2014 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品編號 160004
- 参展科別 物理與天文學
- 作品名稱 自動發電發光二極體的光電性質探討
- 得獎獎項 大會獎:二等獎
 - 荷蘭 INESPO 正選代表:2014 年荷蘭國際 環境及永續發展競賽

- 就讀學校 臺北市立第一女子高級中學
- 指導教師 陳正源、林晃巖
- 作者姓名 吴奕萱、郭笛萱

關鍵字 <u>LED(Light-emitting diode)、太陽能電池、</u> 光電轉換效率

作者簡介



我們是北一女中的吳奕萱、郭笛萱。夏天最棒的享受便是在午後到學校的花園曬 太陽,因此我們找了好朋友 LED 一起享受這個樂趣。沒想到 LED 竟然比我們還興奮, 在光的照射下熱情地激發出自由電子電洞對,產生電能。雖然過程中難免有"熱情過 頭"的時候(LED 燒壞、笛萱和奕萱烤焦),但是和 LED 及夥伴共度的美好時光,仍 是最棒的回憶。

自動發電發光二極體的光電性質探討

摘要

本研究藉由研究 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 吸收可見光的效率與內部等效電阻,藉以評估 LED 作為太陽能電 池的實用性。研究結果顯示 LED 在太陽能電池的電子電洞與等效電路模型中的相關 參數(填充因子,串聯電阻,分路電阻),均能用以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 lamps。

Study of the optoelectronic properties of Light-emitting diodes as solar cell

Abstract

Light-emitting diodes (LED) are effective electroluminescence devices. By reversed operation, they can also be used as photovoltaic devices. The optoelectronic properties of specific LEDs as light emitting as well as photovoltaic devices are studied in this paper. The function of self-powered LEDs is to convert sunlight photon energy into electric energy, and then use the electric energy to produce its light emission.

The absorption and emission spectra, and voltage current characteristics of LEDs are measured. From the spectra, we can optimize the best devices with high efficiency. From the voltage current characteristics, its high fill factor shows that LEDs have good potential to be used as solar cells. The estimation of series and shunt resistances in the equivalent circuit model suggest that impedance matching is needed when put into application.

Circuits of self-powered LED lamps are designed accordingly. By creating series-parallel connection of LEDs, increasing sunlight intensity with Fresnel lens, and storing electric energy in the power bank, the efficiency of LEDs as solar cells has been significantly improved. It is expected that LED can perform multi-functions as self-supplied lighting equipment, and serve as a valuable green-energy product.

壹、 研究動機

能源開發是當前社會與科技的重大議題,近年來,再生能源的發展中,太陽能電 池越來越受到重視。其中半導體太陽能電池與 LED 的結構皆是 p-n 型半導體接面所構 成。經查文獻 3 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,被稱為光伏效應(Photovoltaic effect)。換句話說 LED 具有光能與電能互相轉換的雙向功能,這引發我們想利用 LED 具有啟動電壓小、 低耗能的特色,結合 LED 本身的光電效應作為太陽能電池,設計出自給自足的 LED 燈具的構想。即 LED 於白畫時可將光能轉換成的電能,夜晚時再轉換為光能,如此 一物二用的創新光源,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:0發光光譜、吸收光譜、吸收光的電流電壓曲 線;0並測量由 LED 吸收可見光時的效率與內部等效電阻,藉以評估 LED 作為太陽 能電池的實用性。接著利用下列方法:0利用 Fresnel 透鏡聚光、0設計 LED 陣列的電 路、0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 lamps。

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**。、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_a 。
 - (三) 測量 LED 作為太陽能電池最大輸出功率 Pmax、內電阻值、電能自足率。
 - (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Rs與 分路電阻Rsh
 - (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、 LED 太陽能電池之應用及其儲電與發光驅動電路設計

(一) 测量一日中, LED 太陽能電池所能產生的總電能

- (二) 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。
- (三) 設計與製作 self-powered LED 模組的儲電與發光驅動電路。

(四) LED 模組應用

参、 研究設備及器材

一、 研究設備及器材



二、 實驗裝置

	實驗裝置	說明
第	(太陽光、麵包板)	說明:
一 代		將 LED 整齊插在麵包板上,置於陽光下。 優點: 太陽光照度強,產生電流大;使用麵包板便於置 換。 缺點: 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)	 說明: 在第二代的基礎上,將入射光由太陽光改為白熾燈泡。 優點: 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。 缺點: 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	(燈泡→氙燈)	說明:
Ξ	(麵包板→焊接電路板)	將白熾燈泡更換為照度較強的氙燈,並將 LED 牢
代	(架設於光凳上)	固地焊接在電路板上,並將所有器材架設於光凳上
		優點: 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 缺點: 換成氙燈後,光度分布不均匀,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:

 $E_{*,2} = hf = \frac{12400eV \cdot A}{1};$ 其中 $h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s; f$ 為頻率; λ 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λ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 $I = I_D \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right)^8$; 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 為逆向飽和電流(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⁸: $I = I_D \left(e^{\frac{qV}{nk_BT}} - 1 \right) - I_{ph}$,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。



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接面,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 的效率不及單純太陽能電池高,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, Voc):

在特定温度及照射光下,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,負載為零,太陽能電池的輸出電流,如圖五。

(三) 最大輸出功率(Pmax)

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¹⁰

$$\mathbf{I} = I_D \left(e^{\frac{qV}{nk_BT}} - 1 \right) - I_{ph}, \, 其 \neq I_D 為 逆 向 飽 和 電 流, n 為 理 想 因 子$$

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)

 $FF = P_{max}/(I_{sc} \times V_{oc})$ 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 接面的電流通道,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



實驗方法:

一、 測量與探討 LED 的電特性曲線:

(一)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。

(二)利用電壓電流 (I-V)曲線萃 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 為理想二極體的逆向飽和電流、 I_R 為非理想 二極體復合產生的飽和電流、 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。



二、 測量與探討 LED 作為太陽能電池的光學性質:

(一)測量 LED 的發光光譜、吸收光譜與能隙值

1. 测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。

(二) 測量 LED 半導體材料的能隙值 E_a

當入射光子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Inh為

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

上式中: $N(\lambda)$ 為波長 λ 的入射光子數量、 λ_0 稱為底限波長,是產生光電流

的最大波長,λ₀與半導體的能隙有關、λ_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 λ₀ 到λ_c 的入射光子數。如圖九所示,當濾光片可 以濾除波長低於λ_c的光,在可見光範圍內,N(λ)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

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

因此利用紅色(波長 614nm)、橘色(波長 563nm)、黄色(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Iph,再將此三電流值Iph與 所使用的濾光片波長作圖,找出電流為零時的波長值,即為底限波長 λ₀。 最後將 λ₀ 代入光子能量公式

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

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 $\lambda_0 = (612 \pm 56)nm$,代入公式可求出能隙 $(2.03 \pm 0.18)eV$ 。查詢文獻¹比較推測,本實驗所使用的 5mm 黃色 LED 半 導體材料可能為(AlGa)_xIn_{1-x}P 。



(三) 測量 LED 作為太陽能電池最大輸出功率、內電阻值與電能自足率

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。 接著,由實驗一的研究結果可知 LED 在不同電壓下的發光強度,取發光亮度 最高時的電壓,約為 2V 左右,乘上該電壓下所消耗的電流,即是 LED 發光 所消耗的功率,再由最大輸出功率除以 LED 發光所消耗的功率得到電能自足 率。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。

本實驗定義電能自足率為

$\eta = rac{LED所能產生的最大輸出功率}{LED發光所消耗的電能} imes 100\%$,

自足率代表要讓 LED 本身發光,自身所能供給電力的百分比的數值。此 數值相較於光電電轉換效率

$$e = rac{ ext{LED}$$
所能產生的最大輸出功率 $imes 100\%$,入射進 $ext{LED}$ 的光功率

更能符合本研究自動發電發光 LED 的構想,有較高的參考價值。



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) 测量不同光强度下,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}
 - 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。
 - 利用雨線偏振片旋轉 θ 角後,光強度會與cos² θ 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^o,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 作為太陽能電池產生電壓、電流的影響

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, 再置於氙燈和光凳上的 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) 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

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。用銲槍將 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

三、 探討 LED 同時施予順向偏壓和照光,對其 I-V curve 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。

(一) 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。

(二) 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。

四、 LED 太陽能電池之應用及其儲電與發光驅動電路設計

(一) 测量一日中, LED 太陽能電池所能產生的總電能

本實驗欲測量一日當中,LED所能產生的總電能。我們使用太陽光模擬器,如圖 十六,模擬一日中太陽的入射角和光強度隨時間的變化,來計算一日中從早上7:00 到下午17:00,LED所能產生的電能,如圖十七。



圖十六 太陽光模擬器 圖十七 太陽一日中角度變化示意圖 圖十八

圖十八 可調整角度的載具示意圖

1. 测量方法:

(1)製作可調整角度的載具

固定光源強度及位置,透過 LED 載具寬度與垂直高度的正切值,調整入射光 進入 LED 的角度,如圖十八。但是由於 LED 的環氧樹脂封裝過厚,且有聚光 的效果,會造成光線無法準確聚焦在 LED 的晶片上,所以產生的電流極低, 易受電表靈敏度影響而缺乏鑑別力,因此我們改以以下第二種方法來測量。

(2)整太陽光模擬器的光強度,模擬太陽在不同角度的入射光強度

測量時,使用光二極體校準片(Si photodiode, ceramic package photodiode with low dark current,型號 S1133),調整太陽光模擬器的光強度,使光強度與角度的餘弦值成正比。校準原理是假設校準片輸出的短路電流與光強度呈指數關係

换算,如圖十九所示。

2. 計算一日內所產生的總電能:

假設太陽一個小時在天空中移動 15 度,故將 7:00~17:00 的天空劃分成 20 個區塊,每一區塊 所對應的圓心角為 5~10 度。由入射角得到入射



圖十九 校準片電流與光強度之關係

光的相對光強度,將在各個角度中所測量出 LED 所能產生的最大輸出功率乘 上時間並加總,即可得到 LED 於一天中所能產生的總電能。計算方式如下:

總電能 $E = P(功率) \times t(時間)$

(二) 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

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. 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=220µF,2.5V,-40°~105℃)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 220μF 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。 (三) 設計與製作 self-powered LED 模組的儲電與發光驅動電路

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」得到 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。實驗「LED 太陽能電池最大輸出功率」的結果顯示,10mm 黃色 LED 在開路電壓Voc、短路電流Isc、最大輸出功率Pm、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,確認 LED 能在穩定光源下對電容進行 穩定充電後,改為選用 5V 的行動電源作為儲電系統。行動電源具有充電容量大、 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

19

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。



(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 皆問到此現象,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⁴,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

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI_D}{dV} \times e^{\frac{\beta(V - IR_S)}{n}} + I_D \times \left[\frac{d}{dV}e^{\frac{\beta(V - IR_S)}{n}}\right] = 0 + I_D e^{\frac{\beta(V - IR_S)}{n}} \times \frac{\beta\left(1 - R_S \times \frac{dI}{dV}\right)}{n} = I \times \frac{\beta}{n} \left(1 - R_S \times \frac{dI}{dV}\right)$$
$$\Rightarrow \left(1 + I\frac{\beta}{n}R_S\right)\frac{dI}{dV} = I \times \frac{\beta}{n} \quad \Rightarrow \left[I \times \frac{dV}{dI}\right] = R_S \times [I] + \frac{nkT}{q}$$

若將數據I 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⁵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IdV/dI 對 I 作圖如下



 圖二十一 5mm red LED 電流電壓擬合曲線圖 圖二十二 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~2.1V 稱為第 I 區,電壓V = 2.1V~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。



圖二十三 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 $\mathbf{R}_{s} = \boldsymbol{A} \boldsymbol{*} = (17.8 \pm 0.2) \Omega;$

理想因子 n = 截距× $\frac{q}{kT}$ = (0.048±0.001)V× $\frac{1.6\times10^{-19}C}{(1.38\times10^{-23}\frac{1}{K})\times(300K)}$ = 1.85±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 $R_s = 斜率 = (20.0 \pm 0.4)\Omega$;

理想因子 n = 截距×
$$\frac{q}{kT}$$
 = (0.021±0.008)V× $\frac{1.6\times10^{-19}C}{(1.38\times10^{-23}\frac{J}{K})\times(300K)}$ = 0.8±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 由自由電子電洞的復合產生(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 四。可得知復合(recombination)與產生(generation)效應發生於順向偏壓的範圍 約為 $V = 2V \sim 2.6V$ 。



圖二十四 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 $\left[I \times \frac{dV}{dI}\right] = R_s \times [I] + \frac{nkT}{q}$ 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

$$\frac{d}{dI} \left[\mathbf{R}_{\mathrm{s}} \times [I] + \frac{nkT}{q} \right] \cong \mathbf{R}_{\mathrm{s}}$$

左側對電流 I 微分:

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

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

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

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

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

接著再將串聯電阻 R_s 對順向偏壓 V 作圖而得圖二十五,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 Rs代回 I-V 曲線的線性化方程式

$$\left[I \times \frac{dV}{dI}\right] = \mathbf{R}_{s} \times \left[I\right] + \frac{nkT}{q}$$

則可得到理想因子n與順向偏壓V關係,接著作圖如圖二十六。從n-V 圖可觀察到,在順向偏壓V=2V~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~2.3V。換句話說, 在此順向偏壓範圍,自由電子電洞對復合(recombination)與產生(generation)效 應,佔電流值的比例較大。



二、 LED 作為太陽能電池的光學性質測量:



(一) LED 發光光譜和吸收光光譜

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(如圖二十九)。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。



圖二十九 紅色 LED 能階示意圖

 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 的吸收率為三者中最高,符合實際測量結果。



圖三十 太陽光和氙燈光譜

- 3. 本實驗使用氙燈光源,由氙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「測量LED 作為太陽能電池的最大輸出功 率Pm」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 λ_{max}會從 584nm 增加到 590nm,有紅移的現象。這是因為隨著電壓增加,造成溫度上升,因而使 LED 晶格間距變大,能隙變小。使光子躍遷能量變小。
- 5. 由 Varshni formula ($E_g = E_{g0}(T = 0K) \frac{\alpha T^2}{T+\beta}$,其中 α 與 β 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 λ_{max} 有紅移的現象,如圖三十一所示。若將光波長 λ_{max} 代入 $E_g =$



 $1240 eV \cdot nm / \lambda_{max}$,可計算出能隙 E_a 與順向偏壓 V 的關係,如圖三十二。

圖三十一 10mm 黃色 LED 波長偏移現象 圖三十二 10mm 黃色 LED 能隙與順向偏壓的關係

根據 Varshni formula $\mathbf{E}_{g} = \mathbf{E}_{g0}(\mathbf{T} = \mathbf{0}\mathbf{K}) - \frac{\alpha T^{2}}{\mathbf{T}+\beta}$,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 \mathbf{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:

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

本實驗所測量的 10mm 黃色 LED 的半導體材料應為 AlGaInP, 查詢文獻⁶ 得 AlGaInP 的 Varshni formula 常數 $\alpha = 0.577 \text{meV}/K^2 \cdot \beta = 372K$ 及 $E_{g0} = 2.207 eV$ 。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,如圖三十三。



圖三十三 10mm 黃色 LED 的溫度與順向偏壓的關係

利用濾光片(較 λ_c 長的波長通過),測量 LED 的光電流 I_{ph} ,再以 I_{ph} 對 λ_c 作圖, 可得 LED 半導體材料的底限波長 λ_0 。經公式 $E_g = (1240 eV \cdot nm)/\lambda_0$,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:

表一 LED 能隙值

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	$(2.04 \pm 0.53)eV$	

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 、內電阻值、電能自足率

1. 測量 LED 吸收氙燈光的電流 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 黄色 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} (µA)	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} (µW)	26.1 ± 0.1	16.7 ± 0.1	11.8 ± 0.1	155.4 ± 0.5
填充因子 FF (%) = $\frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$	81.3 ± 0.4	80.7 ± 0.6	83.6 ± 0.9	91.80 ± 0.08
串聯電阻 $R_s(\mathbf{k}\Omega) = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{rac{4}{454 \text{ K} rac{1}{4} \text{ K} rac{1}{4} rac{1}{2} ra$	4.3 ± 0.3	5.9 ± 0.1	7 ± 2	0.7 ± 0.1
並聯電阻 $R_{sh}(M\Omega) = rac{\Delta V}{\Delta I} = rac{1}{rac{4\Delta U}{rac{\Delta U}{2}} = rac{1}{rac{4\Delta U}{2} + rac{2}{2} rac{1}{2}}$	2.5 ± 0.3	2.7 ± 0.2	5 ± 1	0.80 ± 0.07
電能自足率= LED所能產生的最大输出功率 LED發光所消耗的電能	0.302%	0.063%	0.105%	1.09%

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. 利用偏振片测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θ,可調控入射 LED 的光強 度,紀錄不同偏光片的夾角θ時的電壓V與電流I。將相對光強度(J/J₀~cos²θ) 對開路電壓V_{oc}與短路電流I_{sc},如圖三十四與圖三十五所示。


(2) 利用數據擬合得到相對光強度(J/J₀~cos² θ)、開路電壓V_{oc}與短路電流I_{sc}的 關係式

由圖三十四的實驗結果可知: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。此外圖三十四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³中也提及LED 可作為光偵測器使用。另外,由圖三十五的實驗結果 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/J₀的關係式,如圖三十六:

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



圖三十六 5mm 黃色 LED 開路電壓Voc和相對光強度取對數log(J/J0)作圖

依據上述兩個數據圖表,可以推導出開路電壓Voc與短路電流Isc的數學關係式。 從文獻³得知:太陽能電池的等效電路如圖三十七(a)所示。



圖三十七 太陽能電池等效電路圖

依據柯希荷夫迴路原則,可得

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

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

若 \mathbf{R}_{s} = 0, \mathbf{R}_{sh} = ∞, 等效電路如圖三十七(b)所示。依據柯希荷夫節點原則, 可得到輸出電流的值為:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{ph} - \mathbf{I}_d = \mathbf{I}_{ph} - \mathbf{I}_D (\mathbf{e}^{\beta V} - \mathbf{1})$$

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,

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

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

若數據Voc將對In(Isc)作圖可得圖三十八,則可得到:

1.53 斜率 $(1/\beta) = (0.075 \pm 0.002)$ volts $V_{oc} = (0.075 \pm 0.002) \ln I_{sc} + (1.94 \pm 0.01) volts$ 1.52 $R^2 = 0.9949$ 1.51 1.50 $\Rightarrow nkT/q = (0.075 \pm 0.002)volts$ ŝ 1.49 1.48 假設在氙燈照射下 LED 的接面溫 1.47 1.46 度為310K 1.45 -6.40 -6.00 -5.80 -6.20 -5.60 In(Isc)

則 LED 照光時的理想因子為



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

 $= 2.81 \pm 0.07$

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

因此逆向飽和電流為

$$\Rightarrow I_D = e^{-\frac{1.94\pm0.01}{0.075\pm0.002}} A = (5.84\pm0.03) \times 10^{-12} A$$

2. 测量在不同照度下, 5mm 黃色 LED 的 I-V 圖的變化



圖三十九 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} (µA)	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} (µW)	6.4 ± 0.1	16.7 ± 0.1	$\textbf{27.8} \pm \textbf{0.1}$	38.8 ± 0.1
串聯電阻R _s (kΩ)	11.8 ± 0.3	5.9 ± 0.1	3.3 ± 0.2	2.9 ± 0.1
分路電阻R _{sh} (MΩ)	4.6 ± 1.3	2.4 ± 0.2	1.3 ± 0.1	1.1 ± 0.1

表三 不同照度下 5mm 黄色 LED 的 I-V 圖的各項物理參數

在不同照度下,测量作為太陽能電池的 LED 的 I-V 曲線,如圖三十九所 示。依據圖三十九 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的**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Pmax對相對光強度L作圖,如圖四十。由圖四十可知最大功率Pmax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, 如圖四十一所示。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 ≅ R₀L^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。從圖四十一中的數據擬合得知:

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

因此從圖四十一中的數據,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 強大越大**串聯電阻**R_s、**分路電阻**R_{sh}同時變小就有好有壞。但從圖四十一的數 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。



(五)利用透鏡聚光對 LED 太陽能電池產生電壓、電流之影響

 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

表四 LED 聚焦前後電壓、電流之變化

電壓變化	5mm 紅色 LED	5mm 黃色 LED	5mm 綠色 LED	10mm 黄色 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 黄色 LED	5mm 綠色 LED	10mm 黃色 LED
聚光前	0.7μΑ	0.4µA	0.2μΑ	6.3µА
聚光後	43.1µA	25.8μΑ	12.4µA	330µA

- 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。
- 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 太陽能電池產生電壓、電流的影響」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

在光源均匀的理想情形下(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 圖四十二,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。

光源不均匀的成因如:光源和待測平面距離變化、光源與待測平面非 垂直、燈泡本身不均匀、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



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⁸:

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

上式中的光電流Iph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,如圖四十七所示。



LED 吸收收產生的光電流*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_p*(*e^{vy}*-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 如圖四十八 中較低的曲線。



但是本實驗的結果並非如此,從圖四十七,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,實驗結果如圖四十九 所示。



圖四十九 LED 照光與無照光的 △I-V curve

上述現象,經查詢文獻⁷,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*Rs*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:

串聯電阻 $\mathbf{R}_{s} = \frac{1}{m} + \left[\frac{d}{dv} \left(\frac{1}{m} \right) \right] \times \frac{1}{m}; 理想因子\mathbf{n} = \frac{q}{kT} \left\{ \left[I \times \frac{1}{m} \right] - \mathbf{R}_{s} \times \left[I \right] \right\}; 可得到圖$ 五十、圖五十一。與無照光相比,照光時的 LED 有**更小**的串聯電阻 \mathbf{R}_{s} 、**更大** 的理想因子**n** 。這代表輻射復合(Radiative recombination)的效應更為主導此順 向偏壓下的 LED 電流值。



(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

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 150sec~200sec 才能得到一穩定值。因 此,接下來要探討這個有趣的現象。 1. 改變光強度時,電流與時間的關係

如圖五十二 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 100 秒後趨於平緩,電流變化微小。如圖五十三所示,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 120 秒後 趨於平緩,電流的變化微小。



若以下式擬合上述照光後電流逐漸衰減的曲線:

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

式中,t為時間、I為測得的電流值、τ為時間常數、I₀為初始電流、I_s為穩定 電流。兩邊取自然對數,則可得到

$$\ln(\mathbf{I} - \mathbf{I}_{s}) = \frac{-1}{\tau} \times \mathbf{t} + \ln(\mathbf{I}_{0})$$

經數據擬合可得到斜率為 $\frac{-1}{\tau}$ = -(8.29±0.06)×10⁻³sec⁻¹;截距為ln(I₀) = 2.385±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¹得知, LED 的 p-n 接面的空乏區中,空間電荷所造成的內建電場,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。

電容充放電的時間常數 $\tau = RC$ 。由前述測量 LED 內部電阻值的實驗可得到 5mm 黃色 LED 的 $R = (5.9 \pm 0.1)k\Omega$, LED 的等效電容值:

 $C = \frac{\tau}{R} = \frac{1/(8.29 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}}{(5.9 \pm 0.1) \text{k}\Omega} = (0.0204 \pm 0.0004) F \ (i @ lat the second s$

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. 测量未照光時, LED 的寄生電容值

將 LED 的等效電路視為一等效電容與等效電阻的並聯,如圖五十四 所示。 設輸入頻率為 f, 電壓為 V。的交流訊號, 依據歐姆定律

$$\frac{V_{LED}}{V_S} = \frac{Z_{(LED \mbox{\sc sx}\mbox{\sc math t},\mbox{\sc math t})}}{R+Z} = \frac{1}{1+R/Z}$$

上式中, $\frac{1}{7} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{X_1} = \frac{1}{R'} + j\omega C'$;因此 LED 的端電壓 V_{LED} 與輸入頻率f的關係為:

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

令 $y \equiv |V_s/V_{LED}|^2$, $x \equiv f^2$, 擬合曲線 $y = 0.0233e^{(6 \times 10^{-11})x}$, 如圖五十五 所示。擬合曲線斜率。LED 在直流模式下, 頻率 f = 0 Hz, 因此 C' = 0.38nF。



3. 测量照光時, 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

伯上日伯赫名应	相對光強度	電容值(pF)			雨穴 亚屿は(nE)	丁准旦
俪旅斤俪臀用及		第一次测量	第二次测量	第三次测量	電谷十均值(pr)	个牛里
90	0	3	3	2	сс	±0.3
80	0.17	3	3	2	2.7	±0.3
70	0.34	5	8	4	6	<u>+</u> 1
60	0.50	8	10	6	8	<u>±1</u>
50	0.64	13	12	10	12.0	<u>±0.9</u>
40	0.77	49	49	13	37	±12
30	0.87	50	49	16	38	<u>+</u> 11
10	0.98	50	49	49	49.0	±0.3
0	1	50	50	50	50	<u>+</u> 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。

若將 LED 等效電容值與照光相對光強度作圖如下圖五十六,可發現有指 數上升的關係。因此假設等效電容值 C 與照光相對光強度 L 的關係為

 $C \equiv k_1 \times e^{k_2 L} \Rightarrow \ln C = k_2 L + \ln k_1$

其中k₁、k₂為常數,再將此式線性化,並擬合如下圖五十七,擬合的相關 係數相當高,因此上式等效電容值C與照光相對光強度是具有高度相關性的。



(一) 测量一日中,LED 太陽能電池所能產生的總電能

在實驗「LED 的發光頻譜與吸光頻譜」的結果中,得知黃色 LED 的吸光頻 譜最接近太陽光的頻譜,所以最適合做為太陽能電池使用。所以在此實驗中, 選擇 5mm 和 10mm 兩種大小的黃色 LED 進行實驗,得到在不同入射角θ下光入 射強度相對應的最大輸出功率,再乘上時間並加總即為一天中所能產生的總電 能。

入射角θ(°)	最大輸出功率 P(μW)	時間 t(s)	電能E = P×t
0	13.4	2400s	0.0322
10	12.5	4800s	0.0600
20	11.5	4800s	0.0555
30	11.4	4800s	0.0549
40	10.2	3600s	0.0367
45	12.0	2400s	0.0290
50	11.3	2400s	0.0272
55	10.3	2400s	0.0247
60	9.2	2400s	0.0223
65	9.0	2400s	0.0217
70	9.4	2400s	0.0226
75	9.8	1200s	0.0118

1. 5mm 黃色 LED

總電能 E = 0.399 J/day

2. 10mm 黃色 LED

表六 5mm, 10mm 黃色 LED 一日中產生電能之計算

入射角θ(°)	最大輸出功率 P(µW)	時間 t(s)	電能E = P×t
0	19.2	2400s	0.0460
10	22.4	4800s	0.0108

20	20.8	4800s	0.100
30	18.3	4800s	0.0879
40	16.8	3600s	0.0605
45	15.6	2400s	0.0376
50	14.8	2400s	0.0357
55	13.2	2400s	0.0319
60	15.1	2400s	0.0364
65	12.6	2400s	0.0303
70	10.1	2400s	0.0244
75	5.6	1200s	0.00678

總電能 E = 0.606 J/day

實驗結果顯示,5mm 黃色 LED 一天中能產生的總電能為 0.399 J, 而 10mm 黃色 LED 一天中所能產生的總電能為 0.606J , 此數據為未加透鏡聚焦的結果, 如根據實驗「利用透鏡聚光對 LED 太陽能電池產生電壓、電流之影響」的結果, 可得到加入透鏡,電壓放大 1.1 倍,電流則能放大 60 倍,所以估計加入透鏡後 LED 一天中所能產生的總電能約為 26J (5mm 黃色 LED)、40J (10mm 黃色 LED), 將能有效提升其應用價值。

(二) 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

本實驗欲測試 LED 對儲電裝置充電的特性。實驗方式為將 LED 與電容連接,改變 LED 串聯或並聯的個數,計錄電容隨時間的電壓變化。充電時間與 LED 單位時間可產生的電能大小(即電流)相關。

實驗結果顯示,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,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),但是若進行串聯對電容充電,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。



圆五十八 LLD 中哪电谷元电时间和电座的删你 圆五十九 LLD 亚哪电谷元电时间和电座的删

(三) 設計與製作 Self-powered LED 模組的儲電與發光驅動電路

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,選擇了電壓為 5V 的行動電源作為儲存 LED 產生電能的裝置。

充電時,四顆 LED (每顆能產生 1.6V 的電壓) 串聯(即 1.6V × 4=6.4V),

以達到對行動電源充電的最低電壓(5V);放電時,使 LED 以兩顆串聯(單顆 LED 啟動電壓 1.7V,兩顆串連約需 3.4V 驅動)為單位多組並聯。本模組可成功 由行動電源供應的電能激發點亮。充放電間線路的切換使用繼電器,啟動繼電器 的電能亦來自行動電源,故此系統達到使 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。



圖六十 LED 發電發光系統電路示意圖



本模組待改進之處:

●繼電器耗電量過高(本實驗所使用的繼電器為 2A, 24VDC)。若以電晶體取代
 其作為電流開闢的功能,不僅可望減少電能的使用,更可以提升開闢的控制速度。
 ②對行動電源充電時,尚未考量阻抗匹配。若配合光敏電阻隨光強度改變的電阻

④對行動電源充電時,尚禾考重阻抗匹配。若配合光敏電阻隨光强度改變的電阻 值應可設計出最大效能的功率輸出模組。 LED 為良好的發光元件,但要由本身產生的電能供應長時間持續發光所需的電能, 目前仍無法達成。若以閃爍為例,如置於太陽下一天,可產生 0.606 J,而點亮此 LED 所需要的功率為40mW。將此電能應用於腳踏車上的閃光警示燈,假設一次 閃光時間為 1/1000s,則閃一次光所消耗的電能為 40mW × (1/1000)s = 40µJ 。 LED 於一天中所產生的電能將足以供應閃光燈閃1.5 × 10⁴次,如每次閃光週期為 1s,則閃光燈將可連續使用 4.2 小時。

柒、 結論

本研究藉由研究 LED 的發光與吸光的光學性質,找出適合同時作為 LED 燈與太 陽能電池的 LED;並測量 LED 吸收光的效率與內部等效電阻,藉以評估 LED 作為太 陽能電池的實用性。研究結果顯示以 LED 利用下列方法: ①加裝 Fresnel 透鏡聚光、0 設計 LED 陣列的電路、 ◎設計電能輸出入的轉換電路等方法,可製作出在白天將光能 轉成電能,在晚上將電能轉換成光能,而不需要另外輸入電能的 self-powered LED lamp。 對於研究中的物理現象,我們也利用 LED 的電子電洞與等效電路模型進行解釋。以 下為本研究的研究結論:

一、 測量與探討 LED 的電特性曲線

- (一)不同顏色 LED 因材料(能階)與結構差異,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。因此設計 LED 發光模組時,達成最佳發光條件的順向偏壓 有所限制。

二、 測量與探討 LED 作為太陽能電池的光學性質

(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, 其值可達攝氏數十到上百度,因此如果要精準控制 LED 的發光頻譜,溫度控 制相當重要。
- (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可能是由磷化鋁鎵銦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如表二所示,如果要選擇輸出功率較大的 LED 太陽能電池,應該選擇 10 mm 黃色 LED。

LED 的種類	5mm 紅色 LED	5mm 黄色 LED	5mm 綠色 LED	10mm 黄色 LED
開路電壓 V _{oc} (V)	1.401	1.530	1.625	1.673
短路電流 I _{sc} (µA)	22.9	13.5	8.7	101.2
在最大功率時外接負載 $R_L(\mathrm{k}\Omega)$	55	175	300	13000
最大功率 P _{max} (µW)	26.1 ± 0.1	16.7 ± 0.1	11.8 ± 0.1	155.4 ± 0.5
填充因子 FF (%) = $\frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$	81.3 ± 0.4	80.7 ± 0.6	83.6 ± 0.9	91.80 ± 0.08
串聯電阻 $R_{s}(k\Omega) = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{rac{445}{456} rac{4}{4} rac{4}{4} rac{4}{4} rac{4}{4} rac{4}{4} rac{1}{4} rac{1}{4} rac{1}{4}$	4.3 ± 0.3	5.9 ± 0.1	7 ± 2	0.7 ± 0.1
並聯電阻 $R_{sh}(M\Omega) = rac{\Delta V}{\Delta I} = rac{1}{rak{4}rak{\omega}{4}rac{\omega}{4}rak{\omega}{4}rak{{2}rak{\omega}{4}rak{\omega}{4}rak{{2}r{k}{\omega}{4}rak{{2}r{k}{\omega}{4}rak{{2}r{k}{\omega}{4}rak{{k}{2}rak{{k}{2}r{k}{\omega}{4}rak{{2}r{k}{\omega}{4}r{k}{\omega}{4}r{k}{2}r{k}{{k}{\omega}{2}r{k}{2}r{k}{2}r{k}{\omega}{2}r{k}{2}r{k}{{k}{2}r{k}{k}{2}r{k}{k}{2}r{k}{2}r{{k}{2}r{k}{{k}{k}{{k}{2}r{k}{{k$	2.5 ± 0.3	2.7 ± 0.2	5 ± 1	0.80 ± 0.07
電能自足率= $\frac{\text{LED所能產生的最大輸出功率}}{\text{LED發光所演藝的電點}} \times 100\%$	0.302%	0.063%	0.105%	1.09%

表二 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(例如: 加入透鏡聚光),提升電流的輸出值。
- (六)一般而言,LED 串聯電壓會上升,並聯電流會上升,因此可以設計串並聯的 LED 陣列以提升輸出功率。但在進行 LED 串並聯實驗時發現,並非所有實驗 結果都呈現隨著串並聯顆數上升,電壓或電流會有持續上升的情形,推測是因

為光源不均匀,則照度特別低的 LED 會使整個電路的電壓或電流下降。故若 在非平行光源時使用,需留意光源的均匀,以達較佳的效果。

三、 探討 LED 同時施予順向偏壓和照光,對其 I-V curve 的影響

- (一)在低於啟動電壓前,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。但在略大於啟動電壓的某範圍順向偏壓時,光電流的方向卻與順向偏壓相同。對於此現象的物理機制我們試圖做初步的解釋,詳細原因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。對於此延遲效應的原因我們 試圖做初步的解釋,可能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,值得探討。

四、 LED 太陽能電池之應用及其儲電與發光驅動電路設計

- (一) 測量 LED 一天中所能產生的總電能,得到 5mm 黃色 LED 可產生 0.399 J,10mm
 黃色 LED 可產生 0.606 J。
- (二) LED 對電容充電,透過串聯與並聯的結合,可提升完成充電的飽和電壓與加快充電速度。
- (三) 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 LED 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 照光強度變化時,電流的延遲效應的物理機制為何。

捌、 參考資料

- [1] 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
- [2] 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。
- [3] O'Toole, Martina; Diamond, Dermot(2008). "Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices." Sensors 8, no. 4: 2453-2479.
- [4] 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。
- [5] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, R. Uzdin,(2001) "Extraction of Schottky Parameters With a Bias Dependent Barrier Height", Solid-State Electronics, 45, pp.143-148.
- [6] 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.
- [7] H.Haug, S.Koch(2004)"Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors, World Scientific.
- [8] 蔡進譯(2005)。超高效率太陽電池。物理雙月刊,二十七卷五期,706。

I. Introduction

Nowadays, the development of renewable energy and related devices has become increasingly important. Under this trend, solar-powered street lighting system, which includes solar panel, i.e., a photovoltaic device, and light-emitting diode (LED), i.e., an effective light source, can be frequently seen on streets. However, is it possible that the two devices can be replaced by using a single device that can perform multifunction as a light source and a photovoltaic device?

The p-n junction structure of LEDs reveals the answer to this question. When LEDs operate as a light source, the electron-hole pairs recombine in the depletion region and emit light. On the other hand, when the diode receives light, free electrons are excited from the valence band to the conduction band and holes are generated in the valance band. Then, the electron-hole pairs can be pulled out of the p-n junction to create an electric current. Therefore, LEDs can be reversely used as a photovoltaic device, such as a solar cell or a light detector.

In this project, we investigate the photoelectric effect of LEDs, identify the critical parameters, and process a customized design for an LED array to be used as a photovoltaic device.

The feasibility of collecting solar energy by using LEDs has been illustrated by evaluating the critical parameters of a solar cell. Based on our experimental results, LEDs have reasonable output power of 155 μ W, fill factor of 90%, and self-supplied energy ratio of 1%. It is estimated that one LED can generate 0.6 J under sunlight per day.

59

Optical and electric measurements have been conducted to enhance the efficiency of LED solar cells: Sets of compound lens are designed to concentrate the light beam onto the LED chips; parallel and series connection of LEDs are designed for increasing the photovoltaic conversion efficiency; circuit between LED solar cells and external energy storage system is designed to optimize the capability; and then the stored energy can be shown to supply the LEDs for lighting.

The concept of "self-powered" is innovative in the field of green energy. By following our customized design process, one can use the LEDs as a multifunctional device, which serves as a solar energy collector in the daytime and a light source at night.

II. Purpose

- 1. Test the feasibility of using LEDs as solar cells
 - A. I-V curve of LEDs under both the forward bias and light absorption

2. Discuss the electric characteristics of LEDs as solar cells

- A. Absorption spectrum of LEDs
- B. I-V curve of LEDs as solar cells, and related parameters
- 3. Discuss the optical characteristics of LEDs as solar cells
 - A. I-V curve of LEDs under different luminous intensity
 - B. Derive the series and shunt resistance from the I-V curve under light absorption

4. Customize a model design for LEDs as solar cells and a light source

- A. Efficiency enhancement
- B. Parallel-serial connections of LED solar cells and voltage-time relation when LEDs charge the capacitor
- C. Design a self-powered LED lamp which includes multiple functions of storing electricity and using energy
- D. Optimize the application of self-powered LED lamp

III.Equipment

1. Equipment



2. Experiment setup

	Experiment setup	Description
I.	First generation: sunlight, breadboard	 LEDs are fixed on a breadboard and tested under sunlight. Advantage : The luminous intensity of sunlight is high Connection of LEDs can be easily changed on a breadboard Disadvantage : The condition of sunlight is affected by weather condition and is thus unstable
II.	Second generation: sunlight→artificial light source	 Incandescent lamp replaces sunlight as the light source. Advantage : (1) Results are more accurate and not influenced by weather conditions Disadvantage : (1) The luminous intensity of incandescent lamp is lower than sunlight, so the current generated by LEDs is smaller. Therefore, the precision of ammeter may influence the accuracy of the results.
III.	Third generation: Incandescent lamp \rightarrow Xenon short arc lamp, breadboard \rightarrow circuit board, fixed on an optical bench	 Incandescent lamp is replaced by a Xenon short arc lamp, LEDs are soldered on the board, and all the equipment is fixed on an optical bench. Advantage : By soldering LEDs on the circuit board, the angle of incident light can be controlled The light intensity and spectrum of Xenon short arc lamp are similar to that of sunlight With an optical bench, the positions of LEDs and other equipment can be adjusted more accurately Disadvantage : The non-uniform luminous distribution of Xenon short arc lamp causes each LED to generate different amounts of current.

IV. Procedures



V. Results and Discussion

1. Feasibility of using LEDs as solar cells

The original design of LEDs is to be a light source. In this experiment, I-V curves of LEDs with and without light absorption are measured, and it is found that when a forward-biased LED is put under another light source (e.g. sun), its current changes.

In Fig.1, the red curve shows the electric current and voltage of an LED under forward bias, the normal way of operation, while the blue curve is the I-V curve of an LED with an extra light absorption. Then, subtract dark current from lit current and we can observe the effect of light absorption by considering the difference of current: (Fig. 2)

$\Delta I = (lit current) - (dark current)$ (1)

Interestingly, ΔI varies with the forward voltage. Take Fig.2 for example: at the first stage, where the forward voltage is 0~1.7 V, ΔI approaches zero; at the second stage (1.7~2.6V), ΔI is about 1~2 mA; and at the third stage, when the forward voltage is above 1.7V, ΔI becomes negative.



The curves of other LED samples also show similar effects. (Fig.3)



Fig.3 AI vs. Forward bias (with/without light absorption) of yellow, green, red LEDs

According to the equivalent circuit model of solar cells, ⁸

$$\mathbf{I} = I_D \left(e^{\frac{qV}{nk_BT}} - \mathbf{1} \right) - I_{ph}$$
⁽²⁾

Where I_D : reverse saturation current, I_{ph} : photocurrent, n: diode ideality factor, q: elementary charge, k_B : Boltzmann's constant, and T: absolute temperature.

The forward current $I_D\left(e^{\frac{qV}{nk_BT}}-1\right)$ flows in to the positive electrode, while the photoelectric current I_{ph} flows out from the positive electrode (p-type) due to the built-in electric field of p-n junction. These two currents flow to different directions, so it is reasonable that the LED with an extra light absorption will have a lower current, as that in stage three.

So, what happens in the second stage? It may be explained that light absorption of optoelectronic semiconductor bulk is enhanced under forward bias. In addition, the quantum well is skewed by the application of an electric field. The field pushes the electrons and holes to the opposite walls of the potential well, thereby altering the overlap of carrier wave functions.⁷

As shown in Fig. 2, the range of forward bias at the second stage may be the depth of quantum wells, which varies with the color of LEDs, and is also corresponding to where they emit brightest. Analyze stage two with series resistance R_s and ideality factor **n**. From the current equation for non-ideal diode, R_s and **n** can be described as:⁵

$$I = I_{D} e^{\frac{q(V-IR_{S})}{nkT}} = I_{D} e^{\frac{\beta(V-IR_{S})}{n}}$$

$$\Rightarrow \mathbf{R}_{S} = \frac{1}{\frac{dI}{dV}} + \left[\frac{d}{dV}\left(\frac{1}{\frac{dI}{dV}}\right)\right] \times \frac{1}{\frac{dI}{dV}} \quad , \qquad \mathbf{n} = \frac{q}{kT} \left\{ \left[I \times \frac{1}{\frac{dI}{dV}}\right] - \mathbf{R}_{S} \times [I] \right\}$$
(3)



 $\mathbf{R_{s}}$ -V and \mathbf{n} -V are shown in Fig.4 and Fig. 5. Under this range of forward bias, LEDs with light absorption has lower series resistance, which allows more electric current to pass through. However, the ideality factor is rather high, which suggests that complicated radiative recombination dominates the photocurrent of LEDs under forward bias.

From this experiment, the feasibility of using LEDs as solar cells has been proved. Also, it is possible that applying forward bias enhances light absorption of p-n junction.

2. Electric characteristics of LEDs as solar cells

A. Absorption spectra of LEDs and luminescent spectra of light source

(1) Method:

Absorption spectra of LEDs are measured by calculating the absorption efficiency of LEDs under incident lights of different wavelength ranges.
Luminescent spectra of natural light source (e.g. sunlight) and artificial light source (e.g. Xenon lamp) are measured by using spectrometer and free software tracker and drawn as in Fig. 6.





Fig.6 Absorption spectra of LEDs / luminescent spectra of sunlight and xenon lamp

Absorption spectra of LEDs overlap with the luminescent spectra of sunlight and Xenon lamp, which suggests that they are capable of collecting solar energy.

B. I-V curve, fill factor, max. output power, and self-supplied energy ratio

These are critical parameters of solar cells. Maximal output power $(\mathbf{P_{max}})$ shows their photoelectric conversion efficiency; the value of through and leak current is related to the series resistance R_s and shunt resistance R_{sh} ; fill factor (FF) is defined as dividing $\mathbf{P_{max}}$ by the product of open circuit voltage ($\mathbf{V_{oc}}$) and short circuit current

(I_{sc}) (i.e.
$$FF(\%) = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \times 100\%$$
).

(1) Method:







a. As shown in Fig. 7, set LED solar cells under the illumination of Xenon lamp, control the voltage of the circuit with variable resistor (as shown in Fig. 8), and measure the corresponding electric current generated by an LED. Plot the data of voltage and current, and get the I-V curve of LED solar cells.

The largest rectangle area under the I-V curve is the maximal output power; the shunt resistance R_{sh} is calculated by the slope of I-V curve at the condition of short circuit; the series resistance R_s is calculated by the slope of I-V curve at the condition of open circuit.

b. Self-supplied energy ratio is defined as:

$$\eta = \frac{\text{The power generated by an LED}}{\text{The power consumed by an LED when it emits light}} \times 100\%$$
(4)

This shows the percentage of electric power supplied by LED itself when it emits light.

(2) Results:

a. I-V curves of LED solar cells



Fig.9 I-V curves of different kinds of LEDs

b. Calculation of P_{max}, FF, R_s, R_{sh}, and self-supplied energy ratio

Different kinds of LEDs	5mm red LED	5mm yellow LED	5mm green LED	10mm yellow LED
Open circuit voltage $V_{oc}(V)$	1.401	1.530	1.625	1.673
Short circuit current $I_{sc}(\mu A)$	22.9	13.5	8.7	101.2
Max output power $P_{max}(\mu W)$	26.1 ± 0.1	16.7 ± 0.1	11.8 ± 0.1	155.4 ± 0.5
Fill factor FF (%)	81.3 ± 0.4	80.7 ± 0.6	83.6 ± 0.9	91.80 ± 0.08
Series resistance $R_s(k\Omega)$	4.3 ± 0.3	5.9 ± 0.1	7 ± 2	0.7 ± 0.1
Shunt resistance $R_{sh}(M\Omega)$	2.5 ± 0.3	2.7 ± 0.2	5 ± 1	0.80 ± 0.07
Self – supplied energy ratio	0.302%	0.063%	0.105%	1.09%

Table1. Critical parameters of LEDs

Six samples of LEDs are tested (5mm,10mm/ red, yellow, green). From Fig. 9 and listed in Table 1, their open circuit voltage V_{oc} are around 1.401~1.673 V, short circuit current I_{sc} vary from 8.7 to 101.2 μ A, and fill factors are as high as 80.7~91.8%.

10 mm yellow LED samples have the highest maximal output power P_{max} of 155.4±0.5 µW, and self-supplied energy ratio of 1.09%.

3. Optical characteristics of LEDs as solar cells

A. Method:

As shown in Fig. 10, set two polarizer plates between the LED solar cell and light source to control the intensity of incident light, and measure the corresponding I-V curves of LEDs. The intensity of incident light is controlled by the angle θ between the two linear polarizer plates. The light intensity is proportional to $\cos^2 \theta$.



Fig.10 Measurement of I-V curves under different light intensity by adjusting the angle between the two polarizer plates

B. Results:



(1) Photocurrent

As light intensity increases, the photocurrent increases proportionally. This is because the number of free electron-hole pairs excited by light at the p-n junction is associated with the number of incident photons.

From the fitting of Fig.11:

$$\mathbf{I}_{\rm ph} = [(2.40 \pm 0.07)(J/J_0) - (0.2 \pm 0.1)]\mu A$$
(5)

The intensity of incident light can be estimated from the short circuit current of an LED, so LEDs can be used as light detectors3.

(2) Open circuit voltage

As light intensity increases, the open circuit voltage comes to saturation as shown in Fig. 12, and it is related to the band gap of the material. Take the logarithm of relative light intensity, and match it with the corresponding voltage, then the relation between V_{oc} and J/J_0 is as shown in Fig.13:

$$V_{oc} = [(0.098 \pm 0.002) \log(J/J_0) + (1.519 \pm 0.001)] \text{ volts}$$
(6)



Fig.13 Logarithm of relative light intensity vs. $V_{\rm oc}~$ of 5mm yellow LED

(3) I_{sc} and V_{oc}

The equivalent circuit of a solar cell is as shown in Fig. 14. 3



Fig.14 Equivalent circuit of LEDs as solar cells

According to Kirchhoff's loop rule:

$$-\mathbf{I}\mathbf{R}_{s} - \mathbf{V} + \left(\mathbf{I}_{ph} - \mathbf{I}_{d} - \mathbf{I}\right)\mathbf{R}_{sh} = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{I}\left(\mathbf{1} + \frac{\mathbf{R}_{s}}{\mathbf{R}_{sh}}\right) = \mathbf{I}_{ph} - \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{R}_{sh}} - \mathbf{I}_{d} \qquad (7)$$

Where

$$I_d = I_D \times e^{\frac{qV}{kT}} = I_D \times e^{\beta V}, \text{ and } \beta \equiv \frac{q}{nkT} \cong \frac{1.6 \times 10^{-19} C}{n \times (1.38 \times 10^{-23} J/K) \times 400 K} = \frac{29}{n} \frac{1}{volts}$$

If $\mathbf{R}_s = \mathbf{0}$, $\mathbf{R}_{sh} \to \infty$, the equivalent circuit can be simplified as shown in Fig.15.



Fig.15 Simplified equivalent circuit of LEDs as solar cells

Then, according to Kirchhoff's junction rule (or nodal rule), the outgoing current is

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{ph} - \mathbf{I}_d = \mathbf{I}_{ph} - \mathbf{I}_D \left(\mathbf{e}^{\beta \mathbf{V}} - \mathbf{1} \right)$$
(8)

For short circuit (V=0),

$$\Rightarrow I_{sc} = I_{ph} \tag{9}$$

For open circuit (I=0),

$$I_{ph} - I_{D} (e^{\beta V_{oc}} - 1) = 0 \Rightarrow I_{sc} - I_{D} (e^{\beta V_{oc}} - 1) = 0$$
(10)

$$\Rightarrow \mathbf{V}_{\rm oc} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\mathbf{I}_{\rm sc}}{\mathbf{I}_{\rm D}} + \mathbf{1} \right) = \frac{1}{\beta} \ln (\mathbf{I}_{\rm sc} + \mathbf{I}_{\rm D}) - \frac{\ln(\mathbf{I}_{\rm D})}{\beta} \cong \frac{1}{\beta} \ln(\mathbf{I}_{\rm sc}) - \frac{\ln(\mathbf{I}_{\rm D})}{\beta}$$
(11)

Then, the value of open circuit voltage V_{oc} and photo current I_{ph} will be in a logarithm equation, as shown in Fig.16.



(4) Max output power



Max output power P_{max} of LED solar cells increases with relative light intensity L, and under the equivalent light intensity of sunlight, P_{max} has been proved to be proportional to L. (Fig.18)

(5) Shunt and series resistance



Fig.19 Log(Rs) / Log(Rsh) vs. Log(L)

Plot (Log L, Log R_s) and (Log L, Log R_{sh}), as shown in Fig.19. As the correlation coefficient R^2 is close to 1, it is possible that the relation between L and R_s or R_{sh} is

 $\mathbf{R} \cong R_0 L^m$

$$\rightarrow \log R = \log R_0 + m \times \log L \tag{12}$$

Where the slope of $R_s(\mathbf{m}) \cong -(0.88 \pm 0.06)$ and slope of $R_{sh}(\mathbf{m}) \cong -(0.89 \pm 0.06)$.

As light intensity of incident light increases, both the series resistance R_s and shunt resistance R_{sh} decrease. Lower series resistance means that the through current will be larger. However, lower shunt resistance suggests that there will be a larger leakage current. Therefore, finding balance between these

parameters is important.

4. Customer model design



(1) Lens

From the discussion on "**optical characteristics of LEDs as solar cells**", we know that as light intensity increases, the photocurrent increases proportionally. Therefore, lenses are added to the LED solar cells to perform light concentration on LED arrays.

From Table 2, the results show that when the voltage is above 1.4 V, the effect of light concentration is not significant, whereas the increase in current supports that adding lens can be an enhancement of its efficiency.

Table2. Voltage and current of LEDs with/without light concentration

Voltage	5mm red LED	5mm yellow LED	5mm green LED	10mm yellow LED
Without light concentration	1.26 V	1.41 V	1.54 V	1.66 V
With light concentration	1.49 V	1.58 V	1.70 V	1.77 V

Current	5mm red LED	5mm yellow LED	5mm green LED	10mm yellow LED
Without light concentration	0.7µA	0.4µA	0.2μΑ	6.3µА
With light concentration	43.1µA	25.8μΑ	12.4µA	330µА

(2) Compound lens

In addition, ensuring that each LED receives similar amount of solar energy is important, as the output current of the model will be the value of the lowest current passing through LEDs. This means that an LED with lower light absorption will affect the performance of the whole array.

Thus, an afocal system of compound lens is designed as shown in Fig.20 to increase the intensity of incident light, and to ensure that light intensity is about the same on every unit area. A collimated beam of light with large cross section passing through the convex and concave lens becomes a collimated beam with small cross section. Then, this light beam is focused on the chip of LEDs.



Fig.20 Design of compound lens

B. Electric enhancement

Parallel and series connection of LEDs are tested for increasing the photovoltaic conversion efficiency, as shown in Fig.21~24. Then, these sets of LEDs are used to charge capacitors.



Fig.23 Number of LEDs in parallel vs. voltage

Fig.24 Number of LEDs in parallel vs. current

C. Charging capacitors with LED solar cells

(1) Method

This experiment aims to test the characteristics of LED solar cells when charging an electricity storing module before we proceed to the model design. Capacitors can be charged at low voltage, so they are chosen to be the energy storage device. In the experiment, the relation between voltage and charge time is recorded.

a. LEDs in series

One to four LEDs are put in series to charge a capacitor (C=1000 μ F, 25V, -40°~105°C) (Fig. 25(a)). The relation between the number of LEDs in series and charge time is as shown in Fig. 25(b).



b. LEDs in parallel

One to six LEDs are put in parallel to charge a capacitor (C=1000 μ F, 25V, -40°~105°C), (Fig. 26(a)). The relation between the number of LEDs in series

and charge time is as shown in Fig. 26(b).



(2) Results

a. LEDs in series: voltage

As shown in Fig. 25, LEDs in series extend the charge time, but also increase the saturation voltage of the capacitor, and thus the energy can be used in more convenient ways. For example, a single yellow LED solar cell can charge the capacitor to approximately 1.6 V, which is below the starting voltage of itself (around 1.7 V). However, if LEDs are put in series to charge a capacitor, then the saturation voltage of the capacitor will be enough to turn on LEDs and emit light.

b. LEDs in parallel: current, charge time

LEDs in parallel increase the current and electric energy generated by the LED solar cell system per time unit, and thus shorten the charge time. Therefore, parallel and series connection of LEDs can be combined to increase the charging voltage without lengthening the charge time.

The results of these experiments show that LED solar cells are capable of charging capacitors, and it is expected that they can also be used to charge other electricity storing modules.

D. Design of the circuit

After testing the optical and electric characteristics of LEDs and verifying their capability to charge an energy storage device, we proceed to the circuit design of the LED lamp. In our design, a power bank (DC 5V-1A) is used to store the electric energy generated by LEDs. (Fig.27)



Fig.27 Circuit of Self-powered LED lamp

- (1) **Charging**: as shown in Fig.27, four LEDs are put in series (≈ 1.6 V x 4) to reach the minimum voltage of charging a power bank (5 V). Electric current flows out from the positive electrode of LEDs, passes the diode gate, and charges the power bank.
- (2) **Discharging**: as the output voltage of power bank (5 V) needs to be larger than the starting voltage of LEDs, the circuit is changed to units of two

LEDs in series (= 1.7 V x 2) when the model performs this function. When discharging, relay switches in Fig. 27 are on, which switch the model to the discharging circuit. Then, electric current flows in to the positive electrode of LEDs, and lets LEDs emit light.

In this LED lamp model, LEDs have successfully produced electric energy, charged an energy storage device, and used the electricity stored to emit light.

E. Application

(1) Using LEDs as power supply under sunlight for a day

a. Method

In this experiment, the amount of energy generated by LEDs

under sunlight for one day is measured. Since LEDs operate Fig.28 Solar simulator

as light collector only in the daytime, we simulate the condition of incident light from 7:00 a.m. to 17:00 p.m.

When tested, LEDs are placed under a solar simulator as shown in Fig.28, and the light intensity of the simulator is adjusted to match the light intensity caused by different incident angles throughout the day, which is proportional to the value of cosine of the incident angle. To adjust the light intensity, a Si photodiode (ceramic package photodiode with low dark current, model S1133) is used. Suppose the sun shifts 15° in the sky during one hour. The sky from 7:00 to 17:00 can be divided into 11 parts, each representing 5~10 degrees of the central angle of earth. Multiply the output power corresponding to the incident angle by its time duration and the summation of these values is the total electric energy generated by LEDs in a day.

$$\mathbf{E}(\text{total energy}) = \mathbf{P}(\text{power}) \times \mathbf{t}(\text{duration})$$
(13)

b. Results

Table3. Calculation of the energy generated by a high power yellow LED under sunlight for one day

Incident angle $\theta(^{\circ})$	Max output power (µW)	Time (s)	$Energy = P \times t$
0	63.5	2400 s	0.152
10	62.0	4800 s	0.298
20	57.1	4800 s	0.274
30	51.6	4800 s	0.248
40	45.5	3600 s	0.164
45	42.1	2400 s	0.101
50	37.7	2400 s	0.091
55	33.7	2400 s	0.081
60	30.1	2400 s	0.072
65	25.0	2400 s	0.060
70	22.0	2400 s	0.053

Total energy E = 1.59 J/day

From Table 3, the energy generated by the 10mm yellow LED sample is 1.59 J per day. If LEDs are put under actual sunlight, which has higher light intensity than a solar simulator, and if the simple focusing device is added to them, the energy generated in one day can be around 400 J.

(2) Application of LED lamps

LEDs are efficient light emitters, which operates under low power. However, the energy generated by an LED lamp is not yet enough to support itself for long-time and continuous operation. Still, the lamp can be used for other purposes such as a signal light. For example, as the operating power of an LED is 60 mW, if the duration of a flash is 0.5 sec, then the energy needed per flash will be 30 mJ (60 mW \times 0.5 s). In this case, the energy generated under sunlight in a day (400 J) can supply an LED to flash for 13333 times. And if the LED flashes every one second, then the signal light can be used for around 3.7 hours.

The prototype of self-powered LED lamps is shown in Fig. 29-30.



Fig.29 Self-powered LED lamp



Fig.30 Self-powered LED lamp generates electricity under the Xenon short arc lamp

VI. Conclusions

- Extra electron-hole pairs of LEDs with light absorption are found from the I-V curve; thus, LEDs can perform multi-functions as light source and solar cell. Also, absorption spectra of LEDs overlap with the luminescent spectrum of sunlight, which suggests that they are capable of collecting solar energy.
- 2. The open circuit voltage of LED samples are around $1.401 \sim 1.673$ V, short circuit current vary from 8.7 to 101.2μ A, and fill factors are $80.7 \sim 90.8$ %. These I-V characteristics and high fill factors show their potential to be used as solar cells.
- 3. Photocurrent increases with light intensity, while the open circuit voltage is mainly associated with the band gap of LEDs. By creating series-parallel connection of LEDs and increasing sunlight intensity with Fresnel lens, the efficiency of LED solar cells has been significantly improved, and the energy generated by LEDs can be stored in an energy storage device.
- A flashing LED lamp can operate using the energy from light absorption of itself. The concept of "self-powered" is expected to be applied to various designs of LED lamps.

VII. References

- H. C. Kuo, F. I. Lai, and S. Y. Kuo (2013). Principles and application of light-emitting diode. Taipei: Wunan.
- [2] Asian Physics Olympiad Council (2001). *The physical property of solar cells*. Taipei: Chien-Shiung Wu Foundation.
- [3] O'Toole, Martina, Diamond, and Dermot (2008). Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices. Sensors 8 (4), pp. 2453-2479.
- [4] C. Y Chen (2006). Numerical Modeling of Current-Voltage Characteristics for Light-Emitting Diode. Institute of Microelectronics of National Cheng Kung University.
- [5] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, and R. Uzdin (2001). *Extraction of Schottky parameters with a bias dependent barrier height*, Solid-State Electronics 45, pp.143-148.
- [6] 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.
- [7] H. Haug, and S. Koch (2004). Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors, World Scientific.
- [8] C. Y Tsai (2005). *High Efficient Solar cell. Journal of Physics*, 27(5), pp.706.

雖能展示 LED 之基本功效,但其屬已知之物理,應再考量,增強儲能之功效方面作較佳之設計。