程、實驗照片和注意事項所做的描述。我們亦提供了每一實驗過程之數位影片檔案於我們的教學網站 www.phys.nthu.edu.tw/~mftai 上，以供實驗者自我學習和參考瀏覽用。實驗中使用覆盆子的藍色梅汁作為吸收陽光的染料分子，銦摻雜之氧化錫 ITO 或氟摻雜之氧化錫 FTO 作為基板和導電電極，另一對應電極則使用石墨碳膜，以奈米級二氧化鈦晶粒則做為電子轉移之介質，以作為產生電壓、電流之太陽能電池所需的主要半導體材料。此 DIY 實驗所需的藥品和器材詳列於下：

1. FTO 透光導電玻璃($SnO_2:F$ transparent conductive glasses)或 ITO($SnO_2:In$)玻璃片：至少兩片。FTO 玻璃是一種可耐溫至 $500^\circ C$ 以上，且既可透光亦可導電的氧化物玻璃基板。因製程中有一步驟需進行 TiO_2 膠質體的高溫燒結處理，燒結溫度需高至 $450^\circ C$ 左右，故導電透光玻璃最好選用可耐溫至 $500^\circ C$ 以上的含氟導電透光玻璃(FTO)。玻璃片的尺寸不拘，但兩片大小最好一致。FTO 玻璃較貴些，且較不易購買到，若不得已亦可使用 ITO 玻璃(Indium-doping Tin Oxide 含銦摻雜的氧化錫)，但因當溫度高於 $200^\circ C$ 以上，ITO 玻璃的晶格結構即會受高溫影響，而會發生晶格形變，以致使之尚失原有的導電性和熱穩定性。所以，用 ITO 玻璃所製得的染料敏化太陽電池的光電轉換效率和性能會比較差。
2. 奈米晶化的二氧化鈦粉末：數克，粉末粒徑約 10-50 nm，粒徑越小，轉換效率越好。250 克的 TiO_2 奈米晶粉售價約 NT\$1200，500 克則僅需 NT\$2000。圖 9.5-1 之玻璃瓶內即是二氧化鈦奈米晶粉。



圖 9.5-1 奈米級二氧化鈦晶粉。

3. 乙酸溶劑：數毫升，不過廠商不零售，只好買一瓶囉，還好乙酸並不貴。
4. Triton X-100 表面界面活性劑：其實就是用以清洗碗盤用的一種清潔劑，化學實驗室和生物實驗室亦常用以清洗實驗器皿，一般的化學材料行或有賣廚用清潔物品的商店中都能很容易買到。
5. 碘粒：數克，不想買一瓶的話，通常學校的化學實驗室一定有，不妨跟化學實驗室要一點。
6. 碘化鉀電解液(KI₃ electrolyte)：數毫升，也可跟學校化學實驗室要一些。
7. 有機染料分子：覆盆子、藍梅果汁、黑梅、澎大海、石榴果和 Bing 櫻桃子汁液內都含有花菁素染料分子，所以，均可以作為本實驗中所需的染料，但呈現紅色系的果汁和草莓汁則沒用。可自己到水果攤行或果汁店購買新鮮的藍梅或覆盆子果粒，必需是具有藍色或藍紫色的多汁果粒，經研磨後所萃取得的汁液即可做為本實驗中所需的染料。但此兩類果粒之收成季節極為短暫，若不是在其生產季節的話，一定不容易買得到。此時只好使用人工製作的化學染色，通常是使用含有鈦(Ru)離子的錯合物，如 ruthenium polypyridyl complex。可從一般的化學藥品行中購得所謂的 N3 染料，其化學學名為 cis-di(thiocyanato)-N,N'-bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)Ru(II)，或 N719 染料，此為 N3 染料所衍生的另一種染料 (N719: a two-fold deprotonated form of N3 dye)。不過這兩種染色均價格不斐，但 1 克的量可做很多很多太陽電池，且做出來之太陽電池的品質和性能相然是會比用新鮮果汁的好很多囉，畢竟一分錢一分貨嗎！
8. 蒸餾水或去離子水：若蒸餾水和去離子水不易取得的話，則可使用一般商店中可購得的飲用蒸餾水也可以，或使用乾淨的自來水。
9. 研鉢和研杵：一組
10. 杓子：一支
11. 滴管、量筒、燒杯各一支
12. 3M 魔術膠帶一卷
13. 玻璃棒：半徑小於 5 mm，長度 20-30cm 的圓柱型玻璃棒，或是表面光滑、半徑均勻的棒子，尺寸不是絕對重要。若無玻璃棒的話，一般顯微實驗常用的載玻片亦可替代使用。
14. 鑷子：一支
15. 可控溫平板式加熱器：一個，若有可控溫的高溫爐則更佳。若沒有此兩種實驗用可控溫的加熱器的話，其實可用煮東西用的平板式電熱爐或小烤箱，只是溫度高低的設定就得需要一點技巧了。
16. 蠟燭：一支
17. 小鋼夾(binder clips)：兩個
18. 三用電表：一個，測量基板表面電阻值和太陽電池之電壓和電流時用。
19. 測試導線：兩條，一端為鱷魚夾，另一端為香蕉插頭的導線。
20. 白熾燈泡或投影機的燈泡：一個，所產生的光源可以用來替代戶外的陽光。

六、實驗步驟

1. 製備 TiO₂ 奈米晶粒表面包覆乙酸分子之膠質體：將約數克重的奈米級二氧化鈦(TiO₂)晶粉放入研鉢中，事先須先將二氧化鈦粉末以微溫加熱烘乾以除去多於濕氣，再以研鉢專用的

研磨杵將可能因貯存過久而產生團聚現象的 TiO_2 粉末均勻地研磨開來。而後加入數滴經稀釋過的乙酸溶劑，再充分研磨，研磨過程中陸續加入數滴稀釋過的乙酸溶劑，直到混合物形成質感滑順的膠質懸浮物。如此，可使乙酸分子包覆於 TiO_2 奈米晶粒的表面，而形成核心為固態奈米晶粒，核外層為有機高分子材料的核層結構(core-shell structure)。實驗過程如圖 9.6-1 所示。

稀釋乙酸溶劑的調配法為將 0.1 mL 的濃縮乙酸均勻混合於 50 mL 的蒸餾水或去離子水中即可得。若蒸餾水和去離子水不易取得的話，則可使用一般商店中可購得的飲用蒸餾水也可以，或可使用乾淨的自來水。

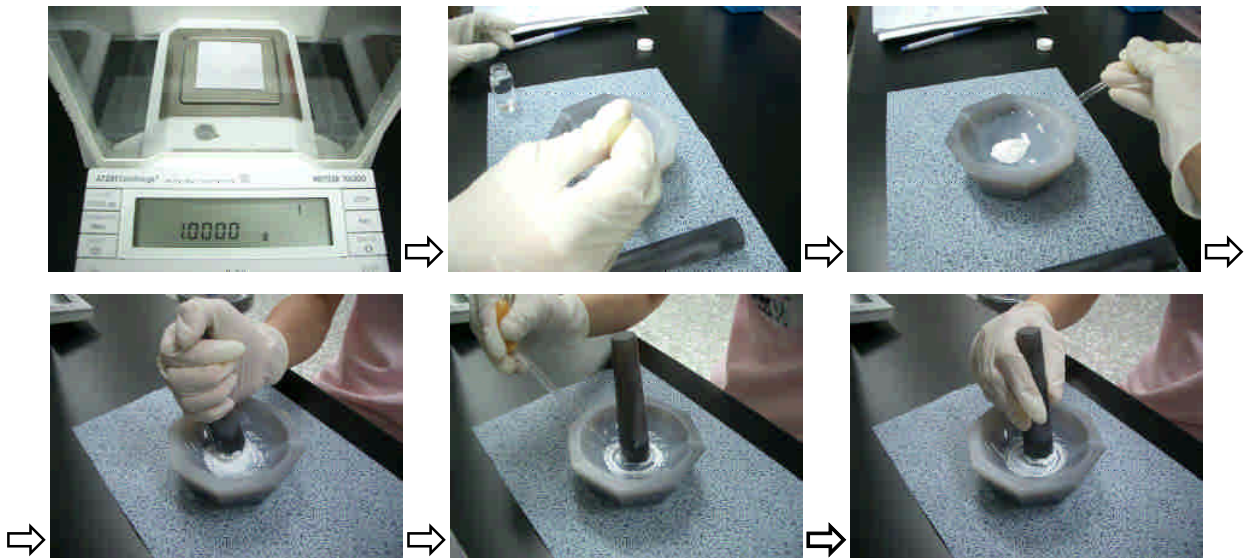


圖 9.6-1 DSC 太陽電池 DIY 製程實驗步驟 1：以研磨混合的方式將有機高分子乙酸溶劑包覆於奈米級二氧化鈦(TiO_2)晶粉的表面上，以形成具黏稠性的膠質體材料。

2. 膠體材料的表面修飾：如圖 9.6-2 所示，於上述步驟所得的膠質懸浮體中，再加入幾滴 Triton X-100 界面活性劑，然後再次充分地均勻研磨，最後可獲得黏稠狀的膠質混合物。Triton X-100 表面界面活性劑其實就是清洗碗盤用的一種清潔劑，化學實驗室和生物實驗室亦常用以清洗實驗器皿，一般化學行或有賣廚用清潔物品的店中均可買得到。



圖 9.6-2 實驗步驟 2：以常作清洗碗盤用的清潔劑 Triton X-100 作為界面活性劑，用以分散及修飾奈米微粒，增加二氧化鈦(TiO_2)膠體之表面張力。

3. 檢測 FTO 或 ITO 玻璃基板表面導電層之導電度：實際上是以測量基板的表面電阻值，取代其導電度的檢驗，表面電阻值越低表示基板的導電度越高。良好的透光導電(TCO)薄膜

具有極佳的導電特性，其電阻係數可低至 $2 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 以下，約為最佳導體銀金屬的 100 倍，故必須用四線量測法，且使用比較精密的四位半或五位半以上的電表測量，才能消除來自接觸電阻的誤差，獲取準確的基板表面電阻值。但一般為求簡便，可簡單地用三用電表的電阻檔檢驗表面電阻值。若所使用的三用電表為一般手上型三位半電表或指針式電表，且採用兩線測量法測量電阻值的話，如圖 9.6-3 所示，則所測的電阻值應該約在 10-50 Ω 之間，此測量值比實際的電阻值高好幾個數量級，表示所測得的電阻值主要是來自測試探棒和基板表面間的接觸電阻值。但若所測出的電阻值高於 50 Ω 許多的話，則表示基板表面的實際電阻值過大，導電度不佳，則需要另更換一片導電度均勻且良好的基板。



圖 9.6-3 實驗步驟 3：用三用電表檢測透光導電玻璃基板表面導電層之導電度

透光導電玻璃的補充說明：ITO (Indium-doping Tin Oxide 含銦摻雜的氧化錫)玻璃為在玻璃基板的其中一面上鍍有一層具導電性之銦摻雜氧化錫薄膜的特殊玻璃基板。此類玻璃基板目前為平面顯示器和太陽電池元件的關鍵性材料之一，主要作為平面顯示器的影像顯示面板和太陽電池的透光導電基板，能讓光線穿透。但因 ITO 玻璃當承受溫度高於 250°C 以上時，其導電性和透光性均會大幅降低，故對於含有高溫處理的製程，ITO 便不再適用。故本實驗最好能使用 FTO 玻璃做為基板，若不可得的話，則仍可以 ITO 玻璃取代之。

染料敏化太陽能電池、電致變色和光催化等方面之產品對基板的透光率和導電率要求很高，譬如在光學應用方面，要求對可見光要有好的透射性，但對紅外光則要有良好的反射性。故此類應用所需的玻璃基板之基本特性要求(a)表面電阻低、(b)透光率高、(c)面積大、(d)重量輕、(e)易加工、(f)耐衝擊。[10] ITO 和 FTO 玻璃因符合這些性質，故在上述領域的產品中具有很高的應用價值。FTO 導電玻璃則為摻雜氟的 SnO_2 導電玻璃($\text{SnO}_2\text{:F}$)，故簡稱為 FTO，亦為透光的導電玻璃，對可見光的透光率可高達 90%。對厚度為 2.2 mm，面積大小為 200 mm*150 mm 的 FTO 電阻則約為 15 Ω ，其導電度雖不及 ITO 玻璃，但因可承受較高的溫度，故可以做為 ITO 導電玻璃的替換用品。廣泛地用於液晶顯示器、光催化、薄膜太陽能電池的基板，市場的需求量極大。[10]

4. 將玻璃基板置於桌面上，使可導電的面朝向上，並將略具厚度(~40-50 μm)的 3M 膠帶貼附於玻璃基板的三側邊，再另外用較寬的膠帶將基板固定於實驗桌面上，如圖 9.6-4 所示，以利下一實驗步驟的進行。使用沾有些許乙醇的棉花棒或擦拭紙(最好使用不會起纖維的紙質或棉棒)將玻璃片上的指紋或油脂性的雜質清除乾淨。



圖 9.6-4 實驗步驟 4：略具厚度($\sim 40\text{-}50\ \mu\text{m}$)的 3M 膠帶貼附於玻璃基板的三側邊，再另外用較寬的膠帶將基板固定於實驗桌面上，

5. 如圖 9.6-5 所示，取一些實驗步驟 2 所得的糊狀膠質材料，將之沾附於導電基板上，然後使用直徑均勻的玻璃棒將 TiO_2 膠質均勻地塗佈於玻璃基板上。基板三側邊所黏貼之膠帶的功能是用以提供約 $40\text{-}50\ \mu\text{m}$ 厚度的襯墊用，當用玻璃棒碾平 TiO_2 膠質時，可以藉以控制 TiO_2 的塗佈厚度。

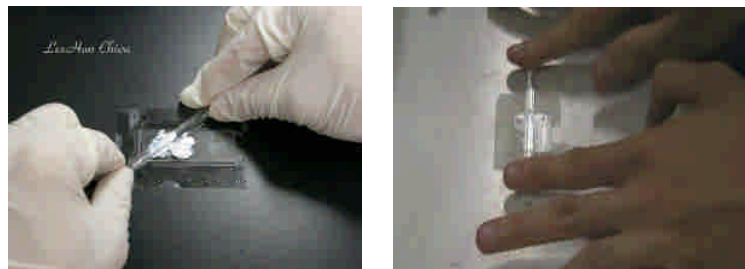


圖 9.6-5 實驗步驟 5：用玻璃棒將 TiO_2 膠質均勻地塗佈於導電玻璃基板上。

6. 塗佈完成後用微型鑷子小心地除去玻璃基板上的膠帶，小心不要刮傷所塗佈的 TiO_2 膠質層，也盡量避免於膠質層完全乾燥時才撕去膠帶，如圖 9.6-6 所示。



圖 9.6-6 實驗步驟 6：用鑷子小心地除去玻璃基板上黏貼的膠帶。

7. 如圖 9.6-7(a)和(b)所示，將塗佈了 TiO_2 膠質層的玻璃基板置於平板式加熱器的加熱平板上，加熱 10-20 分鐘。此加熱過程最好能在化學抽風煙櫃中進行。在烘乾過程中，膠質內的有機溶劑乙酸和介面活性劑 Triton X-100 會逐漸被烘乾， TiO_2 膠質的顏色會逐漸轉變為棕色。持續加熱，最後當乙酸和介面活性劑被全完驅離 TiO_2 粒子的表面，而形成具膨鬆多孔洞之白色 TiO_2 層膜，然後呈現如圖 9.6-7(c)中玻璃基板面上所示較深的顏色。此時即可停止加熱，然後讓玻璃基板慢慢地冷卻到室溫。若實驗室內有高溫爐或烤箱的話，亦可直接置放在高溫爐內或烤箱中，使用 $\sim 450^\circ\text{C}$ 的溫度烘烤且升溫速率不得太快，玻璃基板

和 TiO_2 膠質層的受熱會較均勻，最後所獲得之太陽電池的效率有可能會較佳。

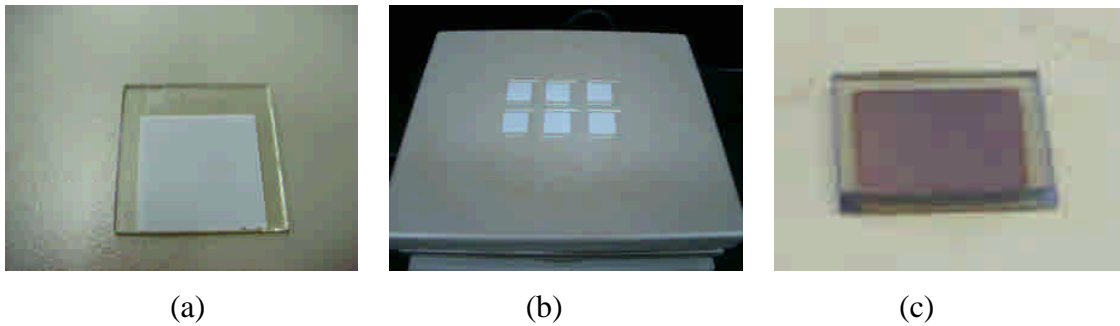


圖 9.6-7 實驗步驟 7：將 TiO_2 電極置於平板式加熱器的加熱平板上，以約 170°C 的高溫熱處理 TiO_2 膠質層。(a)高溫處理前的情形，(b)加熱處理時的情形，和(C)高溫處理後的結果。

8. 如圖 9.6-8 所示，將烘烤過的 TiO_2 電極置放到含有花菁素染料的溶液中，浸泡一段時間。覆盆子、藍梅果汁、黑梅、石榴果和 Bing 櫻桃子汁液內都含有花菁素染料分子，所以，均可以作為本實驗中所需的染料，但呈現紅色系的果汁和草莓汁色素增感的效果較差。當具多孔性的 TiO_2 層逐漸吸收果汁中的花菁素染料，則會使 TiO_2 產生顏色變化，並使染料分子與 TiO_2 分子中的 Ti^{4+} 離子結合。

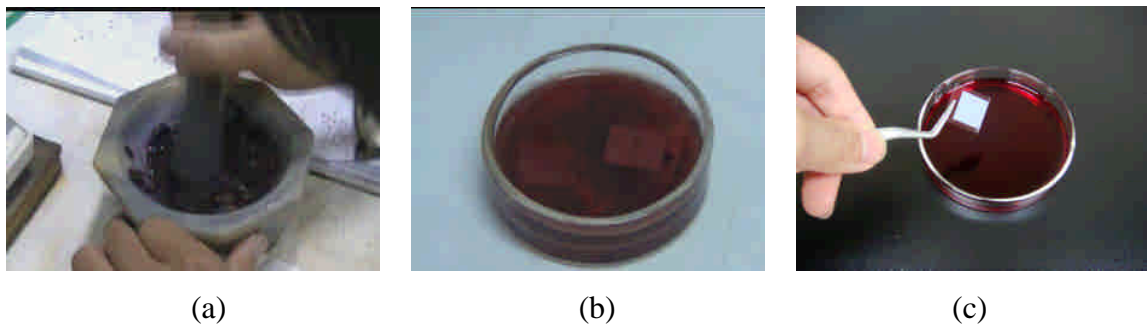


圖 9.6-8 實驗步驟 8：(a)研磨果粒以獲取藍紫色汁液作為染料，(b)將高溫處理過的二氧化鈦電極置入稀釋過的染料溶劑中浸泡一小段時間，(c)或用色素純度及濃度較高之乙醇粹取法所製作的染料，好處為較無果食及其他雜質碎屑，易於大量製作染料溶液。

9. 用蒸餾水或去離子水緩緩沖洗浸漬過染料的 TiO_2 電極，接著再用乙醇溶劑沖洗，將附著於膠質層內的奈米級孔洞中不易自行揮發的水分清除乾淨，如圖 9.6-9 所示。因水可溶解於乙醇中，再透過乙醇的高揮發性質，可以很容易地在短時間內將水分蒸發至大氣中，此法也是半導體製程中經常用以清除殘餘在基板上之水分的方法。若蒸餾水和去離子水不易取得的話，使用乾淨的自來水或一般商店可購得的飲用蒸餾水也可以啦。



圖 9.6-9 實驗步驟 9：(a)以蒸餾水或去離子水沖洗浸漬過染料的玻璃基板，(b)接著再用乙醇溶劑沖洗，將附著於膠質層內的奈米級孔洞中不易自行揮發的水分清除乾淨。

10. 另取一片透光導電玻璃基板，使用耐高溫的鑷子或夾具夾住玻璃基板，並使含導電膜的玻璃面朝下，如圖 9.6-10 所示，面對點燃的蠟燭燭火，使之在燭火上方來回移動，燭火因燃燒所產生的碳煙分子會附著在玻璃基板的導電層上，形成一層均勻的導電碳膜，以作為太陽電池元件的對應電極(counter electrode)。讓基板重複且快速地來回經過火焰的中心部份，如此所獲得的碳膜品質最佳。完成碳膜披覆後，以棉花棒刮除基板三邊周圍部分的碳膜。

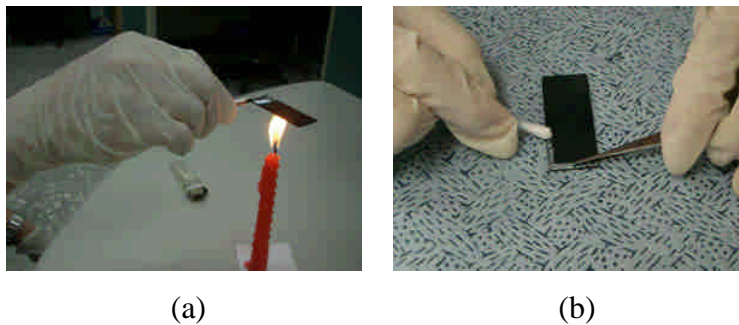


圖 9.6-10 實驗步驟 10：(a)取另一片玻璃基板，使之可導電的一面在蠟燭燭火的烘烤下，披覆上一層均勻的導電碳膜，以作為太陽電池元件的對應電極。(b)完成導電碳膜披覆後，以棉花棒刮除基板三邊周圍部分的碳膜。

11. 吸附染料的 TiO_2 膠質膜玻璃基板面與附著了導電碳膜的玻璃基板面彼此面對面錯開一小段距離地堆疊在一起，用小鋼夾夾緊兩片玻璃基板，形成如三明治的組裝。組裝時，如圖 9.6-11 所示，所示，需使兩玻璃面未塗佈任何膜的側邊分別做為三明治結構的左右兩側邊，使之不屬於三明治結構的一部份，如圖十六中之箭號所示處，作為電極外接之端點。

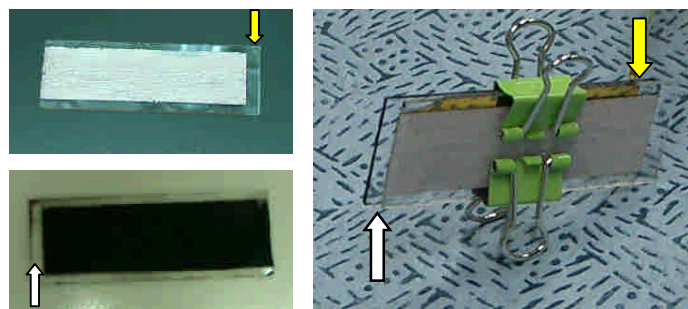


圖 9.6-11 實驗步驟 11：以小鋼夾將含有染料和 TiO_2 膠質膜的基板以及批覆了導電碳膜

的玻璃基板組疊固定。

12. 注入電解質：將濃度為 0.5 M 的 KI 溶液和濃度為 0.05M 的碘液(I_2)混合，並將混合液溶解於無水的甘醇(即次乙基乙二醇)中，形成含有三價碘離子的碘化鉀(KI_3)電解溶液，如圖 9.6-12 (a)所示。用滴管如圖 9.6-12(b)所示，將數滴配製所得的電解液從三明治組疊結構邊緣兩片玻璃基板的空隙中滴入。電解液會以毛細管的滲透作用方式，將電解液均勻地分佈至兩基板內。

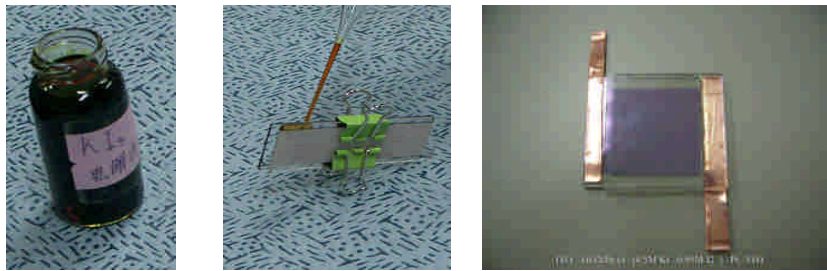


圖 9.6-12 實驗步驟 12:(a)濃度為 0.5 M 的 KI 溶液和濃度為 0.05M 的碘液(I_2)混合而得的電解液；(b)將數滴配製好的電解液從三明治組疊結構邊緣的兩片玻璃基板縫隙中滴入。電解液會以毛細作用的擴散方式，使電解液均勻地分散至兩基板內。(c)完成的電池元件再以銅導電膠帶將兩電極黏貼成接觸面積較大效果較好的電極。

13. 測量太陽電池的特性參數-開路電壓(open-circuited output voltage) V_{OC} 和短路電流(short-circuited output current) I_{SC} ：是取一端為鱷魚夾，另一端為香蕉插頭的導線兩條，將兩條導線之鱷魚夾端分別夾於兩玻璃基板未附著到碳膜和未塗佈 TiO_2 膠質膜的側邊玻璃片上。然後再將兩導線的香蕉插頭端分別插到三用電表用於測量電壓檔的兩個輸入座上。通常將負電極接到塗有 TiO_2 膜的玻璃基板上，正電極則接到沾附有碳膜的玻璃基板上。(a) 測量在沒有陽光照射下，自製之染料敏化太陽電池的輸出電壓和電流。(b) 將自製的染料敏化太陽電池和三用電表移到屋外能夠照射到陽光的地方，測量在陽光的照射下，太陽電池的輸出電壓和電流的變化情形。

在所製作的 DSSC 尚未移到戶外受太陽光照射或尚未被強光照射時，DSSC 的輸出電壓和電流值均非常小。製作良好的 DSSC 在充足的陽光照射下，可得到高達約 0.5 V 的開路輸出電壓 V_{OC} 。短路輸出電流 I_{SC} 則是依吸附染料之光學與化學特性影響較大，整體轉換效率來說，也並非製作出越大面積的 DSSC 其效率就越佳。

染料敏化 TiO_2 奈米晶太陽電池的典型 IV 特性曲線如 9.6-13 所示，總輸出電能和太陽電池的面積大小和單光的強度有密切的關係。開路電壓 V_{OC} 和短路電流 I_{SC} 是太陽電池特性的二個重要參數，一般這兩個元件參數的值越大，則通常表示太陽電池所能產生的電能(IV 曲線下的面積總和)也就可能越高，意即電池的光電轉換效率也越高。當太陽電池短路(short circuit)時，也就是 $V=0$ ，其短路電流(short-circuit current)則為 I_{SC} ，意即當太陽電池短路時，短路電流就是入射光所產生的光電流(light current) I_L ，此為該太陽電池所能提供的最大輸出電流。若太陽電池開路 (open circuit) 時，也就是 $I=0$ ，其開路電壓(open-circuit voltage)，此亦為該太陽電池所能供應的最大輸出電壓。

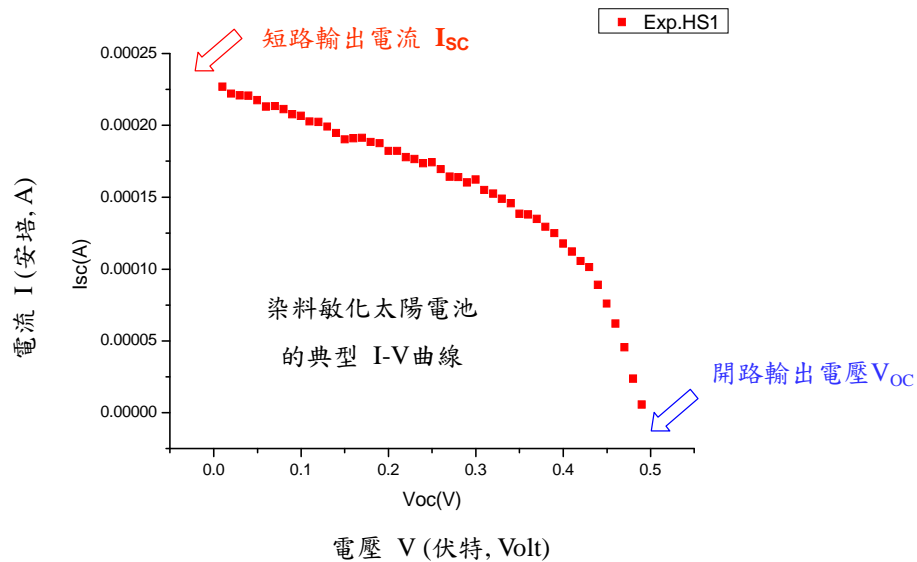


圖 9.6-13 染料敏化 TiO₂ 奈米晶太陽電池的實測 IV 特性曲線。

本實驗中所用的染料分子和所製作得的太陽電池主要是吸收陽光中偏紅光區的可見光。對能量較高的藍光和紫光系列的電磁波的吸收量有限。

14. 在室內，則可以白熾燈泡或投影機的燈泡所產生的光源取代戶外的陽光，照射製備所得的太陽電池表面，然後使用三用電表觀測電池罩光前後所產生的電壓和電流變化。螢光燈管的紅光電磁波的量較少，故不適用。如圖 9.6-14 所示。



圖 9.6-14 實驗步驟 14：以白熾燈泡所產生的光源取代戶外的陽光，照射製備所得的太陽電池表面，然後使用三用電表觀測電池罩光前後所產生的電壓和電流變化。

15. 重複上述製程，製備不同面積大小的太陽電池，並分別測量每一電池的開路電壓 V_{OC} 和短路電流 I_{SC} 二個特性參數值。電池面積較大者，在罩光後可提供較高的短路電流，但開路電壓值大致相同，變化應該不大。除非所製作的 DSSC 品質差異很大。
16. 串、並聯太陽電池形成太陽電池模組：雖然單一太陽電池所能提供的最大電壓可達 0.5-0.6V，電流也僅數毫安培，對大部分日常的電器用品而言，電壓實在太低，電流也不夠大。但可透過串聯多個太陽電池，以提供較高的輸出電壓；或可透過並聯數個太陽電池，以獲得較大的輸出電流。亦可因應不同的電壓和電流需求，將太陽電池作適當的並、串聯，以形成太陽電池模組，如圖 9.3-2(g)和圖 9.3-3 所示。
17. 應用範例：欲得較高的輸出電位，則可如圖 9.6-15 所示串聯多個染料敏化太陽電池，當串聯到六個自製的太陽電池，經罩光後，可得到 2-3 V 左右的輸出電壓，可用以驅動一般的

手上型計算機。表 9.6-1 列出三個家庭的常用小電器用品所需的電流量、電壓值，和若以 DSSC 做為電源供應器時所需的面積大小。

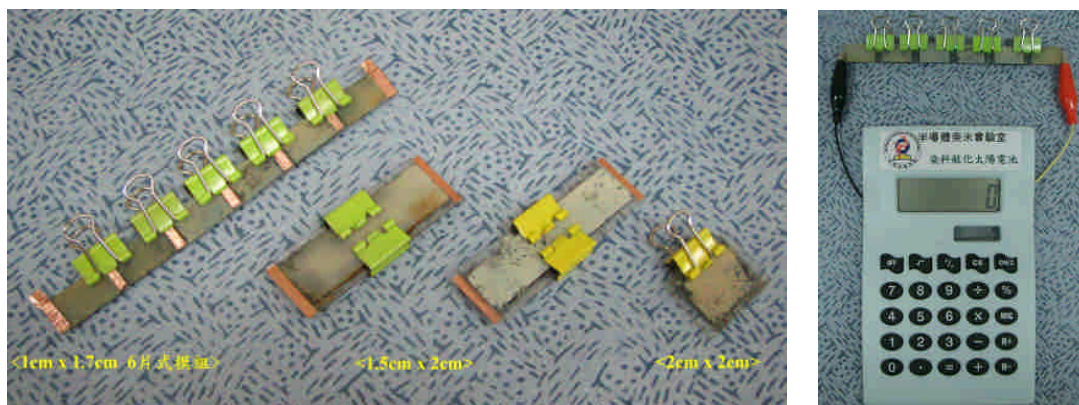


圖 9.6-15 (a)六個自製的 1 cm x 1.7 cm DSSC 串聯在一起的模組，(b)並用以供應一般手上型計算機所需的電力。

表 9.6-1：三個家庭常用的小電器用品所需的電流量、電壓值和若以 DSSC 做為電源供應器時所需的面積大小。

電器用品(Appliances)	電流(μA)	電壓(V)	DSSC 所需面積(cm^2)
電子錶(Watch)	0.6-1	1-1.2	2-3
計算機(Calculator)	2-3	1.5	4-8
智慧卡(Smart card)	5-10	1.5	5-7

18. 染料敏化太陽電池展示盒：筆者於 2006 年春天指導吳鳳技術學院電子工程系大四專題生邱立翰同學所製作的展示組見圖 9.6-16。



圖 9.6-16 自製的染料敏化太陽電池展示盒

七、結語[2-4]

傳統矽基材或薄膜式太陽電池必須在無塵室的高規格環境下製作，所需的製程技術層次高，製造過程繁瑣。故受限於特定製程環境及高價位的生產設備，所以，矽基材半導體太陽電池的面積尺寸亦有所限制，通常小於 8 英寸，且製作成本高。相對地，染料敏化太陽能電池不僅材料的成本低廉，且可利用低成本的製程技術，如印刷電路板所使用的網印技術，或狹縫型擠壓式塗佈方式(slot die coating)的製程。製程中所需要的技術層次也較低，製程簡單容易。且可在非真空環境與一般室溫下直接製作、組裝即可；此外更可大面積製作。製程設備與條件的簡化，使得染料敏化太陽能電池的生產成本大幅降低。根據美國 TRI 與日本 Nikkei Electronics 的報導，染料太陽電池的製作成本僅為一般傳統矽晶材太陽電池的 1/5 至 1/10，低廉的製作成本是產品商業化發展最主要的推動要素之一。

染料敏化太陽能電池的另一項特點是其具有半透明(semi-transparent)的特性，最近更有美國 Ohio State University 報導已成功地製出高透明度且具粉紅色外觀的染料敏化太陽電池，因此，此類太陽電池極適合於應用在建築工程中，與建材整合。特別是做為建築的窗材，適用於需要大量空調與照明電力負載的現代化玻璃帷幕大樓；同時也有利於作為遮陽阻熱之用及發電用途，以期達到建築物節能與產能的雙重能源效益。因此，染料敏化太陽電池極可能成為下一世代廣泛應用的太陽能運用的主要產品之一。

染料敏化太陽電池所涉及的技術包括製備高比表面積之多孔性奈米微粒電極、染料的合成、電解質的選用、對極層的製備、導線的設計、元件的封裝等。染料敏化型太陽電池元件的效率一般約為 9%，國際上目前最高紀錄的光電轉換率為 11%。染料敏化太陽能電池不僅可作在具剛性的導電透光玻璃上，目前發展亦朝向以低成本的成捲式(roll-to-roll)精密塗佈製程技術發展，以做成具可撓的軟性太陽電池。此類型的太陽電池具備輕、薄、可撓式、可攜式等諸多特性。所以，使之應用範圍更為廣泛，可應用到各種民生消費產品、娛樂、交通、通訊、運輸及居住等等不勝枚舉的用途上。例如：屋內用小型電池、兒童用玩具電池、與 3C 產品相結合、軍事上的可攜帶的電力系統。另外，也可以與建築物相結合做為窗戶或百葉窗以及汽車天窗等用途。剛性導電玻璃模板製程與封裝技術開發。

此新型太陽能電池的光電轉換效率雖已達 8~10%，但發電效率仍不夠高。此外，因電池元件中需要使用到液態電解質，使得染料敏化太陽能電池長期使用時，存在電解質洩漏、染料材料昂貴與取得不易等等問題，故大大地影響此能源裝置的製作成本和商品化的發展。目前雖已有市售產品，但價格不便宜。因此，如何解決這些問題為目前染料敏化太陽能電池之主要研究方向。

參考文獻：

1. 「超高效率太陽電池—從愛因斯坦的光電效應談起」,文/蔡進譯,物理雙月刊第 27 卷第四期(2005 年 10 月號版), 第 701 頁 G. P. Smestad, Solar Energy Mater. Solar Cells, 82, 227 (2004).
2. 網站 <http://www.e-tonsolar.com/edu.htm>

3. 維基百科網站：<http://zh.wikipedia.org/wiki/>，太陽能電池。
4. 太陽光電發電示範系統推廣計畫 <http://www.pvproject.com.tw/aboutus/> 網站
5. Michael Grätzel, Brian O'Regan. "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", Nature 353 (24): p737 - 740. (24 October 1991).
6. Greg P. Smestad and Michael Grätzel, "Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology: A Natural Dye-Sensitized Nanocrystalline Energy Converter", J. Chemical Education, 75(6), June 1998. Web site: JChemEd.chem.wisc.edu.
7. M. Grätzel, "Review: Dye-sensitized solar cells", J. Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 4 (2003) 145–153.
8. 美國威斯康新州立大學麥迪遜分校化學教育研究所(Institute for Chemical Education, University of Wisconsin-Madison, WI, US)網站 [http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanolab/TiO₂/](http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanolab/TiO2/)
9. 網站 <http://www.solideas.com/solrcell/cellkit.html>
10. 網站 <http://glass.cii.com.cn/gqinfo/show.asp?showid=67436>