

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 物理科

第一名

最佳創意獎

040109

自動發電發光二極體的光電性質探討

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 郭笛萱 高二 吳奕萱	指導老師： 陳正源 黃光照
-------------------------	---------------------

關鍵詞：LED(Light-emitting diode)、太陽能電池、  
光電轉換效率

## 得獎感言

### 那一年，我們一起探索的 LED

曾經，「物理」對我們而言是個只有「神人」才能探索的領域，但經過了近兩年的學習歷程，我們找到了「平凡人」也能享受的樂趣。

高二課程中最令人期待的，總是那自由自在的專題研究時間。一開始，我們對於實驗充滿了期待，即使英文期刊看不懂，實驗現象的物理原因找不到，也絲毫沒有消磨這個興致。但，題目最初進行得不太順利，有段時間甚至每幾個禮拜就慎重考慮要換個題目。幸好老師在這段時間總是以鼓勵的話，讓我們繼續堅持自己原本的想法；而教授更以 NABC 四字法則，幫助我們找到這個研究的價值，也提供了我們新的方向和建議，一些一開始看起來不可能實現的實驗與數據，竟都在這兩年中不知不覺中完成了。

如果沒有選修物理專題研究課程，我們不會接觸到那麼多有關 LED 的知識，不會知道原來 LED 可以當太陽能電池用，不會知道這個異想天開的構想真的可以作成 self-powered LED lamps，並且達成我們的實驗目的。從一開始在大太陽底下做實驗，總要看天吃飯，而且在至善樓的空中花園曬得半死，到後來利用一個鎢絲燈泡當光源，最後變成利用氬短弧光燈提供穩定的光源，讓我們可以在溫暖的物專小窩做實驗。經過一步步的改進，我們的實驗做得越來越好，不準量也越來越小。每當看到 Excel 上跳出漂亮的 I-V 曲線圖時，總會興奮地開懷大笑，每當經線性化的數據，如神一般地與擬合直線完全重疊，就感到一份滿滿的成就感。每當數據標上誤差槓，就感覺自己做的數據高級了許多！

在這兩年中，有太多人要感謝了。

謝謝物專小窩的好同學，專研時光總有奇妙的聲音陪伴：周仔詠瑄的卡啦 OK、欣韋雅嵐的動漫奇想、奕萱笛萱的互罵互嗆、安晴子晴的深長嘆息、綵珊兩分的咳嗽笑聲...

謝謝老師，總是默默地摸索大家的專題研究，並不時提供異想天開的想法和小故事，並正面地引導我們思考。謝謝教授，願意花那麼多時間和我們兩個討論問題，提供我們器材，給了我們好多好多寶貴的建議。

謝謝一路上曾經提供我們幫助、建議與批評的學長姐、設備組、老師、教授和評審，有了你們的幫助，我們才有前進的動力。

謝謝龜龜兔兔，每次做實驗時都充斥著我們互嗆互罵的聲音，一起思考、煩惱、焦慮、認真的時間真的好快樂。做科展，豐富了我們的高中生活，就好像為自己打開了另一扇門，帶著好奇心探頭進入了愛麗絲的世界，享受著解決問題後的喜悅，讓我們擁有了許多從來沒有的體驗。

最後，謝謝壯烈犧牲的 LED 們，沒有你們的犧牲，就沒有這份報告.....。

# Self-powered LED lamps 自動發電發光二極體 的光電性質探討

**摘要**  
LED為大面積電阻的SPN型半導體的接面所構成。本研究希望利用LED和太陽電池相似的結構，透過LED發光管，以能發電與發光功能，設計發光與發電的器件。探討LED發光管、LED陣列的電阻、LED陣列電阻輸入轉機電路等LED陣列所求的電阻增大，進而將此電阻增大，應用於生活中，達到節能的目的。

**研究動機**  
LED陣列的LED陣列的接面將能轉換成光能，亦可作為光電陣列。光電陣列的動機是將光能轉換成電能，即LED具有光能發電與發光轉換的雙功能。從此想法希望可設計出能發電與LED發光管，白天LED具有光能轉換成電能，晚上LED具有發光功能。此項研究可應用於再生能源，主要解決二極體的問題，將得到的電能與發光管接連起來的性質。

**研究設備及器材**  
5mm白光LED、10mm白光LED、電容器、電阻、數位功率表、萬能表、凸透鏡、紅綠筆等器材。

**研究目的及過程**

LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管

**研究結果與結論**

**一、LED發光特性**

(一) LED陣列向偏壓下的I-V曲線  
對於理想二極體，因為電阻隨電壓而增加，所以電阻在電壓上，受到電阻增加，會造成電阻增加而阻礙。但本研究的LED I-V curve在正向偏壓下，電阻隨電壓增加。

(二) LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管

**二、LED發光管與LED發光管**

(一) LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管

(二) LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管

(三) LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管  
LED發光管與LED發光管

**(三) LED陣列測量**

LED陣列測量  
LED陣列測量  
LED陣列測量

**二、LED太陽電池吸光管的特性**

(一) 固定光強度下LED的I-V曲線  
LED陣列測量  
LED陣列測量  
LED陣列測量

(二) 不同光強度與開路電壓與短路電流的關係  
LED陣列測量  
LED陣列測量  
LED陣列測量

(三) 不同光強度與最大功率及等效電阻的關係  
LED陣列測量  
LED陣列測量  
LED陣列測量

**三、探討LED太陽電池同時輸入電壓和光照對其電壓、電流的影響**

(一) 輸入偏壓與電壓、比較有、無光照時其IV曲線  
LED陣列測量  
LED陣列測量  
LED陣列測量

(二) 改變光強度時，LED電流的變換現象  
LED陣列測量  
LED陣列測量  
LED陣列測量

(三) 設計製作Self-powered LED lamp  
LED陣列測量  
LED陣列測量  
LED陣列測量

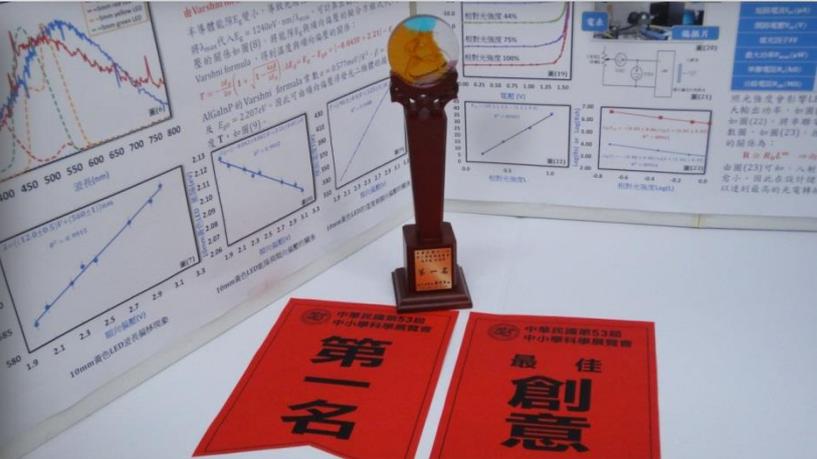
**研究結論與未來展望**

本研究探討了LED發光管與LED發光管，並利用LED發光管與LED發光管，增加LED太陽電池輸出電壓，進而達到自動發電與發光功能。再將自動發電與發光LED陣列，製作成自動發電與發光LED陣列。

在光照輸入偏壓的實驗中，當輸入電壓為1.7-2.5V的範圍，LED陣列在最大電壓與最大電流時，LED陣列的輸出電壓與LED陣列的輸出電流，LED陣列的輸出電壓與LED陣列的輸出電流，LED陣列的輸出電壓與LED陣列的輸出電流。

**參考資料**

參考資料  
參考資料  
參考資料



得獎了，好意外又好興奮！！

這兩張紅紙是對我們兩年來物專學習成果的鼓勵



2013年全國第53屆科展北一女中6位同學得了物理、化學、地科、應科等四個第一名！學校團體獎第一名

# 自動發電發光二極體的光電性質探討

## 摘要

本文藉由研究 LED 的光學性質：發光光譜、吸收光譜、吸收光的電流電壓曲線；並測量由 LED 吸收可見光時的內部等效電阻，藉以評估 LED 作為太陽能電池的實用性。研究結果顯示 LED 在太陽能電池等效電路模型中的相關參數(填充因子，串聯電阻，分路電阻)，均能有效地將光能轉換成電能。接著利用下列方法：①加裝 Fresnel 透鏡聚光、②設計 LED 陣列的電路、③設計電能輸出入的轉換電路等方法，製作出利用 LED 在白天將光能轉成電能，在晚上將電能轉換成光能，而不需要另外輸入電能的 self-powered LED lamp。

## 壹、研究動機

在高一基礎物理第 7 章能量<sup>1</sup>主題中提及，太陽能是地球上許多能量的來源；在高一基礎物理附錄的現代科技主題及高二基礎化學的第 2 章物質的構造<sup>2</sup>，也說明了半導體太陽能電池與 LED 的結構皆是 p 型和 n 型的半導體界面所構成。經查文獻<sup>5</sup>中得知，LED 被設計成將電能轉換成光能，但也可以作為光偵測器。光偵測器的功能即是將光能轉換成電能，稱為光伏效應(Photovoltaic effect)，這在高一基礎物理課本的第 8 章量子現象中有提到。換句話說 LED 具有光能與電能互相轉換的雙向功能。能源形式是當前台灣社會重大爭議的議題，學完高一基礎物理的：①再生能源太陽能、②半導體 LED、③光電效應等主題，引發我們想利用 LED 原本就具有啟動電壓小、低耗能的特色，若再將 LED 本身的光電效應作為太陽能電池，應該可以設計出自給自足的 LED 光源。即夜晚時，LED 燈將白晝時由光能轉換成的電能，再轉換為光能。如此一物二用的光源設備，將能達到節約能源與降低製造成本。在上述的動機下，我們從高一開始，藉著研究 LED 的光學性質：①發光光譜、吸收光譜、吸收光的電流電壓曲線；②並測量由 LED 吸收可見光時的內部等效電阻，藉以評估 LED 作為太陽能電池的實用性。接著利用下列方法：①利用 Fresnel 透鏡聚光、②設計 LED 陣列的電路、③設計電能輸出入的轉換電路等方法，期待能製作出在白天將光能轉成電能，在晚上將電能轉換成光能，而不需另外輸入電能的 self-powered LED lamp。

## 貳、研究目的與問題

一、測量與探討 LED 的電特性曲線：

- (一) 測量 LED 順向偏壓的 I-V 曲線與發光強度。
- (二) 從 LED 順向偏壓的 I-V 曲線，萃取 LED 等效電路中的串聯電阻  $R_s$  與理想因子  $n$ 。
- (三) 比較順向偏壓下的串聯電阻  $R_s$ 、理想因子  $n$ 、相對發光強度。

二、測量與探討 LED 作為太陽能電池的光學性質：

- (一) 測量 LED 發光光譜和吸收光光譜。
- (二) 測量 LED 半導體材料的能隙值  $E_g$ 。
- (三) 測量 LED 作為太陽能電池最大輸出功率  $P_{max}$ 。
- (四) 測量不同光強度下，LED 作為太陽能電池的 I-V curve，並計算串聯電阻  $R_s$  與分路電阻  $R_{sh}$ 。
- (五) 利用透鏡聚光對 LED 作為太陽能電池產生電壓、電流的影響。
- (六) LED 作為太陽能電池的串、並聯電路對其吸收光後產生電壓、電流的影響。

三、探討 LED 同時施予順向偏壓和照光，對其 I-V curve 的影響

- (一) 測量 LED 同時施予順向偏壓和照光的 I-V curve。
- (二) 測量與探討 LED 在照光與沒有照光下，其內部的等效電容值。

四、設計 LED 作為太陽能電池的儲電與發光驅動電路

- (一) 測量 LED 作為太陽能電池的串、並聯電路，對電容充電的電壓與時間關係曲線。
- (二) 設計與製作 self-powered LED 模組的儲電與發光驅動電路。

## 參、 研究設備及器材

### 一、 研究設備及器材

<p>5mm 紅、黃、綠三色 LED 與 10mm 黃色 LED (5mm 與 10mm 表示 LED 外封裝的圓柱形環氧樹脂的直徑)</p> 	<p>電阻、電容器</p> 	
<p>偏振片、凸透鏡</p> 	<p>紅橘黃濾光片</p> 	<p>光凳</p> 
<p>氙燈</p> 	<p>太陽光模擬器</p> 	<p>數位三用電表</p> 
<p>照度計</p> 	<p>可見光光譜儀</p> 	<p>分光儀</p> 

## 二、 實驗裝置

	實驗裝置	說明
第一代	(太陽光、麵包板) 	<b>說明：</b> 將 LED 整齊插在麵包板上，置於陽光下。 <b>優點：</b> 太陽光照度強，產生電流大；使用麵包板便於置換。 <b>缺點：</b> 太陽光不穩定，易受天氣狀況影響，在實驗過程中難維持同一光度，且無法隨時隨地進行。
第二代	(太陽光→燈泡) 	<b>說明：</b> 在第二代的基礎上，將入射光由太陽光改為白熾燈泡。 <b>優點：</b> 燈泡放出的光較穩定；可藉由暗室及光罩，隔絕非測試光源，且室內測試不受天氣影響。 <b>缺點：</b> 燈泡的照度不夠強，即使加入透鏡，LED 產生的電流仍微弱，因此易受電表精密度不夠高影響。
第三代	(燈泡→氙燈) (麵包板→焊接電路板) (架設於光凳上) 	<b>說明：</b> 將白熾燈泡更換為照度較強的氙燈，並將 LED 牢固地焊接在電路板上，並將所有器材架設於光凳上 <b>優點：</b> 將 LED 焊接在電路板，可確實控制入射光的角度，確保 LED 和光源垂直；氙燈光源穩定，且強度與太陽光較相近。透過光凳的架設，可更精細調整 LED 位置 <b>缺點：</b> 換成氙燈後，光度分布不均勻，難控制每顆 LED 接收到的光照度。

從第一代到第三代，實驗裝置的改進提高了 LED 太陽能電池測試的精準度，亦增加其後續的可利用性。

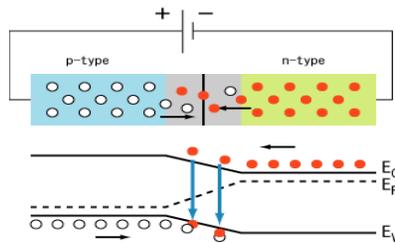
## 肆、研究原理

### 一、發光二極體 LED 的原理：

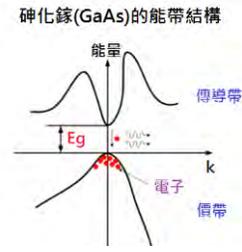
LED 發光二極體(light-emitting diode, LED)是由半導體晶片所組成，製程時會在半導體中添加 III-V 族元素，添加 III 族 (鋁 Al、鎵 Ga、銦 In)的為 p 型半導體，添加 V 族(氮 N、磷 P、砷 As)的為 n 型半導體，當 p 型和 n 型半導體接合後，就會形成 P-N 接面二極體，如圖一。半導體的能帶結構可分為直接能隙與間接能隙。如圖二所示，半導體中自由電子電洞對復合時，直接能隙材料會較容易產生光子，而間接能隙材料則較不容易。所以 LED 均由直接能隙半導體材料所製成。當在 LED 正負兩極加上順向偏壓後，電流會從陽極流到負極，在半導體內產生電子電洞對，電子電洞在空乏區復合後，電子躍遷至較低的能階，並以光子的形式釋放能量：

$$E_{\text{光子}} = hf = \frac{12400\text{eV}\cdot\text{\AA}}{\lambda} ; \text{其中 } h = 6.626 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s} ; f \text{ 為頻率} ; \lambda \text{ 為波長。}$$

依照晶片材料所添加的元素不同，成分比例不同，二極體內中電子、電洞所佔的能階也有所不同，能階高低會影響結合後的光子能量，使得 LED 發出不同波長 $\lambda$ 的光。



圖一 p 型 n 型半導體電子電洞復合示意圖



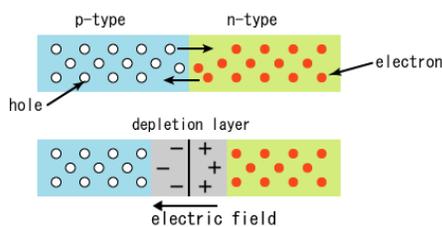
圖二 直接能隙電子躍遷發出光子示意圖

理想二極體的電壓-電流方程式為  $I = I_D \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right)$  <sup>10</sup> ; V 為順向偏壓、q 為電子的電量、k 是波茲曼常數、T 是絕對溫度、 $I_D$  為擴散飽和電流(diffused Saturation Current)、n 為理想因子(ideal factor)。

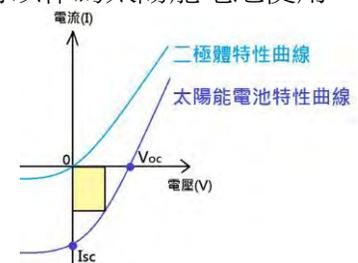
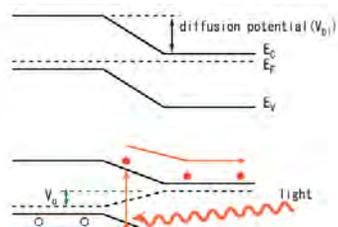
### 二、太陽能電池原理：

太陽能電池是利用**光伏效應**產生電能。當光子進入二極體的 P-N 接面，會激發出自由電子電洞對，並受到 P-N 接面的內建電場作用而分離。自由電洞被 P 型半導體空乏區的負空間電荷所吸引，而自由電子被 N 型半導體空乏區的正空間電荷所吸引，因此在迴路上形成光電流  $I_{ph}$ ，如圖三所示。太陽能電池的電流方程式為<sup>10</sup>： $I = I_D \left( e^{\frac{qV}{nkBT}} - 1 \right) - I_{ph}$ ，如圖四所示。

本研究即希望利用 LED 的 P-N 接面產生光伏效應，使 LED 可以作為太陽能電池使用。



圖三 電子電洞分離產生光電流示意圖



圖四 太陽能電池的特性曲線

### 三、發光二極體 LED 和太陽能電池的差異

在一般的材料中，電子的物質波長遠小於塊材的尺寸，所以量子侷限效應並不明顯，電子可在三維空間中自由移動，但是當材料的某維度縮小到比電子的物質波長還要小時，這時電子就被限制在另外兩個維度所構成的二維平面空間中了。此限制電子移動的系統就被稱為量子井(quantum well)。在 LED 中，為了使電子和電洞的復合機率增加，以提高發光效率，於是大多採用多層異質界面，形成量子井。施加順向偏壓後，使傳導帶上的自由電子和價電帶的自由電洞復合機率提高。對於本研究，我們希望被光子激發的自由電子和電洞能盡量往二極體兩端流出，形成光電流，但是量子井卻造成電子和電洞不易從兩端流出，導致 LED 發電的效率不及太陽能電池高，這也是本研究發展的先天限制之一。

### 四、專有名詞介紹

#### (一) 開路電壓(open-circuit voltage, $V_{oc}$ ) :

在特定溫度及照射光下，斷路狀態時，負載為無限大，太陽能電池的輸出電壓，如圖五。

#### (二) 短路電流(short-circuit current, $I_{sc}$ ) :

在特定溫度及照射光下，短路狀態時，負載為零，太陽能電池的輸出電流，如圖五。

#### (三) 最大輸出功率( $P_{max}$ )

太陽能電池所能輸出的最大功率，即 I-V 乘積的最大值。太陽能電池的電流方程式為<sup>10</sup>

$$I = I_D \left( e^{\frac{qV}{nk_B T}} - 1 \right) - I_{ph}$$

其中  $I_D$  為擴散飽和電流， $n$  為理想因子。

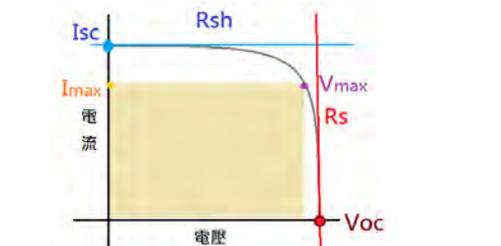
依據所畫出的太陽能電池 I-V 曲線，如圖四。第四象限所圍成的最大面積即為最大輸出功率。一般為了方便繪圖，會將逆電流取絕對值，畫在第一象限上，如圖五。

#### (四) 填充因子(fill factor, FF)

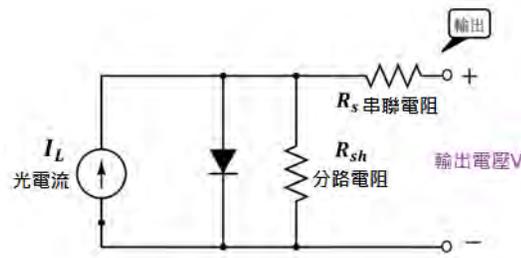
$FF = P_m / (I_{sc} \times V_{oc})$  為評估太陽能電池品質的重要參數，一般太陽能電池約為 0.7~0.8

#### (五) 等效電路：串聯電阻 $R_s$ 、分路電阻 $R_{sh}$

如圖六，在二極體的等效電路中，因為半導體材料本身，或是半導體與金屬之間的接觸，造成串聯電阻的產生。太陽能電池的正負電極間，存在非經由理想 P-N 接面的電流通路，造成漏電流，形成分路電阻。由公式  $I_{leak} = V/R_{sh}$  可知：分路電阻越大，漏電流越小。串聯電阻會使得短路電流變小，分路電阻不夠大會降低開路電壓，這兩個因素是使太陽能電池轉換效率下降的原因。如圖五所示，可以透過太陽能電池的 I-V 曲線圖的斜率來計算  $R_s$  和  $R_{sh}$  的值



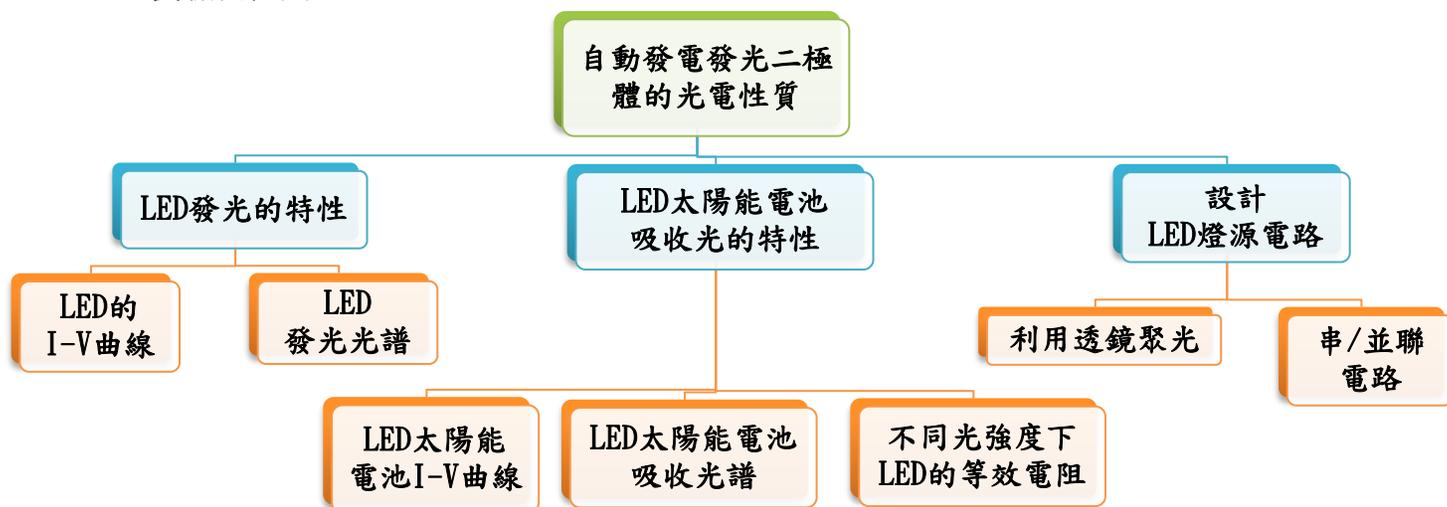
圖五 太陽能電池吸收光時的電流電壓曲線



圖六 太陽能電池等效電路圖

## 伍、 研究過程及方法

### 一、 實驗流程圖



### 二、 實驗方法

藉由以下的實驗，探討 LED 的光學性質：

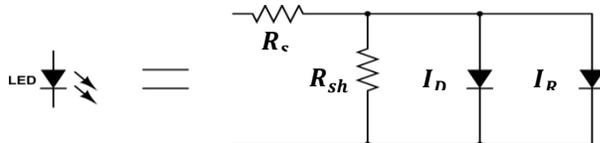
#### (一) LED 的電特性曲線

1. 測量不同顏色 LED 順向偏壓的電流電壓(I-V)曲線與發光強度。
2. 利用電流電壓(I-V)曲線萃取 LED 非理想二極體電流方程式中的串聯電阻 $R_s$ 與理想因子 $n$ 。

$$I = I_D \times e^{\frac{q(V-IR_s)}{kT}} + I_R \times e^{\frac{q(V-IR_s)}{2kT}} + \frac{(V - IR_s)}{R_{sh}}$$

上述方程式中的：

$I$  為電流、 $V$  為順向偏壓、 $I_D$  為理想二極體的擴散飽和電流、 $I_R$  為非理想二極體複合產生的飽和電流、 $R_s$  為串聯電阻、 $R_{sh}$  為分流電阻、 $k$  為波茲曼常數、 $T$  為絕對溫度。



圖七 LED 等效電路圖

#### (二) LED 的發光光譜、吸收光譜與能隙值

1. 測量太陽光和氙燈的光譜。
2. 利用光譜儀及自由軟體 **Tracker** 繪製太陽光和氙燈光源的光譜。
3. 不同顏色 LED 的發光頻譜和吸收光的波段、吸收效率

利用電源供應器提供固定電壓給 LED，利用光譜儀及電腦軟體繪製出不同顏色的 LED 發光光譜。利用太陽光模擬器模擬太陽光，經過分光儀，分成不同顏色的光，再用六位半數位電表與電腦軟體繪出 LED 在不同波段下的吸收光譜，藉以找到不同顏色 LED 在不同波段下的吸收效率，及具有最佳吸收效率的波段。

#### 4. LED 晶粒的光電半導體能隙測量

當入射光子的能量大於半導體的能隙，便會對 LED 產生的光電流有所貢獻。光電流  $I_{ph}$  為

$$I_{ph} \propto \int_{\lambda_c}^{\lambda_0} N(\lambda) d\lambda$$

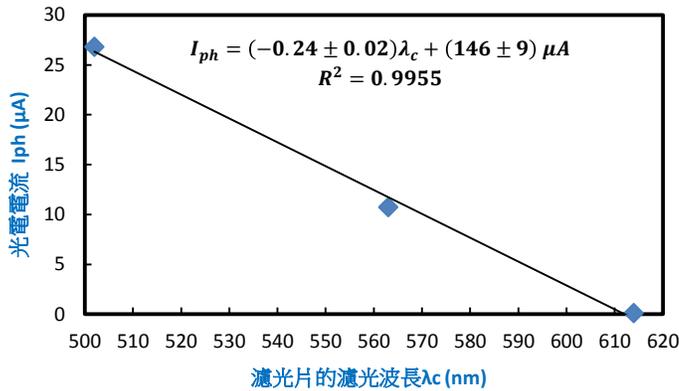
上式中： $N(\lambda)$  為波長  $\lambda$  的入射光子數量、 $\lambda_0$  稱為底限波長，是產生光電流的最大波長， $\lambda_0$  與半導體的能隙有關、 $\lambda_c$  為濾光片的截止波長。光電流  $I_{ph}$  的量值正比於波長介於  $\lambda_0$  到  $\lambda_c$  的入射光子數。如圖九所示，當濾光片可以濾除波長低於  $\lambda_c$  的光，在可見光範圍內， $N(\lambda)$  近似為常數，所以加上濾鏡後，LED 經照光後所產生的光電流為

$$I_{ph} \propto (\lambda_0 - \lambda_c)$$

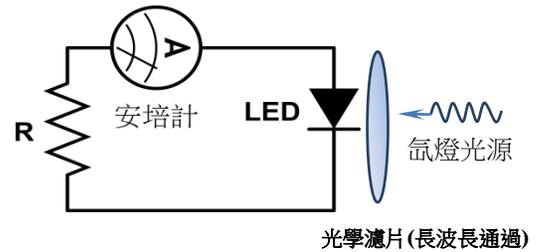
因此利用紅色(波長 614nm)、橘色(波長 563nm)、黃色(波長 502nm)三濾片濾光，分別測量經氙燈照射的 LED 所輸出的光電流  $I_{ph}$ ，再將此三電流值  $I_{ph}$  與所使用的濾光片波長作圖，找出電流為零時的波長值，此即為底限波長  $\lambda_0$ 。最後將  $\lambda_0$  代入光子能量公式

$$E_g = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda_0(\text{波長})}$$

即可算出 LED 半導體材料的能隙值  $E_g$ 。以 5mm 黃色 LED 為例：由圖八中的橫軸截距可算出底線波長  $\lambda_0 = (612 \pm 56)\text{nm}$ ，代入公式即可求出能隙  $(2.03 \pm 0.18)\text{eV}$ 。查詢文獻<sup>3</sup>，比較推測，本實驗所使用的 5mm 黃色 LED 半導體材料可能為  $(\text{AlGa})_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ 。



圖八 LED 的電流與濾光片的波長作圖，以求出底限波長  $\lambda_0 = 610\text{nm}$

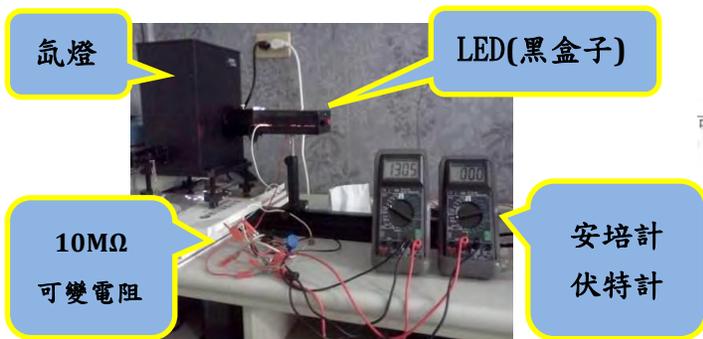


圖九 LED 能隙測量的實驗電路圖

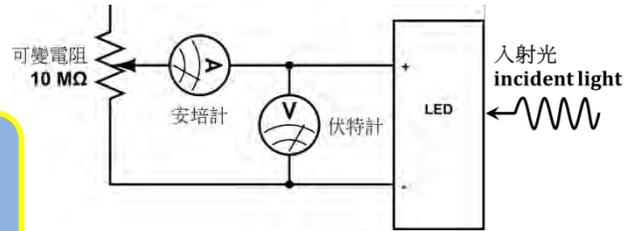
#### (三) 測量 LED 作為太陽能電池最大輸出功率與內電阻值

最大輸出效率和內電阻值是兩個判斷 LED 太陽能電池品質好壞的重要參數，由最大輸出效率可得知其轉換光能為電能的效率，而由串聯電阻  $R_s$  和分路電阻  $R_{sh}$ ，則可判斷 LED 太陽能電池等效電路中漏電流的大小。

在氙燈的照射下，控制可變電阻，調節線路的電壓，測量在不同電壓下，LED 所產生的電流值。可測量 LED 接收光源後的 I-V 曲線圖，並算出 I-V 圖下的最大面積，進而計算 LED 最大輸出功率。另外可由 I-V 曲線圖閉路端的斜率計算得 LED 內部的分路電阻  $R_{sh}$ ；開路端的斜率可計算得串聯電阻  $R_s$ 。由於 LED 太陽能電池對室內的光會有反應，故在其周圍加上黑色盒子，避免遭受外界非變因的光源干擾。如圖十與圖十一所示。



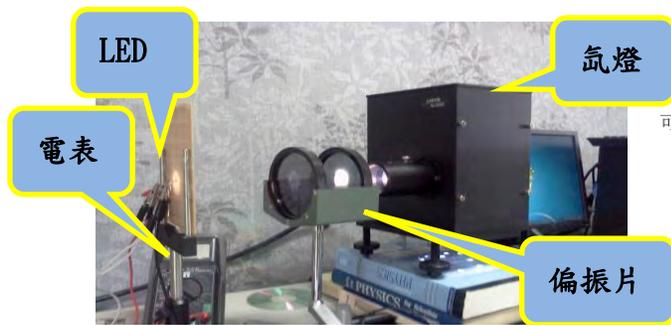
圖十 LED 吸收可見光的 IV 曲線實驗裝置圖



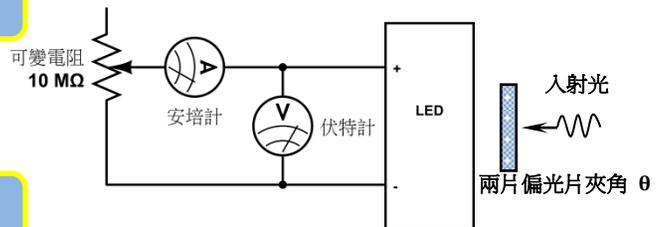
圖十一 LED 吸收可見光的 IV 曲線實驗電路圖

#### (四) 不同光強度對於 LED 太陽能電池產生電流電壓曲線(I-V curve)的影響

1. 測量在不同照度下，LED 的 I-V 圖的變化，進而得知不同光照強度下，LED 內部等效電路的變化，以設計符合阻抗匹配的外部儲放電電路。
2. 利用兩線偏振片旋轉  $\theta$  角後，光強度會與  $\cos^2 \theta$  成正比，藉此可改變光源強度，並測量 LED 的 I-V 圖。實驗過程中，每次旋轉偏振片  $10^\circ$ ，記錄電壓、電流變化。

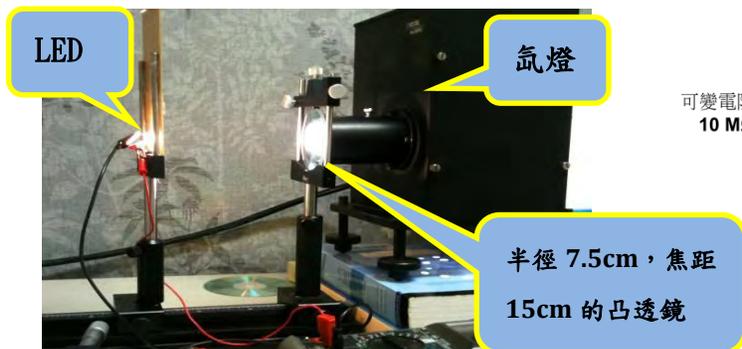


圖十二 以偏振片改變光強度測量 I-V curve 實驗裝置圖

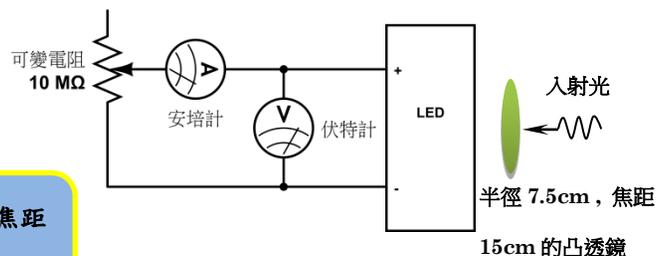


#### (五) 利用透鏡聚光對 LED 太陽能電池產生電流、電壓的影響

利用半徑 7.5cm，焦距 15cm 的凸透鏡聚光，可提高 LED 太陽能電池晶體單位面積接收到的能量強度，因此產生較大的光電流。將透鏡固定於鏡架和光凳上，再置於氬燈和光凳上的 LED 之間，探討聚光後 LED 所產生的電壓、電流和未聚光時的差異，期望提升通過 LED 的光電流。



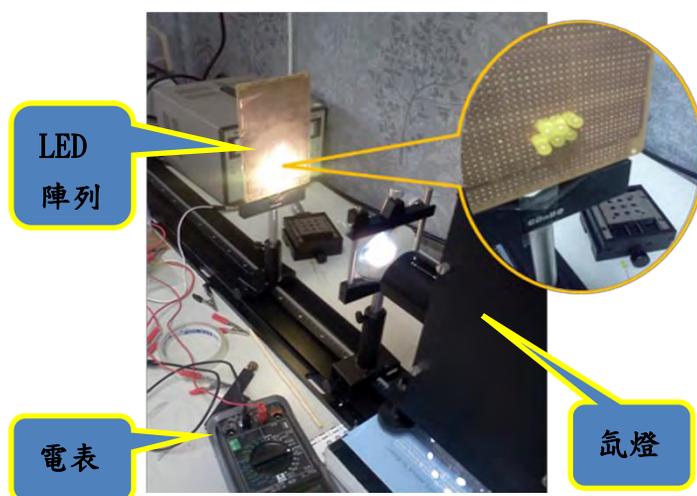
圖十三 透鏡聚光實驗裝置圖



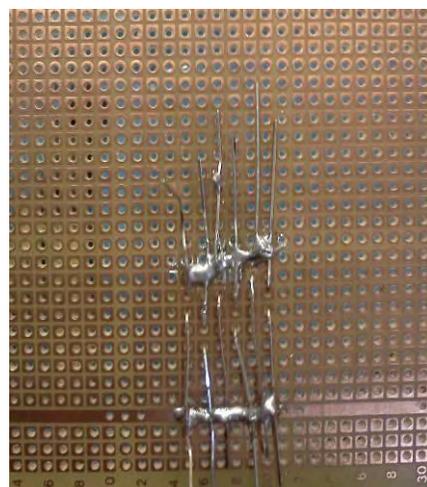
## (六) 不同 LED 太陽能電池陣列排列方式對接收光能後產生電壓、電流的影響

### 1. LED 串聯個數與接收光能後產生電壓、電流的關係

藉由串聯，提高 LED 太陽能電池系統的電壓，以達對電池充電或激發 LED 的啟動電壓。將 LED 以焊接的方式串聯放在光源下照射，測量在串聯顆數不同下，顆數和電壓、電流的關係。



圖十四 LED 串聯 實驗裝置圖



圖十五 LED 焊接背面圖

### 2. LED 並聯個數與接收光能後產生電壓、電流的關係

藉由並聯，提高 LED 太陽能電池系統的光電流，並與串聯的結果結合運用，達到產生最大電流與電壓的效果。用錫槍將 LED 一一固定且並聯於電路板上，確保光源垂直入射 LED 的晶片，測量在並聯顆數不同下，顆數和所通過電壓、電流的關係

## (七) 探討 LED 太陽能電池同時輸入電壓和照光對其產生電壓、電流的影響

此實驗欲探討對 LED 同時輸入順向偏壓和照光與無照光時的電流差異。實驗分為兩個部分探討，一是照射固定強度的光源，改變電源供應器的電壓；一是輸入固定的電壓，改變照光強度，觀察照光是否會對 I-V 曲線有影響。

1. 照射固定光源，改變輸入電壓，比較有無照光時其 I-V 曲線差異。
2. 輸入固定電壓，探討改變光照強度後，電流和時間的變化關係。

## (八) 探討電力儲存系統的設計對電力運用的影響

在實際製作 LED 太陽能電池模組前，我們想先了解 LED 太陽能電池對儲電系統充電的電壓和時間關係，所以選用具備充電時間快速，所需電壓小等條件的儲電系統—電容，來進行實驗。

### 1. 使用電容作為儲存系統

#### (1) LED 太陽能電池串聯顆數與電壓、電流、充電時間

分別串聯一到四顆黃色 LED，對一個電容器( $C=220\mu\text{F}, 2.5\text{V}, -40^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{C}$ )充電，以 10 秒為單位，紀錄電容的上升電壓、電流和時間的關係。

#### (2) LED 太陽能電池並聯顆數與電壓、電流、充電時間

分別並聯一到四顆黃色 LED 對一個  $220\mu\text{F}$  電容器充電，以 10 秒為單位，紀錄電容的上升電壓、電流和時間的關係。

### 2. 設計與製作 LED 儲放電系統

本實驗欲設計出一個 LED 模組，可以在照光時，將 LED 所產生的電能儲存到儲電系統中，再利用此電能讓本身 LED 發光，形成一個一物兩用的燈具。

首先，由前面的實驗「測量 LED 的電特性曲線」我們測得 10mm 黃色 LED 的啟動電壓為四種 LED 中最低—1.6V，將有助於放電時，啟動最多顆 LED。由實驗「測量 LED 吸收光譜」得知其吸收光譜與太陽光光譜重疊性最高，所以電能的轉換效率最好。由實驗「LED 太陽能電池最大輸出功率」的實驗結果中顯示，10mm 黃色 LED 在開路電壓 $V_{oc}$ 、短路電流 $I_{sc}$ 、最大輸出功率 $P_m$ 、填充因子 FF，其值皆為四種 LED 中最高的，所以選用 10mm 黃色 LED 為 LED 燈具的元件將有助於 LED 電能的產生。

利用電容測量完電壓和時間的關係後，我們選用 5V 的行動電源作為儲電系統，因為其具有充電容量大、充放電穩定、充電後將電能穩定儲存等優點。

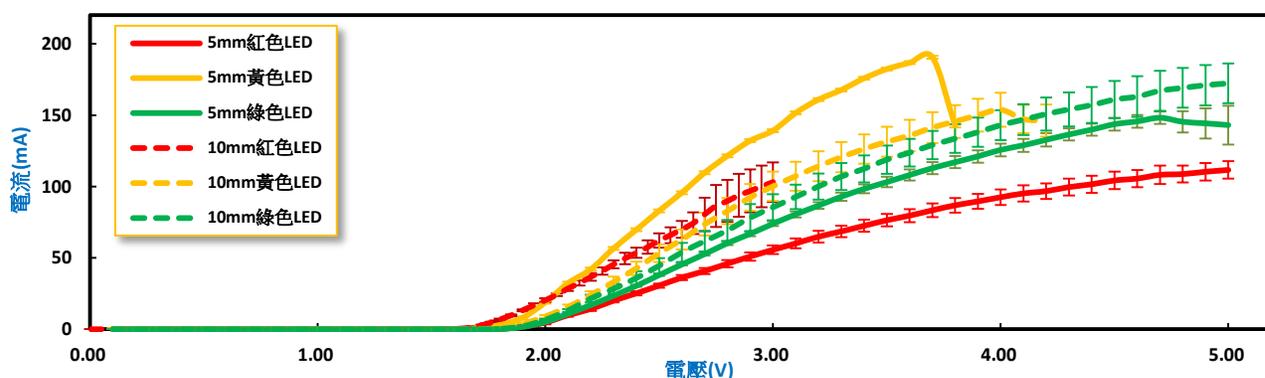
LED 燈具採用兩顆、兩顆串聯的 LED 是因為根據 LED 發光曲線，電流會隨著電壓上升而趨向飽和且不穩定，而且電壓在 2.5~3V 時發光亮度最高，所以使用 5V 的行動電源對 LED 充電，一顆 LED 可分配到約 2.5V，能夠最有效的使用電能。最後，由前面的實驗「LED 串並聯」的結果顯示，串聯將有助於電壓提升，並聯則可以增強電流，因為儲電系統為 5V 的行動電源，所以將每四顆 LED 串聯，可達到約 7V 以對行動電源充電，再將 16 組串聯好的 LED 並聯起來，以增加電流。

單顆 10mm 黃色 LED 在聚光的情形下可達到 0.3mA，16 組 LED 則可達到約 5mA，形成一個由 64 顆 LED 所組成的陣列，根據實驗還可得知透鏡將有效使 LED 產生的電能增大，所以在 LED 燈具上加了一片 Fresnel 透鏡，製作出一個 LED 型的太陽能電池模組。

## 陸、 研究結果與討論

### 一、 LED 的電特特性曲線

不同顏色 LED 在輸入順向偏壓下 I-V 曲線。提供相同電壓時，黃色 LED 所通過的電流最大。四種 LED 的啟動電壓分別為：5mm 紅色-1.7 V，5mm 黃色-1.7 V，5mm 綠色-1.8 V，10mm 黃色-1.6 V。



圖十六 四種不同 LED 電流電壓曲線圖

#### (一) 理想二極體與非理想二極體 I-V 曲線的差異：

理想二極體的電流會隨著順向偏壓的升高而成指數上升，此與金屬材料不同。金屬材料隨著溫度上升電阻亦升高，因此抑制了電流的升高的趨勢。可是二極體中，半導體材料的電阻，隨著順向偏壓的升高而降低，因此使電流上升的更多，最後電流值成指數上升，當順向偏壓超過某值，二極體會因為溫度過高而燒毀。

本研究的 LED I-V curve 在高順向偏壓時會呈飽和現象，此數據在校內科展、地區科展時評審教授與老師 皆問到是否實驗操作錯誤，教授與老師均認為電流應呈指數上升，不應有飽和現象。為了確認評審的意見，我們重作了多次的 LED I-V curve 實驗，結果與先前相同，仍有飽和現象；而且我們搜尋了一些研究 LED I-V curve 的論文<sup>6</sup>，結果文獻中的 LED I-V curve 均有與本研究相同的電流飽和現象。為了更進一步的了解此現象，我們進行以下的數據分析。

#### (二) 利用電流電壓(I-V)曲線，萃取 LED 電流方程式中的串聯電阻 $R_s$ 與理想因子 $n$ ： 由實驗數據推論，LED 應為非理想二極體，因此藉由非理想二極體電流方程式

$$I = I_D e^{\frac{q(V-IR_s)}{nkT}} = I_D e^{\frac{\beta(V-IR_s)}{n}}$$

其中  $\beta \equiv q/kT$ 。為了萃取 LED 的串聯電阻  $R_s$  與理想因子  $n$ ，上述方程式可線性化為

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI_D}{dV} \times e^{\frac{\beta(V-IR_s)}{n}} + I_D \times \left[ \frac{d}{dV} e^{\frac{\beta(V-IR_s)}{n}} \right] = 0 + I_D e^{\frac{\beta(V-IR_s)}{n}} \times \frac{\beta(1-R_s \times \frac{dI}{dV})}{n} = I \times \frac{\beta}{n} \left( 1 - R_s \times \frac{dI}{dV} \right)$$

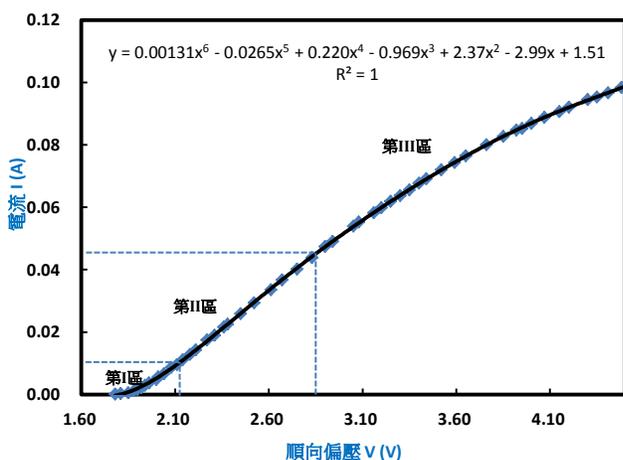
$$\Rightarrow \left( 1 + I \frac{\beta}{n} R_s \right) \frac{dI}{dV} = I \times \frac{\beta}{n} \Rightarrow \boxed{\left[ I \times \frac{dV}{dI} \right] = R_s \times [I] + \frac{nkT}{q}}$$

若將數據  $I \frac{dV}{dI}$  對  $I$  作圖，則圖表中的斜率為串聯電阻  $R_s$ ，圖表中的截距為  $nkT/q$  可以求出理想因子  $n$ 。以上線性化的過程，假設串聯電阻  $R_s$ 、理想因子  $n$ 、飽和電流  $I_s$  與順向偏壓無關。從文獻<sup>7</sup>得知在某順向偏壓範圍上述三項物理參數會與順向偏壓有關，但在電流初升階段可將三者視為與順向偏壓無關。接下來，將以 5mm red LED 說明萃取串聯電阻  $R_s$ 、理想因子  $n$  的過程。

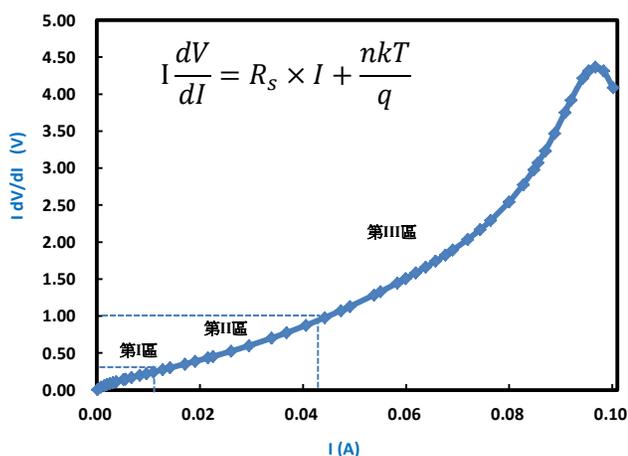
首先利用軟體 EXCEL 擬合 I-V 曲線得擬合方程式如下

$$I(V) = 0.00131 \times V^6 - 0.0264 \times V^5 + 0.220V^4 - 0.969 \times V^3 + 2.37 \times V^2 - 2.99 \times V + 1.51$$

將數據  $I \frac{dV}{dI}$  對  $I$  作圖如下

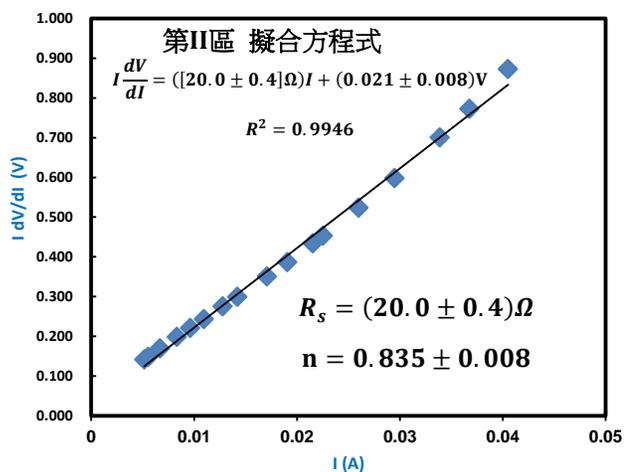
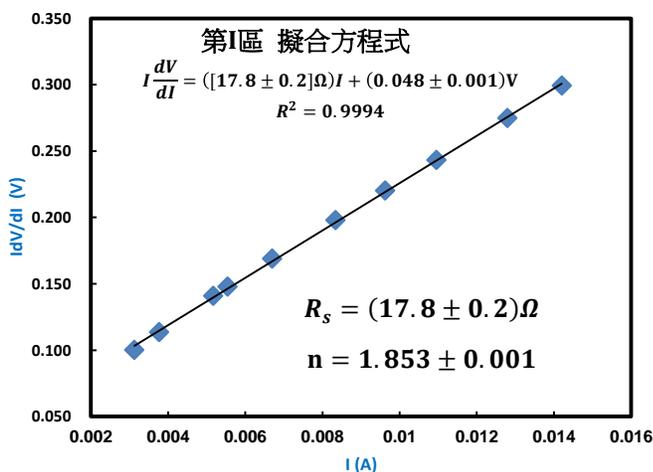


圖十七 5mm red LED 電流電壓擬合曲線圖



圖十八 5mm red LED I-V 曲線線性化方程式

由作圖得知 I-V 曲線線性化方程式並不是完全是直線，因此將其分為三區：電壓  $V = 1.78V \sim 2.1V$  稱為第 I 區，電壓  $V = 2.1V \sim 2.8V$  稱為第 II 區，以上兩區為線性區，可藉由線性擬合方程式的斜率與截距，計算串聯電阻  $R_s$ 、理想因子  $n$ 。



圖十九 5mm red LED 線性化方程式  $I \frac{dV}{dI} = R_s I + \frac{nkT}{q}$  的分段擬合圖

第 I 區：線性擬合方程式為  $I \frac{dV}{dI} = ([17.8 \pm 0.2]\Omega)I + (0.048 \pm 0.001)V$ ，因此

串聯電阻  $R_s = \text{斜率} = (17.8 \pm 0.2)\Omega$ ；

$$\text{理想因子 } n = \text{截距} \times \frac{q}{kT} = (0.048 \pm 0.001)V \times \frac{1.6 \times 10^{-19}C}{(1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}) \times (300K)} = 1.85 \pm 0.04$$

第 II 區：線性擬合方程式為  $I \frac{dV}{dI} = ([20.0 \pm 0.4]\Omega)I + (0.021 \pm 0.008)V$ ，因此  
串聯電阻  $R_s = \text{斜率} = (20.0 \pm 0.4)\Omega$ ；

$$\text{理想因子 } n = \text{截距} \times \frac{q}{kT} = (0.021 \pm 0.008)V \times \frac{1.6 \times 10^{-19}C}{(1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}) \times (300K)} = 0.8 \pm 0.3$$

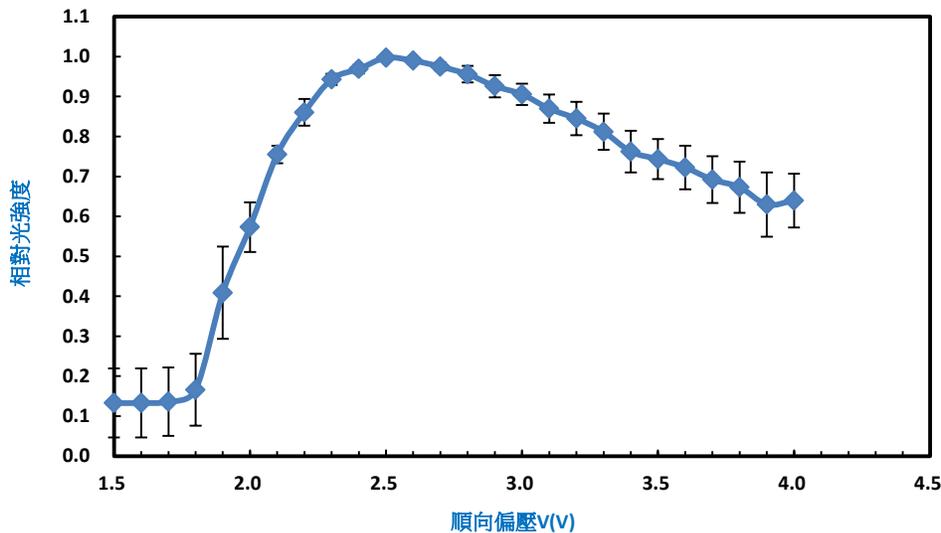
由以上的計算得知，在第 I 區的理想因子接近 2，因此電流的值，主要由自由電子電洞的複合產生(recombination-generation)效應所主導。所以可將電流方程式寫為

$$I \cong I_R \times e^{\frac{q(V-IR_s)}{2kT}}$$

在第 II 區的理想因子接近 1，因此電流的值，主要由自由電子電洞的擴散(diffusion)效應所主導。所以可將電流方程式寫為

$$I \cong I_D \times e^{\frac{q(V-IR_s)}{kT}}$$

LED 在發光時，電子電洞對會不斷的的複合(recombination)與產生(generation)，因此藉由測量 LED 相對發光強度與順向偏壓的關係圖，如圖二十。可得知複合(recombination)與產生(generation)效應發生於順向偏壓的範圍約為  $V = 2V \sim 2.6V$ 。



圖二十 5mm red LED 相對發光強度與順向偏壓的關係

### (三) 比較順向偏壓下的串聯電阻 $R_s$ 、理想因子 $n$ 、相對發光強度：

為了要了解 LED I-V 曲線為什麼在高順向偏壓時電流回呈現飽和現象(第 III 區)，我們從文獻 6 得知在高順向偏壓時，串聯電阻  $R_s$  對電流值的影響可能會加劇。因此若將 I-V 曲線的線性化方程式  $[I \times \frac{dV}{dI}] = R_s \times [I] + \frac{nkT}{q}$  對電流微分則可得到串聯電阻  $R_s$ 。因此首先：

右側對電流 I 微分：假設順向偏壓幾乎對串聯電阻  $R_s$ 、理想因子  $n$  沒有影響，因此

$$\frac{d}{dI} \left[ R_s \times I + \frac{nkT}{q} \right] \cong R_s$$

左側對電流 I 微分：

$$\frac{d}{dI} \left[ I \times \frac{dV}{dI} \right] = \frac{dV}{dI} + I \times \frac{d}{dI} \frac{dV}{dI} = \frac{dV}{dI} + I \times \left[ \frac{d}{dV} \left( \frac{1}{\frac{dI}{dV}} \right) \right] \times \frac{1}{\frac{dV}{dI}}$$

(附註： $\frac{d^2V}{dI^2} = \frac{d}{dI} \frac{dV}{dI} = \frac{d(\frac{dV}{dI})}{dI} = \frac{d(\frac{dV}{dI})}{dV} \times \frac{dV}{dI} = \left[ \frac{d}{dV} \left( \frac{1}{\frac{dI}{dV}} \right) \right] \times \frac{1}{\frac{dV}{dI}}$ )

所以，串聯電阻  $R_s$ ，可藉由 I-V 曲線多項式擬合方程式計算得到

$$R_s = \frac{dV}{dI} + I \left[ \frac{d}{dV} \left( \frac{1}{\frac{dI}{dV}} \right) \right] \times \frac{1}{\frac{dV}{dI}} = \frac{1}{\frac{dI}{dV}} + I \left[ \frac{d}{dV} \left( \frac{1}{\frac{dI}{dV}} \right) \right] \times \frac{1}{\frac{dV}{dI}}$$

接著再將串聯電阻  $R_s$  對順向偏壓 V 作圖而得圖二十一，由  $R_s - V$  圖可知在順向偏壓  $V > 3.5V$ ，串聯電阻  $R_s$  的值迅速升高，因此抑制了理想二極體隨順向偏壓升高而電流成指數上升的趨勢。所以本研究中，LED 的 I-V curve 在高順向偏壓時的電流飽和現象，應該具有重複性與相關的物理意義，但我們仍不清楚其中的物理機制。

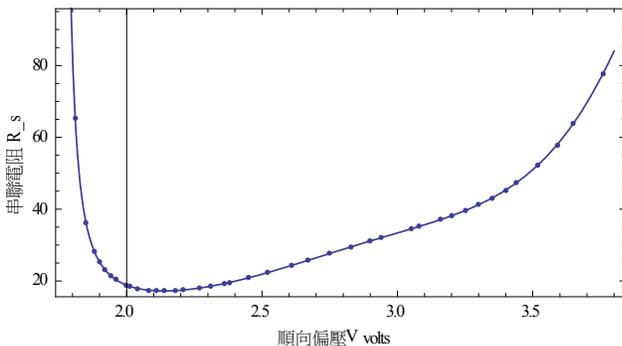
因此在 LED 的電流方程式中，指數部分的電壓應考慮串聯電阻  $R_s$ ，尤其在高順向偏壓時，如下式：

$$I = I_D \times e^{\frac{q(V-IR_s)}{kT}} + I_R \times e^{\frac{q(V-IR_s)}{2kT}} + \frac{(V - IR_s)}{R_{sh}}$$

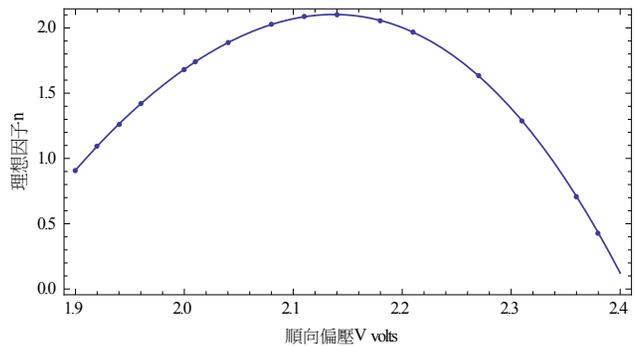
若再將串聯電阻  $R_s$  代回 I-V 曲線的線性化方程式

$$\left[ I \times \frac{dV}{dI} \right] = R_s \times I + \frac{nkT}{q}$$

則可得到理想因子 n 與順向偏壓 V 關係，接著作圖如圖二十二。從 n - V 圖可觀察到，在順向偏壓  $V = 2V \sim 2.3V$  時，理想因子 n 約為 2。與發光強度對順向偏壓作圖比較，發光強度最強時，約在順向偏壓  $V = 2V \sim 2.3V$ 。換句話說，在此順向偏壓範圍，自由電子電洞對複合(recombination)與產生(generation)效應，佔電流值的比例較大。



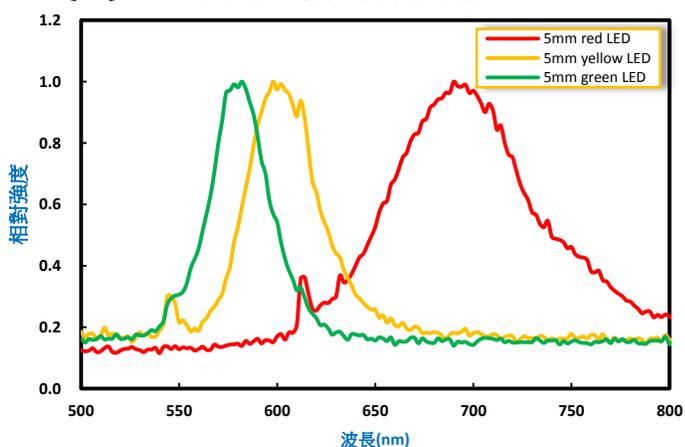
圖二十一 5mm red LED 串聯電阻與順向偏壓的關係圖



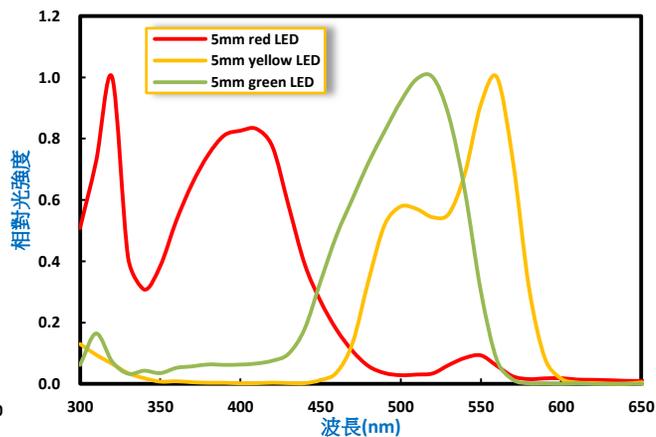
圖二十二 5mm red LED 理想因子與順向偏壓的關係圖

## 二、LED 作為太陽能電池的光學性質測量：

### (一) LED 發光頻譜和吸收光譜

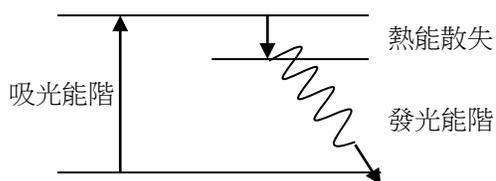


圖二十三 5mm 三色 LED 發光光譜



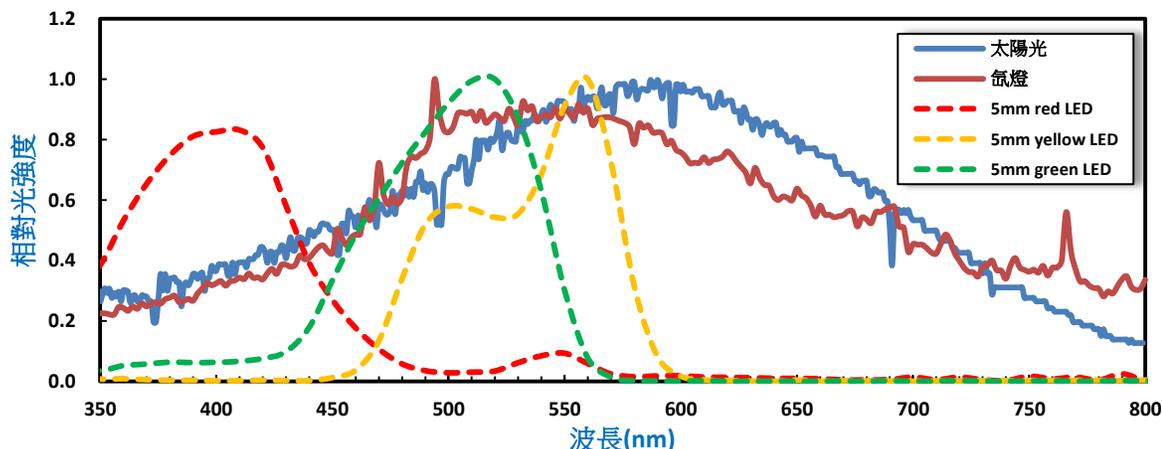
圖二十四 5mm 三色 LED 吸收光譜

1. 紅、黃、綠三種顏色 LED 的光吸收波段皆低於其發光波段，推測是因為發光所產生的能量有一部份以熱能的形式散失，僅有一部分的能階可使 LED 產生光子，而吸光則較無此熱能散失的情形，所以吸光的能階較高，需吸收能量較高、波長較短的光子，才能使 LED 產生光電流(如圖十七)。至於紅色 LED 的吸收波段(300~400nm)與其發光波段(約 700nm)相差較黃、綠色大，則可能是因為各種 LED 的內部材質和結構的不同，造成各種 LED 的兩波段間差值也不同。



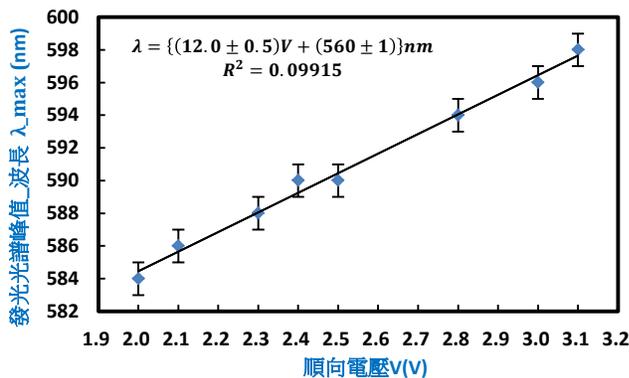
圖二十五 紅色 LED 能階示意圖

2. 由太陽光能量光譜，知道太陽光發光頻譜的峰值 580nm 與黃色 LED 吸收波段的重疊性最高，且黃色 LED 的吸收效率為三者中最高，符合實際測量結果。

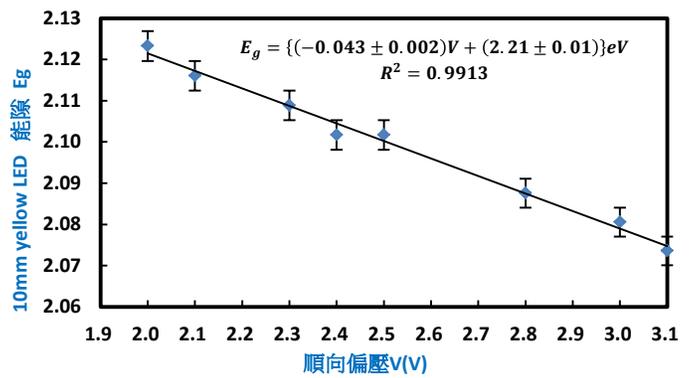


圖二十六 太陽光和氙燈光譜

3. 本實驗使用氫燈光源，由氫燈光譜可知其光強度峰值波長約 550nm，與綠色 LED 的吸收波段重疊最高。由實驗三結果可知綠色 LED 的填充因子(Fill Factor)為四種 LED 中最高，所以推測 LED 的光電轉換效率和光源光譜是否對應 LED 吸收波段有很大的關係。
4. 在測量發光光譜時，發現給予 LED 不同電壓時，電壓愈大，LED 的發光波長愈長，顏色愈偏橘紅色。以 10mm 的黃色 LED 為例：其電壓從 2.0V 加到 3.1V，發光光譜強度峰值對應的波長  $\lambda_{max}$  會從 584nm 增加到 598nm，有紅移的現象。隨著電壓增加，輸入的功率也會增加，造成溫度的上升。由 Varshni formula ( $E_g = E_{g0}(T = 0K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$ ，其中  $\alpha$  與  $\beta$  為與半導體材料有關的常數)可知，溫度 T 上升時，半導體的能隙  $E_g$  變小，因此當電子電洞對復合後，電子躍遷釋放的能量減少，輻射的光子波長增加，導致光譜強度峰值對應的波長  $\lambda_{max}$  有紅移的現象，如圖二十七所示。若將光波長  $\lambda_{max}$  代入  $E_g = 1240eV \cdot nm / \lambda_{max}$ ，可計算出能隙  $E_g$  與順向偏壓 V 的關係，如圖二十八。



圖二十七 10mm 黃色 LED 波長偏移現象

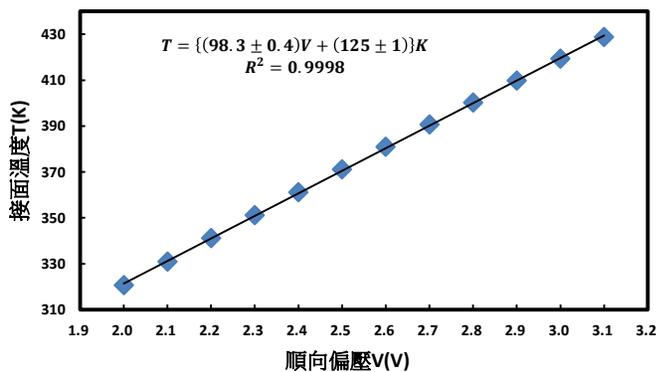


圖二十八 10mm 黃色 LED 能隙與順向偏壓的關係

根據 Varshni formula  $E_g = E_{g0}(T = 0K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$ ，可以得到  $\alpha T^2 + \Delta E_g T + \Delta E_g \beta = 0$ ；其中  $\Delta E_g = E_g - E_{g0}$ 。因此可以解得溫度 T，再將能隙  $E_g$  與順向偏壓 V 的擬合方程式代入，則得到溫度與順向偏壓 V 的關係：

$$T = -\frac{\Delta E_g}{2\alpha} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4\alpha\beta}{\Delta E_g}} \right) ; \Delta E_g = E_g - E_{g0} = [-0.0426V + 2.2066] - E_{g0}$$

本實驗所測量的 10mm 黃色 LED 的半導體材料應為 AlGaInP，查詢文獻<sup>8</sup>得 AlGaInP 的 Varshni formula 常數  $\alpha = 0.577\text{meV/K}^2$ 、 $\beta = 372\text{K}$  及  $E_{g0} = 2.207\text{eV}$ 。因此可依據溫度與順向偏壓 V 的關係式，由順向偏壓 V 得到發光二極體的接面溫度 T，如圖二十九。



圖二十九 10mm 黃色 LED 的溫度與順向偏壓的關係

## (二) 利用濾光片測量 LED 能隙測量

利用濾光片(較 $\lambda_c$ 長的波長通過)，測量 LED 的光電流 $I_{ph}$ ，再以 $I_{ph}$ 對 $\lambda_c$ 作圖，可得 LED 半導體材料的底限波長 $\lambda_0$ 。經公式  $E_g = (1240eV \cdot nm)/\lambda_0$ ，可得出 LED 半導體材料的能隙  $E_g$ 。比較實驗值與發光峰值波長對應的能隙值，如下表：

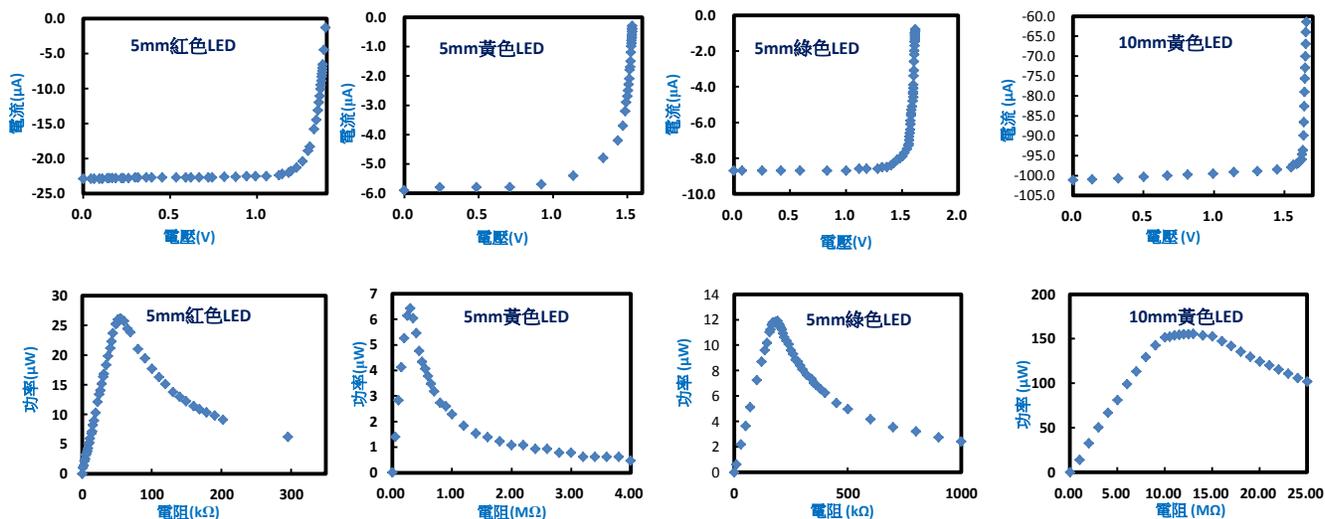
LED	發光峰值波長	發光峰值波長對應的能隙值	能隙實驗值
5mm 紅色 LED	698nm	1.77eV	$(1.16 \pm 0.78)eV$
5mm 黃色 LED	598nm	2.07eV	$(2.03 \pm 0.18)eV$
5mm 綠色 LED	564nm	2.19eV	$(2.07 \pm 1.17)eV$
10mm 黃色 LED	598nm	2.07eV	$(2.04 \pm 0.53)eV$

表一 LED 能隙值

在計算各種 LED 的能隙值時，發現紅色與綠色 LED 的能隙測量值的**不準量**很大，尤其是 5mm 紅色 LED 的能隙測量值與發光峰值波長對應的能隙值差距甚遠，而 5mm 和 10mm 的黃色 LED 能隙測量值就十分接近發光峰值波長對應的能隙值。

## (三) 測量 LED 作為太陽能電池的最大輸出功率 $P_m$

### 1. 測量 LED 吸收氬燈光的電流 $I$ 與電壓 $V$ ，並計算輸出功率與負載電阻的關係圖



### 2. 計算

LED 的種類	5mm 紅色 LED	5mm 黃色 LED	5mm 綠色 LED	10mm 黃色 LED
開路電壓 $V_{oc}(V)$	1.401	1.530	1.625	1.673
短路電流 $I_{sc}(\mu A)$	22.9	13.5	8.7	101.2
在最大功率時外接負載 $R_L(k\Omega)$	55	175	300	13000
最大功率 $P_{max}(\mu W)$	$26.1 \pm 0.1$	$16.7 \pm 0.1$	$11.8 \pm 0.1$	$155.4 \pm 0.5$
填充因子 $FF(\%) = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$	$81.3 \pm 0.4$	$80.7 \pm 0.6$	$83.6 \pm 0.9$	$91.80 \pm 0.08$
串聯電阻 $R_s(k\Omega) = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{\text{接近在開路電壓時 } I-V \text{ curve 的斜率}}$	$4.3 \pm 0.3$	$5.9 \pm 0.1$	$7 \pm 2$	$0.7 \pm 0.1$
並聯電阻 $R_{sh}(M\Omega) = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{\text{接近在短路電流時 } I-V \text{ curve 的斜率}}$	$2.5 \pm 0.3$	$2.7 \pm 0.2$	$5 \pm 1$	$0.80 \pm 0.07$

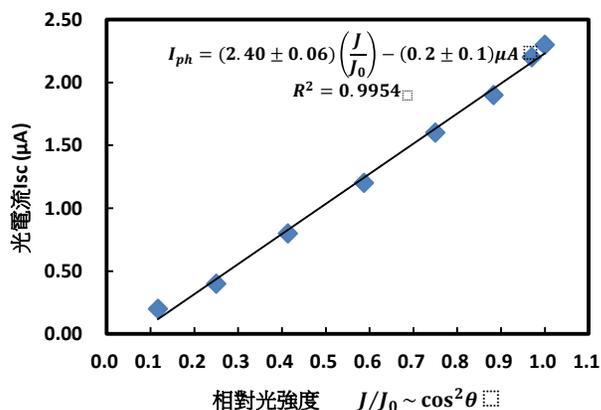
表二 LED 各項物理參數計算結果

#### (四) 不同光強度對於 LED 太陽能電池產生電壓、電流的影響

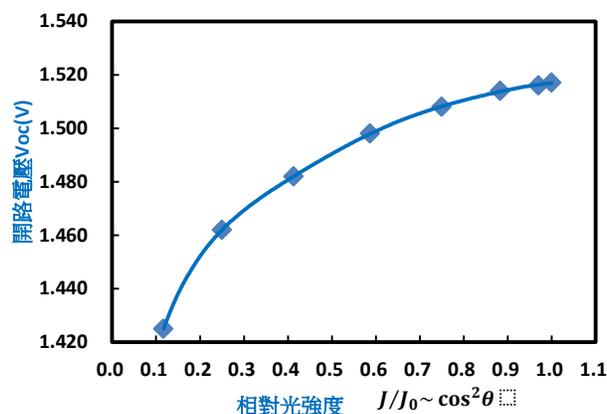
##### 1. 利用偏振片測量入射光的相對強度和電壓、電流的關係

##### (1) 相對光強度( $J/J_0 \sim \cos^2 \theta$ )對開路電壓 $V_{oc}$ 與短路電流 $I_{sc}$ 作圖

以 5mm 黃色 LED 為例，利用兩偏光片的夾角 $\theta$ ，可調控入射 LED 的光強度，紀錄不同偏光片的夾角 $\theta$ 時的電壓 $V$ 與電流 $I$ 。將相對光強度( $J/J_0 \sim \cos^2 \theta$ )對開路電壓 $V_{oc}$ 與短路電流 $I_{sc}$ ，如圖三十與圖三十一所示。



圖三十 5mm 黃色 LED 入射光強度和光電流 $I_{ph}$ 圖



圖三十一 5mm 黃色 LED 入射光強度和開路電壓 $V_{oc}$ 圖

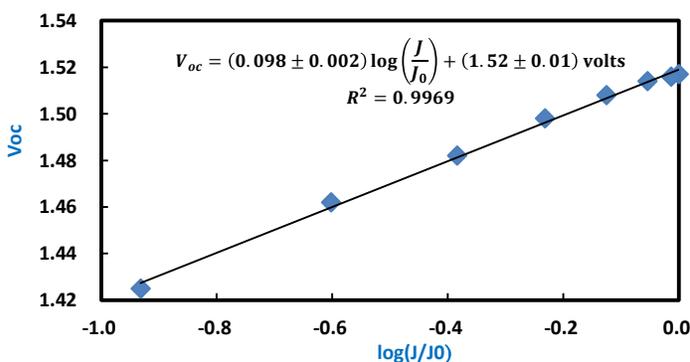
##### (2) 利用數據擬合得到相對光強度( $J/J_0 \sim \cos^2 \theta$ )、開路電壓 $V_{oc}$ 與短路電流 $I_{sc}$ 的關係式

由圖三十的實驗結果可知：對於電流而言，照度和電流成線性關係，因為入射 LED 的光子數越多，在 p-n 接面處所激發的自由電子電洞對也越多。因此藉由聚光設備來增強入射光的強度，即可改善 LED 作為太陽能電池所能產生電流過小的問題。此外圖三十擬合的線性方程式為：

$$I_{ph} = [(2.40 \pm 0.07)(J/J_0) - (0.2 \pm 0.1)] \mu A$$

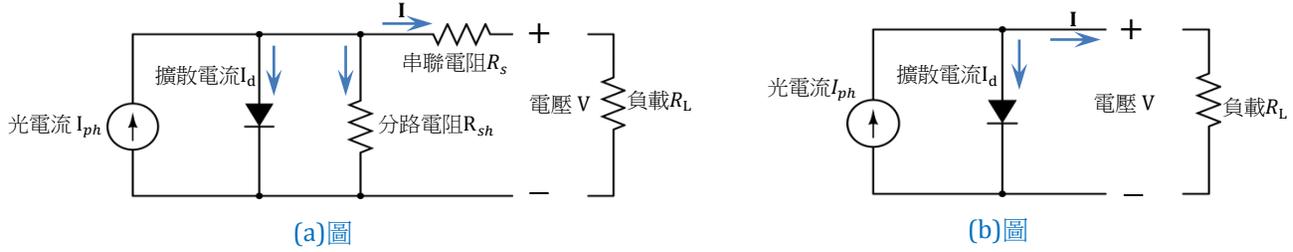
根據上式，從 LED 的短路電流 $I_{sc}$ 亦可推算出入射光的相對強度。因此許多文獻<sup>5</sup>中也提及 LED 可作為光偵測器使用。另外，由圖三十一的實驗結果可知光強度和開路電壓成非線性關係，當照度較大時，電壓會趨於極限值。若將開路電壓 $V_{oc}$ 與相對光強度取對數作圖，則可由數據擬合得到開路電壓 $V_{oc}$ 與相對光強度 $J/J_0$ 的關係式：

$$V_{oc} = [(0.098 \pm 0.002) \log(J/J_0) + (1.519 \pm 0.001)] \text{ volts}$$



圖三十二 5mm 黃色 LED 開路電壓 $V_{oc}$ 和相對光強度取對數 $\log(J/J_0)$ 作圖

依據上述兩個數據圖表，可以推導出開路電壓 $V_{oc}$ 與短路電流 $I_{sc}$ 的數學關係式。從文獻<sup>3</sup>得知：太陽能電池的等效電路如圖三十三(a)所示。



圖三十三 太陽能電池等效電路圖

依據柯希荷夫迴路原則，可得

$$-IR_s - V + (I_{ph} - I_d - I)R_{sh} = 0 \Rightarrow I \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = I_{ph} - \frac{V}{R_{sh}} - I_d$$

其中 $I_d = I_D \times e^{\frac{qV}{kT}} = I_D \times e^{\beta V}$ ； $\beta \equiv \frac{q}{nkT} \cong \frac{1.6 \times 10^{-19} C}{n \times (1.38 \times 10^{-23} J/K) \times 400K} = \frac{29}{n} \frac{1}{volts}$ 。一般情況 $I_D < 10^{-9} A$ 。

若 $R_s = 0$ ， $R_{sh} = \infty$ ，等效電路如圖三十三(b)所示。依據柯希荷夫節點原則，可得到輸出電流的值為：

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_D(e^{\beta V} - 1)$$

若外接電路短路時，則 $V=0$ ，由上式可得

$$I_{sc} = I_{ph}$$

若外接電路斷路時，則 $I=0$ ，

$$I_{ph} - I_D(e^{\beta V_{oc}} - 1) = 0 \Rightarrow I_{sc} - I_D(e^{\beta V_{oc}} - 1) = 0$$

$$\Rightarrow V_{oc} = \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_D} + 1 \right) = \frac{1}{\beta} \ln(I_{sc} + I_D) - \frac{\ln(I_D)}{\beta} \cong \frac{1}{\beta} \ln(I_{sc}) - \frac{\ln(I_D)}{\beta}$$

若數據 $V_{oc}$ 將對 $\ln(I_{sc})$ 作圖可得圖三十四，則可得到：

斜率 $(1/\beta) = (0.075 \pm 0.002)volts$

$$\Rightarrow nkT/q = (0.075 \pm 0.002)volts$$

假設在氬燈照射下 LED 的接面溫度為 310K  
則 LED 照光時的理想因子為

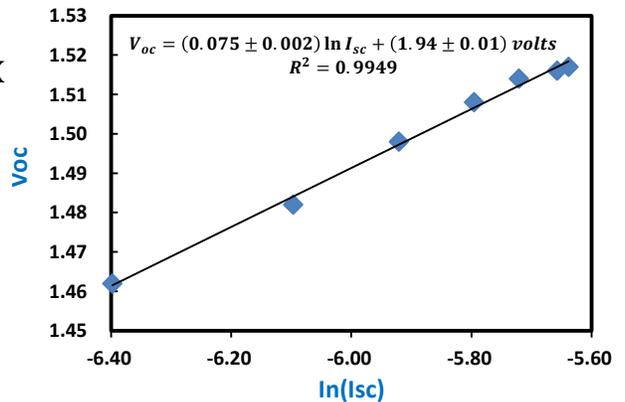
$$\Rightarrow n = \frac{1.6 \times 10^{-19} C}{(1.38 \times 10^{-23} J/K) \times 310K} \times (0.075 \pm 0.002)volts$$

$$= 2.81 \pm 0.07$$

截距 $(-\ln(I_D)/\beta) = (1.94 \pm 0.01)$ ，

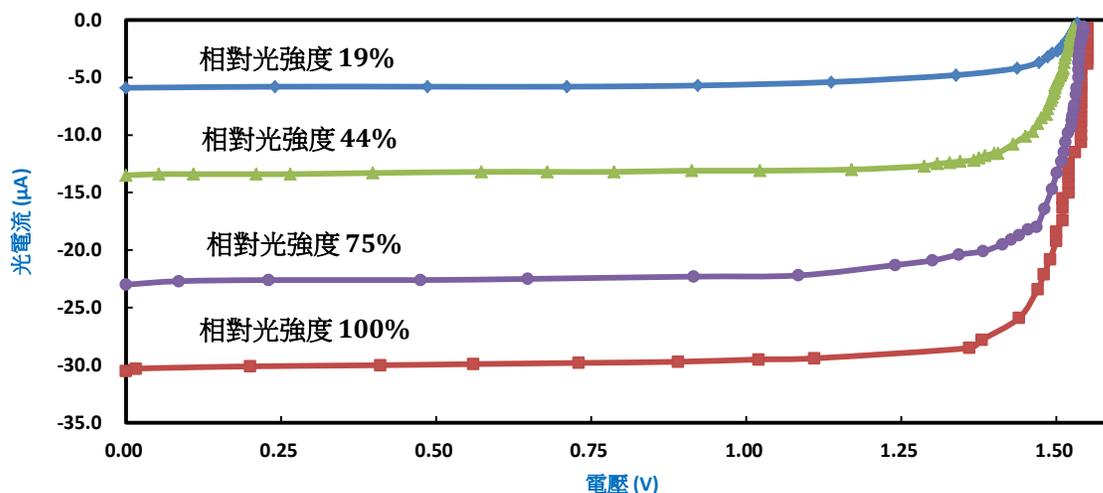
因此擴散飽和電流為

$$\Rightarrow I_D = e^{\frac{1.94 \pm 0.01}{0.075 \pm 0.002}} A = (5.84 \pm 0.03) \times 10^{-12} A$$



圖三十四 開路電壓與短路電流的半對數圖

## 2. 測量在不同照度下，5mm 黃色 LED 的 I-V 圖的變化



圖三十五 不同照度下 5mm 黃色 LED 的 I-V 圖

相對光強度L(%)	19	44	75	100
短路電流 $I_{sc}$ ( $\mu A$ )	5.9	13.5	23.0	30.5
開路電壓 $V_{oc}$ (V)	1.535	1.530	1.545	1.550
填充因子FF	70.9%	80.7%	78.2%	82.0%
最大功率 $P_{max}$ ( $\mu W$ )	$6.4 \pm 0.1$	$16.7 \pm 0.1$	$27.8 \pm 0.1$	$38.8 \pm 0.1$
串聯電阻 $R_s$ ( $k\Omega$ )	$11.8 \pm 0.3$	$5.9 \pm 0.1$	$3.3 \pm 0.2$	$2.9 \pm 0.1$
分路電阻 $R_{sh}$ ( $M\Omega$ )	$4.6 \pm 1.3$	$2.4 \pm 0.2$	$1.3 \pm 0.1$	$1.1 \pm 0.1$

表三 不同照度下 5mm 黃色 LED 的 I-V 圖的各項物理參數

在不同照度下，測量作為太陽能電池的 LED 的 I-V 曲線，如圖三十五所示。依據圖三十五 計算 LED 作為太陽能電池的各項物理參數如上表，得到 LED 太陽能電池在不同照度下有不同串聯電阻 $R_s$ 、分路電阻 $R_{sh}$ 及最大輸出功率 $P_{max}$ 。因此在設計儲電系統時，需考慮到 LED 的阻抗匹配，以達到最高的光電轉換效率。

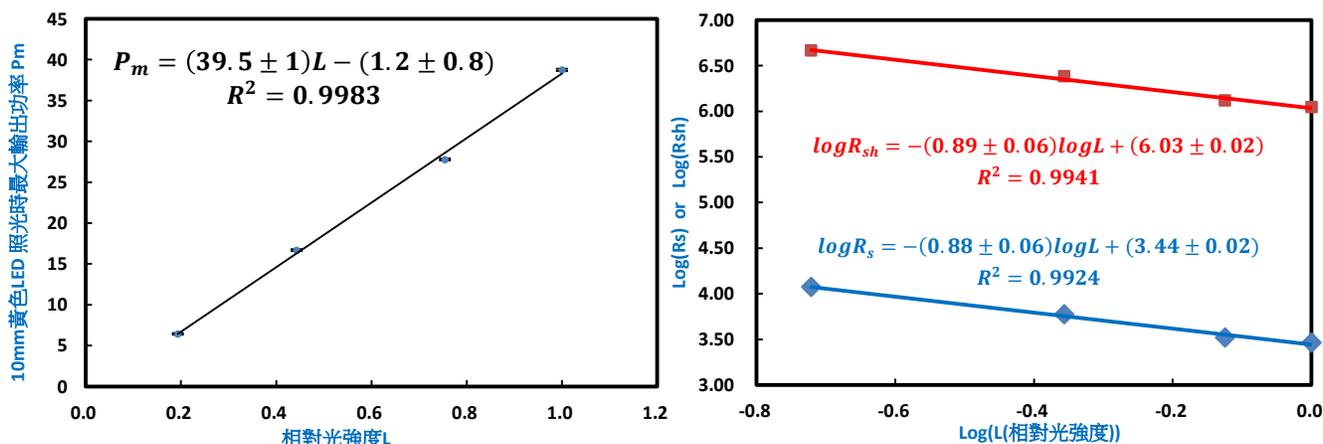
將最大功率 $P_{max}$ 對相對光強度  $L$  作圖，如圖三十六。由圖三十六可知最大功率 $P_{max}$ 與相對光強度  $L$  呈線性關係。即光強度越大，LED 的最大輸出功率越大。另外，將串聯電阻 $R_s$ 、分路電阻 $R_{sh}$ 分別與相對光強度  $L$  作全對數圖，如圖三十七所示。從圖中數據擬合方程式的相關係數接近 1，可推測相對光強度  $L$  與串聯電阻 $R_s$ 、分路電阻 $R_{sh}$ 的關係可能為： $R \cong R_0 L^m$ ，其中 $R$ 為 $R_s$ 或 $R_{sh}$ 。若方程式兩邊取對數

$$\log R = \log R_0 + m \times \log L$$

若 $\log R$ 對 $\log L$ 作圖則斜率為  $n$ 。從圖三十七中的數據擬合得知：

串聯電阻 $R_s$ 的  $m \cong 0.88 \pm 0.06$ ；分路電阻 $R_{sh}$ 的  $m \cong 0.89 \pm 0.06$ 。

因此從圖三十七中的數據，入射光強度越大，LED 作為太陽能電池的等效電阻會小。這樣的結果是有好有壞。因為若 LED 要作為一種「稱職的」太陽能電池，必須要有儘量小的串聯電阻 $R_s$ 與儘量大的分路電阻 $R_{sh}$ 。若入射光強度越大串聯電阻 $R_s$ 、分路電阻 $R_{sh}$ 同時變小就有好有壞。但從圖三十七的數據可知光強度越大，LED 的最大輸出功率越大。因此 LED 應該是可以作為一種「相對稱職的」太陽能電池。



圖三十六 不同照度下 5mm 黃色 LED 的最大輸出功率與相對光強度作圖 圖三十七 不同照度下 5mm 黃色 LED 的等效電阻與相對光強度的全對數

### (五) 利用透鏡聚光對 LED 太陽能電池產生電壓、電流之影響

1. 使用半徑 7.5cm，焦距 15cm 的薄凸透鏡聚光，並測量各 LED 聚光前後的電壓與電流

電壓變化	5mm 紅色 LED	5mm 黃色 LED	5mm 綠色 LED	10mm 黃色 LED
聚光前	1.26V	1.41V	1.54V	1.66V
聚光後	1.49V	1.58V	1.70V	1.77V

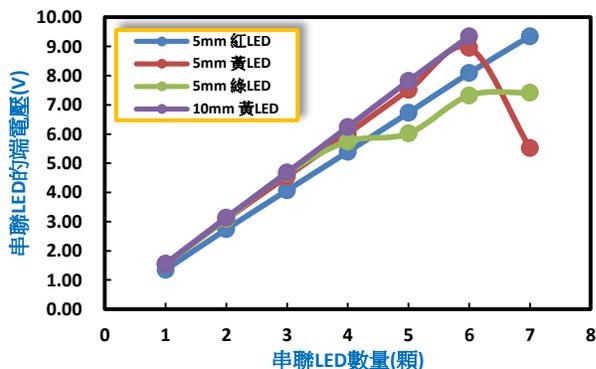
電流變化	5mm 紅色 LED	5mm 黃色 LED	5mm 綠色 LED	10mm 黃色 LED
聚光前	0.7 $\mu$ A	0.4 $\mu$ A	0.2 $\mu$ A	6.3 $\mu$ A
聚光後	43.1 $\mu$ A	25.8 $\mu$ A	12.4 $\mu$ A	330 $\mu$ A

表四 LED 聚焦前後電壓、電流之變化

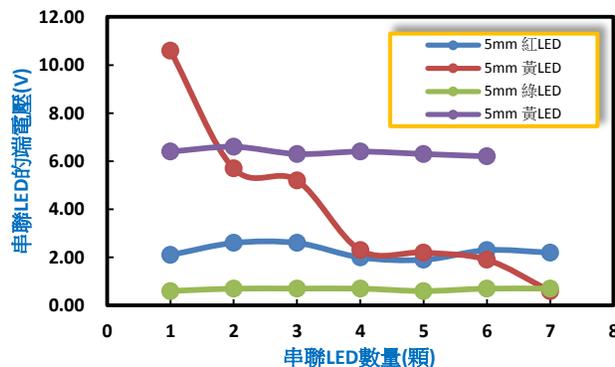
2. 電壓在超過 1.4V 後，光源強弱對於電壓的成長影響不是很大，電壓會趨於平緩，接近極限。所以此實驗中，聚光前後對於電壓的影響不是很明顯。
3. 電流和照度成正相關的趨勢，當光強度越大，電流也會跟著成長，如實驗結果所示，電流增加了約 60 倍，所以利用透鏡增加光強度，可以有效解決原先電流過小的問題。
4. 此結果符合實驗(四)「不同光強度對於 LED 太陽能電池 I-V 的影響」的結果。

## (六) LED 太陽能電池陣列排列方式對接收光源後產生電壓、電流之影響

### 1. LED 太陽能電池串聯個數與電壓、電流



圖三十八 LED 串聯顆數和電壓的關係



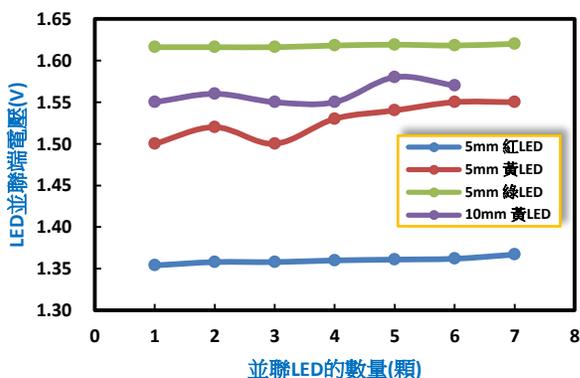
圖三十九 LED 串聯顆數和電流的關係

在光源均勻的理想情形下(例如：太陽光)，每顆 LED 照到的光強度皆相同，則所通過的電流在不同串聯顆數條件下會約略維持一定值。但是如圖三十八，可見 LED 串聯顆數的電流曲線隨著顆數改變而有起伏(多為下降)，其主要原因是光源不均，而照度特別低的 LED 會使整串電路系統電流下降。

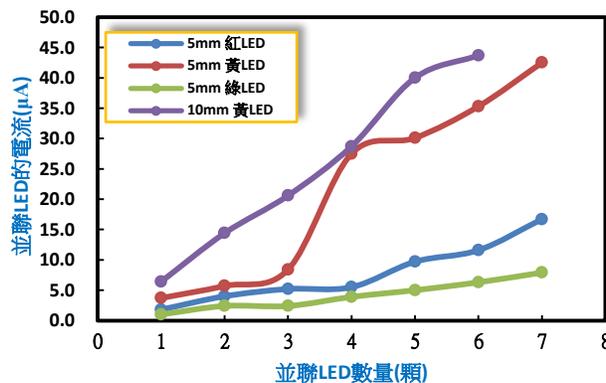
光源不均勻的成因如：光源和待測平面距離變化、光源與待測平面非垂直、燈泡本身不均勻、光源內部反射或電極遮光造成。此為使用氙燈作為光源測量的缺點，在實際應用於太陽光時應不會發生。

LED 太陽能電池以串聯方式連結可增加輸出電壓，以提升應用價值。

### 2. LED 太陽能電池並聯個數與電壓、電流



圖四十 LED 並聯顆數和電壓的關係



圖四十一 LED 並聯顆數和電流的關係

並聯可以有效地使電流倍增，達到增強電流的效果。如再搭配凸透鏡和串聯 LED 使用，不僅能達到增強電流的效果，還能提升電壓，對於應用將有非常大的幫助。經由測試 LED 太陽能電池串聯與並聯的性質，對數顆 LED 串並聯的電流電壓有了認識，為下個步驟—製作發電發光 LED 模組奠定基礎。

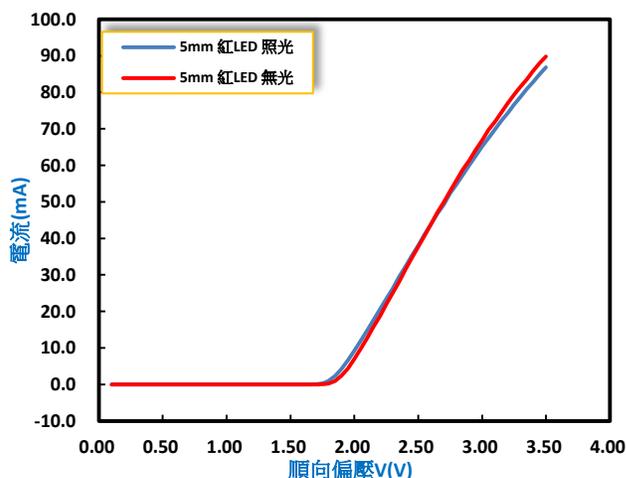
### 三、探討 LED 太陽能電池同時輸入電壓和照光對其產生電壓、電流的影響

#### (一) 照射氙燈光，改變順向偏壓，比較有、無照光時 LED 的 I-V 曲線差異

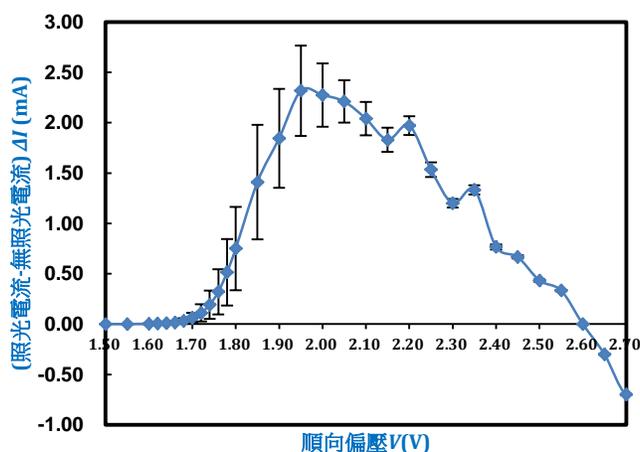
LED 的原設計為光源，本研究冀望它能發揮太陽能電池的功能。所以上述的實驗分別研究了：①LED 在順向偏壓時的電流與光學性質、②LED 的吸收光時的電流電壓性質。若 LED 同時在順向偏壓下照光，那通過 LED 的「電流」會發生怎樣的變化呢？依據太陽能電池理論模型的等效電路<sup>10</sup>：

$$I = I_D \left( e^{\frac{qV}{nk_B T}} - 1 \right) - I_{ph}$$

上式中的光電流  $I_{ph}$  與順向偏壓  $V$  有關嗎？或者說順向偏壓會影響 LED 的光吸收率嗎？以 5mm 紅色 LED 為例：將有、無照光的 LED I-V 曲線電流值相減，如圖四十三所示。

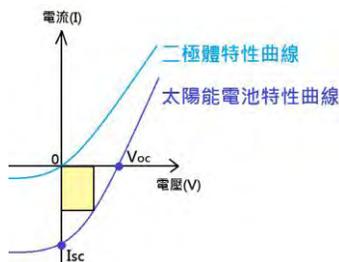


圖四十二 5mm 紅色 LED 照光與無照光的 I-V curve



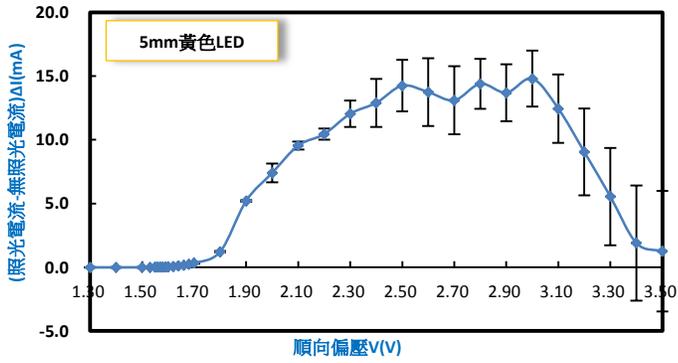
圖四十三 5mm 紅色 LED 照光與無照光的  $\Delta I$ -V curve

LED 吸收產生的光電流  $I_{ph}$ ，因 p-n 接面的內建電場作用而從正極(p 型半導體)流出。而順向偏壓時的電流  $I_D(e^{\frac{qV}{nk_B T}} - 1)$  是從正極流入，所以兩者電流方向相反。因此照光的 LED 的總電流因該比沒照光的電流為小，換句話說應該如圖四十四 中較低的曲線。

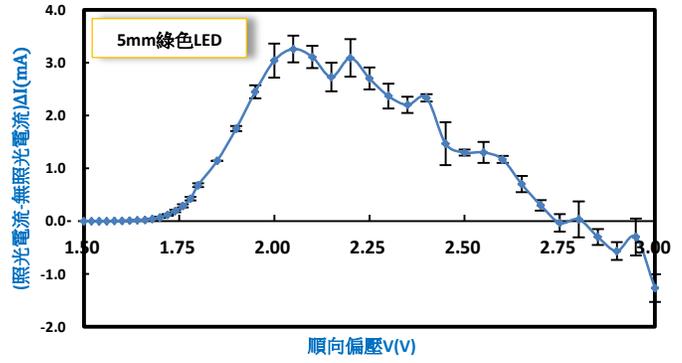


圖四十四 二極體照光和未照光的 I-V curve

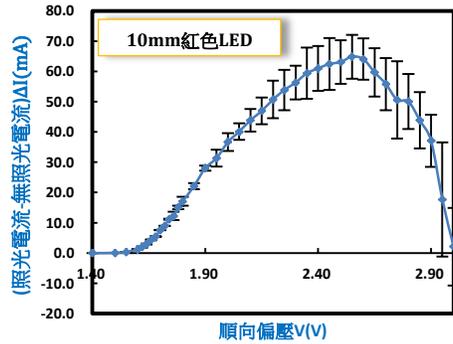
但是本實驗的結果並非如此，從圖四十三，可知順向偏壓約在 1.7V~2.6V，有照光較無照光的總電流約高 1mA~2mA。這個順向偏壓範圍恰與 LED 發光強度最大處約略相符。除了 5mm 紅 LED，其他 LED(5mm 黃、綠 LED，10mm 紅、黃、綠 LED)也被作了如上的測量，實驗結果如圖四十五 所示。



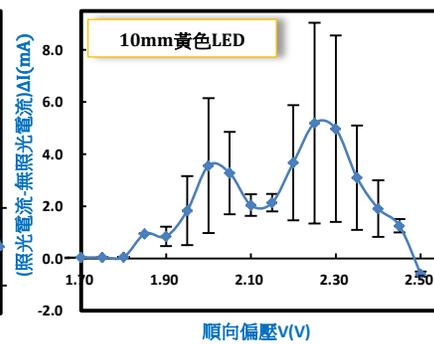
(a) 5mm 黃色 LED



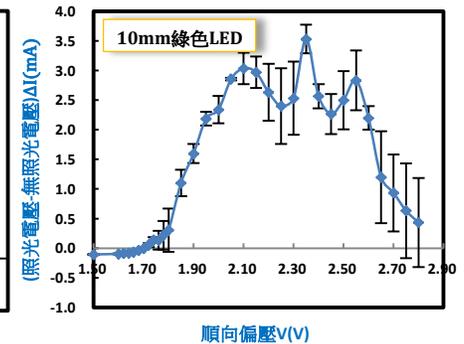
(b) 5mm 綠色 LED



(c) 10mm 紅色 LED



(d) 10mm 黃色 LED



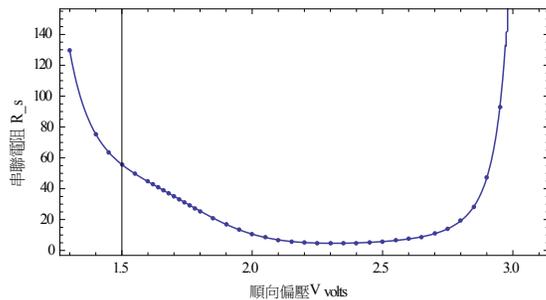
(e) 10mm 綠色 LED

圖四十五 LED 照光與無照光的  $\Delta I$ -V curve

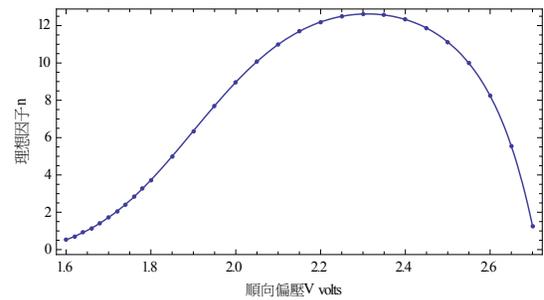
上述現象，經查詢文獻<sup>9</sup>，可能是半導體塊材在電場作用下，而增強光吸收率的現象，稱為 Franz-Keldysh effect。但 LED 可能是量子井結構，若量子井結構在電場作用下，其光吸收率亦會增強，稱為 quantum-confined Stark effect。若要進一步了解 LED 在順向偏壓時的光吸收的物理機制，需要再設計新的實驗系統，我們將後續探討此有趣的現象。在實驗一中探討 LED I-V curve 的方法中，計算出不同順向偏壓時的串聯電阻  $R_s$  與理想因子  $n$ ，可以與發光強度作比較。因此，根據實驗一的計算式：

$$\text{串聯電阻 } R_s = \frac{1}{\frac{dI}{dV}} + \left[ \frac{d}{dV} \left( \frac{1}{\frac{dI}{dV}} \right) \right] \times \frac{1}{\frac{dI}{dV}} ; \text{理想因子 } n = \frac{q}{kT} \left\{ I \times \frac{1}{\frac{dI}{dV}} - R_s \times I \right\} ;$$

可得到圖四十六、圖四十七。與無照光相比，照光時的 LED 有更小的串聯電阻  $R_s$ 、更大的理想因子  $n$ 。這代表輻射複合 (Radiative recombination) 的效應更為主導此順向偏壓下的 LED 電流值。



圖四十六 5mm red LED 照光時串聯電阻與順向偏壓的關係



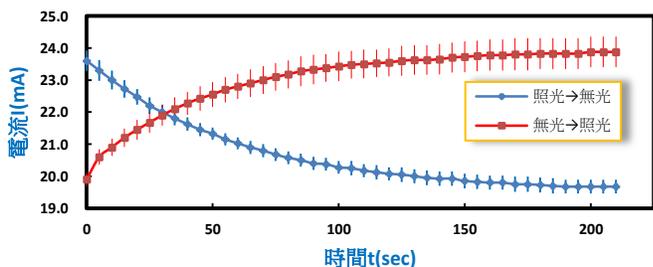
圖四十七 5mm red LED 照光時理想因子與順向偏壓的關係

## (二) 輸入固定電壓，探討光照條件改變後電流和時間的變化關係。

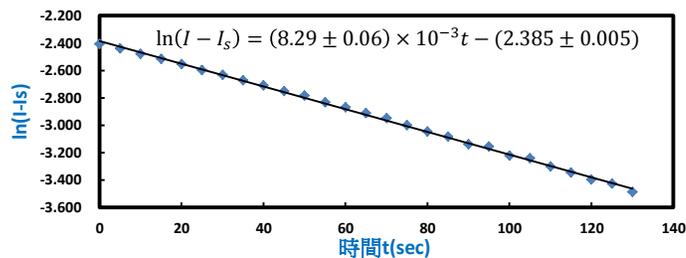
在進行測量照光下 LED 的電壓、電流時，發現照光的強度改變時，LED 的電流並不會立即呈現穩定值，必須經過約 200sec~300sec 才能得到一穩定值。因此，接下來要探討這個有趣的現象。

### 1. 改變光強度照時，電流與時間的關係

如圖四十八 所示，當 5mm 黃色 LED 照光初始，電流穩定增加，前 60 秒電流改變幅度大，約 210 秒後趨於平緩，電流變化微小。如圖四十九所示，當 LED 照光後，移除光源，電流穩定減少，前 60 秒電流改變幅度大，約 240 秒後趨於平緩，電流的變化微小。



圖四十八 5mm 黃色 LED 照光強度改變時電流與時間的關係



圖四十九 5mm 黃色 LED 照光後電流衰減的半對數擬合圖

若以下式來擬合上述照光後電流逐漸衰減的曲線：

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + I_s$$

式中， $t$ 為時間、 $I$ 為電流、 $\tau$ 為時間常數、 $I_0$ 為初始電流、 $I_s$ 為穩定電流。兩邊取自然對數，則可得到

$$\ln(I - I_s) = -\frac{1}{\tau} \times t + \ln(I_0)$$

經數據擬合可得到斜率為 $-\frac{1}{\tau} = (8.29 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ ；截距為 $\ln(I_0) = 2.385 \pm 0.005$

此曲線與電容充、放電的電流與時間關係的曲線相似。從參考文獻<sup>3</sup>得知，LED 的 p-n 接面的空乏區中，空間電荷所造成的內建建場，會形成寄生電容。所以我們猜測此電流緩變現象是因為當光照強度改變時，產生類似電容充、放電的效應。因此時間常數  $\tau = RC$ ，其中由前述測量 LED 內部電阻值的實驗可得到 5mm 黃色 LED 的  $R = (5.9 \pm 0.1) \text{k}\Omega$ ，則 LED 的等效電容值： $C = (0.0204 \pm 0.0004) \text{F}$  (這個數值太大了!)

因此接下來要測量未照光與照光時 LED 的等效電容值。以便驗證此猜測是否正確。

### 2. 測量未照光時，LED 的寄生電容值

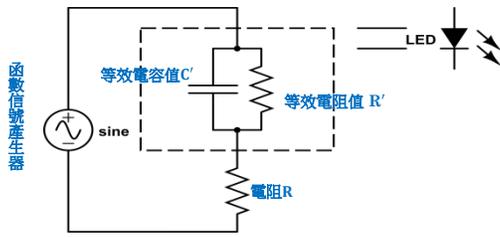
若將 LED 的等效電路是為一等效電容與等效電阻的並聯，如圖五十 所示。若輸入頻率為  $f$ ，電壓為  $V_s$  的交流訊號，則 LED 的端電壓  $V_{\text{LED}}$  與 輸入頻率  $f^2$  的關係：

$$\left| \frac{V_s}{V_{\text{LED}}} \right|^2 = 4\pi^2 (RC)^2 f^2 + \left( 1 + \frac{R}{R'} \right)^2$$

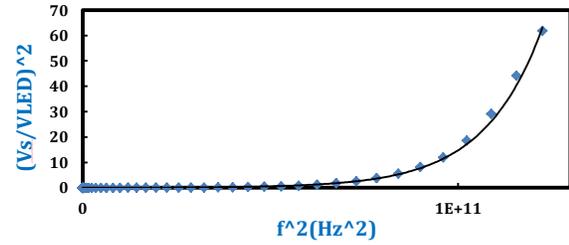
令  $y \equiv \left| \frac{V_s}{V_{\text{LED}}} \right|^2$ ， $x \equiv f^2$ ，擬合曲線  $y = 0.0233e^{(6 \times 10^{-11})x}$ ，如圖五十一 所示。

擬合曲線斜率  $= [(2\pi RC)^2] = \frac{dy}{dx} = (1.398 \times 10^{-12})e^{(6 \times 10^{-11})x}$

當 LED 為直流模式，則頻率  $f = 0 \text{ Hz}$ ，因此  $C' = 0.38 \text{ nF}$ 。



圖五十 LED 等效電容的測量電路圖



圖五十一 LED 等效電容的測量數據擬合圖

### 3. 測量照光時，LED 的寄生電容值

接著用數位三用電表測量照光下的 LED 等效電容值如下

偏振片偏轉角度	相對光強度	電容值(pF)			電容平均值(pF)	不準量
		第一次測量	第二次測量	第三次測量		
90	0	3	3	2	2.7	±0.3
80	0.17	3	3	2	2.7	±0.3
70	0.34	5	8	4	6	±1
60	0.50	8	10	6	8	±1
50	0.64	13	12	10	12.0	±0.9
40	0.77	49	49	13	37	±12
30	0.87	50	49	16	38	±11
10	0.98	50	49	49	49.0	±0.3
0	1	50	50	50	50	±0

表五 LED 等效電容值之計算

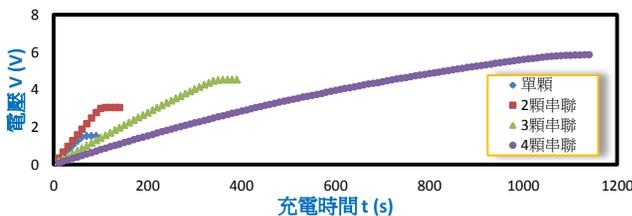
與先前推測的數值相差甚大。所以 LED 照光前後電流緩慢變化的現象應該不是 LED 內部的等效電容所引起。至於確切的原因，有待後續設計實驗來探討。

## 四、設計電力儲存系統以儲存 LED 太陽能電池所產生的電力

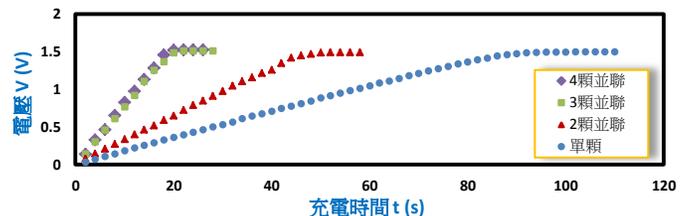
### (一) 以電容作為儲電系統

隨著串聯顆數的增加，要充到相同電壓所需要的時間越長，但是電容充完電的電壓亦會提升，如此可提高應用價值。例如：單顆黃色 LED 太陽能電池對電容充電後，電容所具有的電壓有時不足以達到黃色 LED 的啟動電壓(1.6V)，但是若將它們串聯對電容充電，則電容充完電所具有的電壓便足以反過來激發黃色 LED 發光。

LED 太陽能電池對電容充電時，其電壓隨時間變化與實驗(六)「LED 太陽能電池陣列排列方式對吸光後產生電壓、電流的影響」的結果略有差異，這是因為二極體是非線性元件，接上電容時有不同的等效電路。隨著並聯顆數的增加，LED 太陽能電池系統的電流也隨之增加，要充到相同電壓所需要的時間就會縮短。並聯的優點可與串聯搭配使用，解決串聯後電壓提高但充電速度過慢的缺點。



圖五十二 LED 串聯電容充電時間和電壓的關係



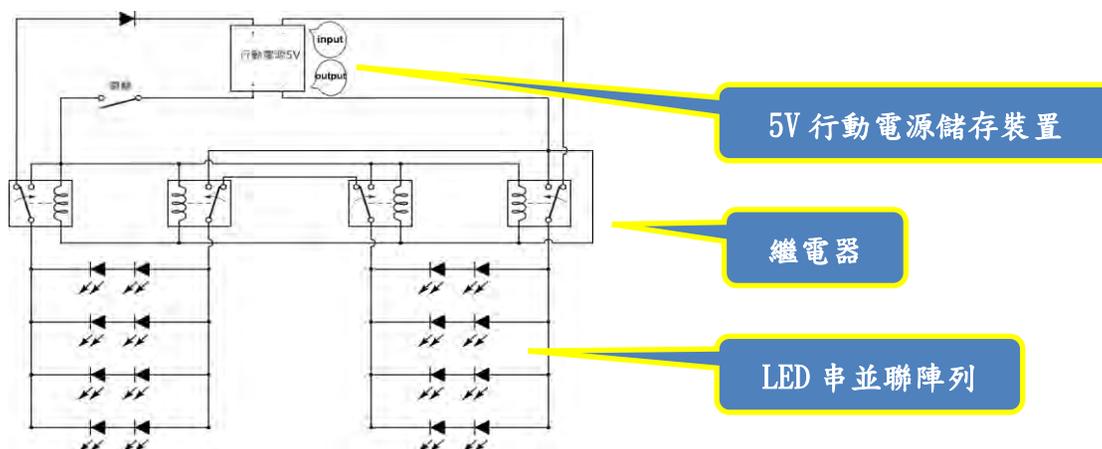
圖五十三 LED 並聯電容充電時間和電壓的關係

## (二) LED 模組電力儲存系統設計

在進行完(1)LED 發光特性、(2)LED 太陽能電池吸光特性、(3)LED 同時輸入順向和逆向偏壓等三個部份後，綜合測量結果，進行 LED 發電發光電路設計。在設計中，選擇了行動電源作為儲存 LED 產生電能的裝置。

充電時，四顆 LED 串聯以達到對行動電源充電的最低電壓；放電時，利用繼電器切換線路，使 LED 以兩顆串聯為單位並聯，成功由行動電源供應的電能激發點亮。啟動繼電器的電能亦來自行動電源，故此系統達到 LED 一物兩用的目的。

下圖電路中，充電時，電流會由 LED 正極流出，經過圖中的繼電器線路和二極體，輸入至行動電源充電。放電時，繼電器啟動，線路轉換至圖中箭頭方向，使得下圖中兩組 LED 並聯，電流由行動電源經過開關和繼電器，點亮 LED。



圖五十四 LED 發電發光系統電路示意圖



## 柒、結論

本文藉由研究 LED 的光學性質：發光光譜、吸收光譜、吸收光的電流電壓曲線；並測量由 LED 吸收可見光時的內部等效電阻，藉以評估 LED 作為太陽能電池的實用性。研究結果顯示 LED 在太陽能電池等效電路模型中的相關參數(填充因子，串聯電阻，分路電阻)，均能有效地將光能轉換成電能。接著利用下列方法：①加裝 Fresnel 透鏡聚光、②設計 LED 陣列的電路、③設計電能輸出入的轉換電路等方法，製作出利用 LED 在白天將光能轉成電能，在晚上將電能轉換成光能，而不需要另外輸入電能的 self-powered LED lamp。以下為本文的研究結論：

### 一、LED 一般特性測量

- (一) 不同顏色 LED 因材料(能階)差異，而有不同啟動電壓及 I-V 曲線。其中，黃色 LED 輸入電壓的 I-V 曲線較陡，且啟動電壓較低。因此採用黃色 LED 製作 LED 型太陽能電池模組。
- (二) LED 發光時的 I-V 曲線隨著電壓上升，電流趨向飽和。經過計算後，發現電壓越大，串聯電阻會迅速上升，因此抑制了理想二極體隨順向偏壓升高而電流成指數上升的趨勢。

### 二、LED 作太陽能電池的特性測量

- (一) 黃色與綠色 LED 的吸收與發光波長大約相同，且黃色 LED 的吸收波段與太陽光譜重疊的面積最大，因此黃色 LED 最適合用於 LED 太陽能電池。
- (二) LED 發光的顏色並非一直維持在特定波長範圍。當溫度上升時，光譜有紅移的現象。由 Varshni formula 公式配合實驗的數據，可推算出 LED 接面的溫度。
- (三) 在計算 LED 能隙值的實驗中，測得的能隙值與公認值接近，5mm 黃色 LED 的能隙值約為 2.0eV，可推測 LED 應是由磷化鋁鎵銻光電半導體材料所構成。
- (四) 各種 LED 型太陽能電池的特性比較

LED 的種類	5mm 紅色 LED	5mm 黃色 LED	5mm 綠色 LED	10mm 黃色 LED
開路電壓 $V_{oc}(V)$	1.401	1.530	1.625	1.673
短路電流 $I_{sc}(\mu A)$	22.9	13.5	8.7	101.2
最大功率時外接負載 $R_L(k\Omega)$	55	175	300	13000
最大功率 $P_{max}(\mu W)$	$26.1 \pm 0.1$	$16.7 \pm 0.1$	$11.8 \pm 0.1$	$155.4 \pm 0.5$
填充因子 $FF(\%) = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$	$81.3 \pm 0.4$	$80.7 \pm 0.6$	$83.6 \pm 0.9$	$91.80 \pm 0.08$
串聯電阻 $R_s(k\Omega)$	$4.3 \pm 0.3$	$5.9 \pm 0.1$	$7 \pm 2$	$0.7 \pm 0.1$
並聯電阻 $R_{sh}(M\Omega)$	$2.5 \pm 0.3$	$2.7 \pm 0.2$	$5 \pm 1$	$0.80 \pm 0.07$

表六 LED 各項物理重要參數計算結果

- (五) 光線照度與 LED 產生的電流呈線性正相關，故可藉提高單位面積光強度(例：加入透鏡)，提升電流的輸出值。
- (六) 在進行 LED 串聯實驗時發現，並非所有實驗結果都呈現隨著串聯顆數上升，電流會持續上升的情形，有時串聯越多反而電流會下降，推測是因為若光源不均勻，則照度特別低的 LED 會使整串電路電流下降。故使用非平行光源時，需留意光源的均勻，以達較佳的效果。

### 三、 LED 太陽能電池同時輸入電壓和照光

- (一) LED 照光會產生與順向偏壓方向相反的光電流，因此與輸入電流產生些許的抵消。但在略大於能隙值的某範圍順向偏壓時，光電流的方向卻與順向偏壓相同。此現象的物理機制我們並不瞭解，有待後續的研究與探討。
- (二) 當照射 LED 光強度改變時，電流會有延遲效應。此延遲效應的原因，應該不是單純的電容效應所引起，應該還有其他更複雜的物理機制在裡面，這現象很有趣，值得深入探討。

### 四、 電力儲存系統的設計對電力運用之影響

- (一) LED 對電容充電，透過串聯與並聯的結合，可提升充完電的飽和電壓、加快充電速度。
- (二) LED 發電發光的電路設計：透過四個繼電器切換充電與放電的線路，且將串聯轉為並聯，可達到 LED 太陽能電池對行動電源充電，並使用該電能讓自身發光的一物兩用功能。

### 五、 研究應用與未來展望

- (一) 本文的研究的 **self-powered LED lamp** 可達到節約能源、降低成本、燈具小型化等應用。
- (二) 利用太陽能電池等效電路，計算 LED 串聯和並聯時的串聯與分路電阻，並與實際操作實驗的結果作比較，進行充放電系統的優化設計。
- (三) 設計實驗探討：逆、順向偏壓作用下，p-n 接面的光吸收率的變化與其物理機制。
- (四) 設計實驗探討：LED 照光強度調變時，電流的延遲效應的物理機制為何。

## 捌、 參考資料

- [1] 高涌泉(2011)。能量，量子現象，現代科技。普通高級中學基礎物理(一)全(148-211 頁)。新北市：龍騰文化。
- [2] 陳秋炳(2011)。物質的結構。普通高級中學基礎化學(二)全(88-127 頁)。臺南市：翰林。
- [3] 郭浩中、賴芳儀、郭守義(2013)。第二章發光二極體原理。LED 原理與應用(43-98 頁)。台北市：五南
- [4] 亞洲物理奧林匹亞競賽協會(2001)。太陽能電池的基本性質。台北市：吳健雄基金會。
- [5] O'Toole, Martina; Diamond, Dermot(2008). "Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices." Sensors 8, no. 4: 2453-2479.
- [6] 陳志諺(2006)。發光二極體電特性曲線之數值模擬。國立成功大學微電子工程研究所碩士論文。台南市。
- [7] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, R. Uzdin,(2001) "Extraction of Schottky Parameters With a Bias Dependent Barrier Height", Solid-State Electronics, 45, pp.143-148.
- [8] Ya-Ju Lee, Chia-Jung Lee, and Chih-Hao Chen.(2011)" Estimating the Junction Temperature of InGaN and AlGaInP Light-Emitting Diodes", Japanese Journal of Applied Physics 50 ,04DG18.
- [9] H.Haug, S.Koch(2004)"Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors, World Scientific.
- [10] 蔡進譯(2005)。超高效率太陽電池。物理雙月刊，二十七卷五期，706。

## 【評語】 040109

1. 作品討論以 LED 當成太陽能電池的可行性。LED 及太陽能電池運作機制本是相反的物理行為，作品開啟其相容性的探討，有新穎應用的可能性。
2. 應可再以特製電路成並串聯方法，討論提升效率之可行性，或亦可延伸再探討開發 LED 及太陽能電池較能共容的材料或系統。