

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030112

光與電的邂逅~LED 充電現象之研究

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 謝明澄 國二 謝允中 國一 謝秉璋	指導老師： 柯瑞龍 謝甫宜
---	-----------------------------

關鍵詞：LED 燈、光生伏打、太陽能電池

摘要

本研究是探討 LED 在照光時產生端電壓及電流的現象，為了減少外界的光害及控制發光強度與色光，我們自製了測試盒及 LED 燈具，研究中發現，LED 對同色光的光源有比較好的吸收效果，當 LED 串聯時，端電壓會增加，電流則幾乎不變；LED 燈並聯時，電流會上升，但電壓則不變。我們也意外地發現，利用菲涅爾透鏡聚光後，可使短路電流上升 100 倍以上，且其發電的關鍵在其發光晶片，將晶片功率換算後發現，其功率竟然與等面積之太陽能板相當。接著分析焦耳小偷電路的作用效能，以達到低電壓並長時間作用的發光效果，最後綜合以上結果，設計了可充放電的簡易照明裝置。

壹、動機

去年寒假的時候，我們到台北科教館參觀，其中有一個攤位展示的是 LED，其五顏六色的繽紛色彩，讓我們看得目不轉睛。當他們介紹 LED 不僅有發光的功能，也有些許充電的功能，只是效果十分地差，但這樣的性質卻讓人十分的驚訝，也引發了我們濃厚的興趣，因此當下就決定要好好地研究 LED，並找出它的充電機制，並提升其效果。




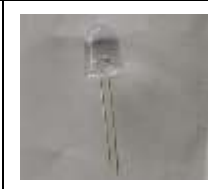






貳、目的

- 一、測試 LED 的基本性質。
- 二、測試裝置的架設。
- 三、不同色光對 LED 燈電壓的影響。
- 四、不同照度對 LED 燈電壓的影響。
- 五、LED 燈串聯的影響。
- 六、LED 燈並聯的影響。
- 七、LED 燈充電測試。
- 八、找尋影響短路電流之變因。
- 九、焦耳小偷電路之效能分析。
- 十、充放電發光設備之設計。

參、器材

一、使用器材：

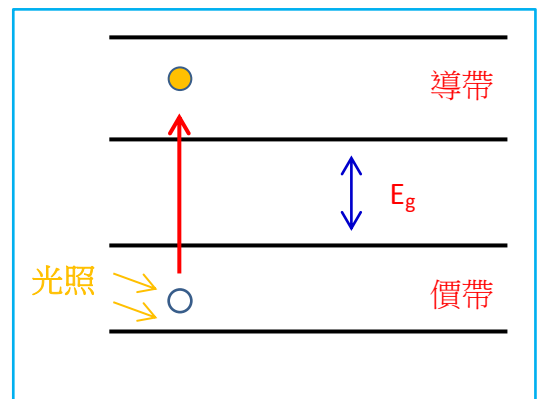
				
電路板	照度計	麵包板	示波器	三用電表

				
多功能電表	超級電容	一般電容	10mmLED	5mmLED 燈泡(透明殼)
				
自製燈具	自製測試盒	電源供應器	LED(有色)	高功率 LED

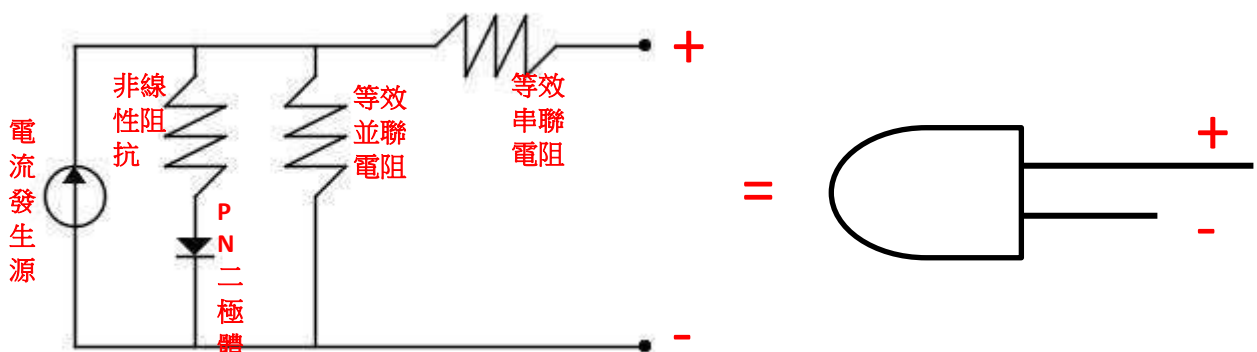
肆、原理及相關名詞

一、**內光電效應**：內光電效應是光電效應的一種，主要由於光量子作用，引發物質電化學性質變化。內光電效應又可分為光電導效應和光生伏打效應。

二、**光生伏打效應**：也稱為光生伏特，簡稱光伏（Photovoltaics）。半導體材料的價帶與導帶間有一個能隙，其間隔為 E_g 。當入射光的能量 $h\nu \geq E_g$ (E_g 為能隙間隔) 時，價帶中的電子就會吸收能量，躍遷到導帶，而在價帶中留下一個電洞，形成一對可以導電的電子-電洞對。這裡的電子並未逸出形成光電子，但顯然存在著由於光照而產生的電效應。



三、**太陽能電池**：太陽能電池相當於具有與受光面平行之大面積極薄 PN 接面的等效二極體，因此可以假設太陽能電池是相當於一個二極體與太陽能電流之發生源所並聯之等效電路，而 LED 也是 PN 接面的二極體所構成，且具有發電的功能，故本研究嘗試使用太陽能電池的模型來解釋 LED 發電現象背後的原理，其模型如下圖所示。



四、**開路電壓**：如上圖之電路，當 PN 二極體受到陽光照射時，會使電子向 N 型半導體移動，而電洞向 P 型半導體移動，結果會使 N 層帶負電 P 層帶正電，則在 PN 兩端則會產生電位差 V_{oc} ，即為開路電壓。

五、**短路電流**：如原理三之圖，當+、- 兩極用安培計連接時，就如同短路一樣，太陽能電池所產生的電流都會往安培計流入，此時所量到的電流稱為短路電流

六、**焦耳小偷**：此為 Z.Kaparnik 在 1999 年接出來的電路，原理源自於阻斷振盪器(blocking oscillator)的原理，基本上只要一個電阻限制電流大小，兩個互感線圈及一個電晶體就可以作用。主要是利用電磁互感的原理拉高電壓，使低電壓的電池可以點亮 LED 燈。

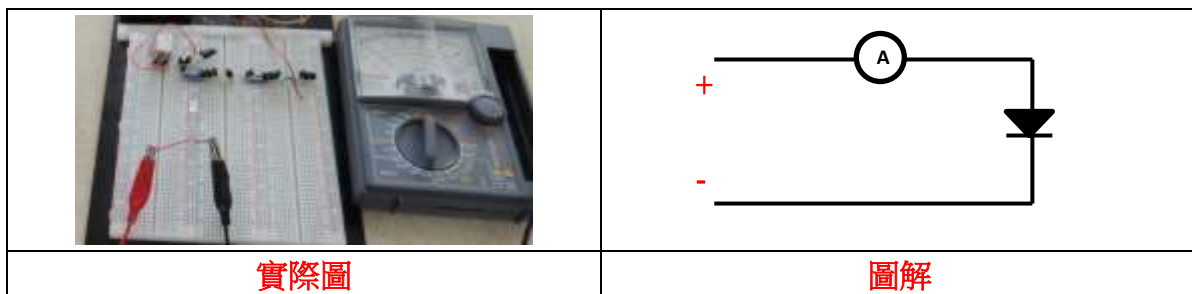
伍、研究過程、結果及討論

研究一、測試 LED 的基本性質

探討 1、LED 的順向偏壓與電流之關係

(一)目的：測試不同 LED 之電壓與電流之關係

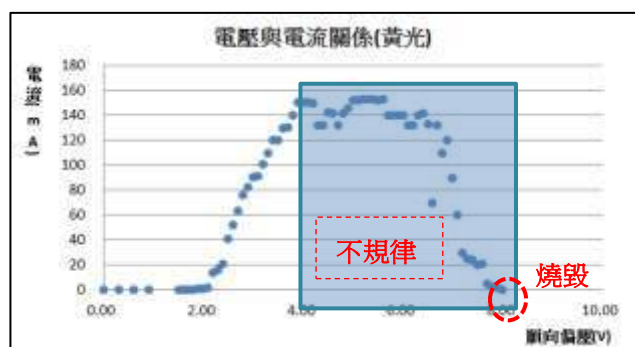
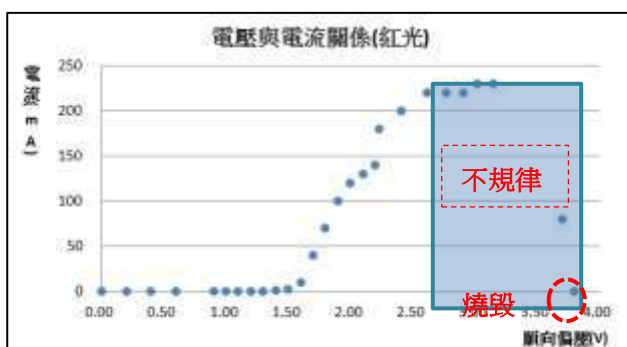
(二)步驟：1. 將紅光 LED 燈泡與電源供應器並聯，利用電源供應器提供穩定的電壓，再用數位式電表測量通過的電流及電壓。

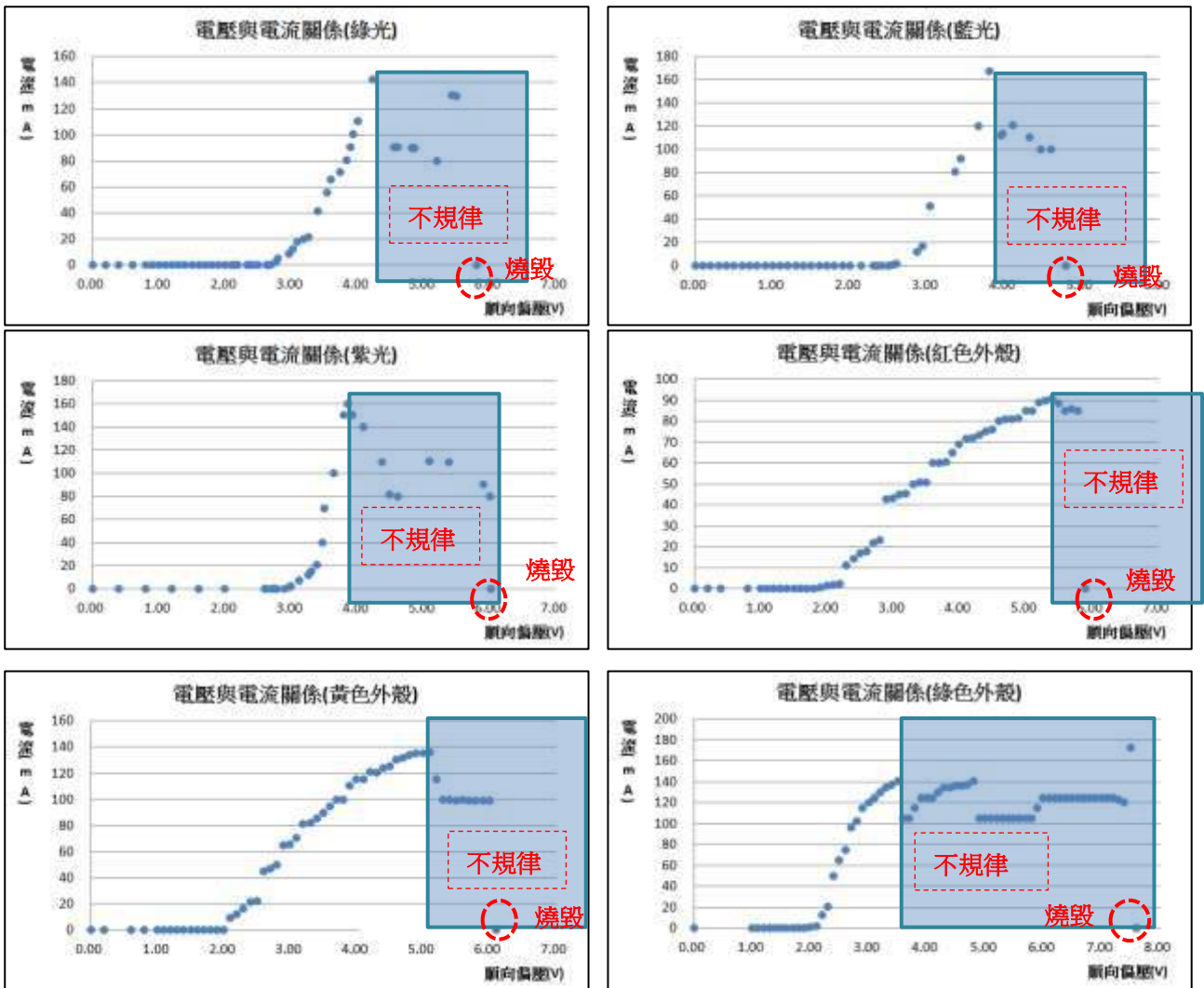


2. 用步驟 1 之方法，分別測量黃光、綠光、藍光、紫光及有色殼 LED 燈泡。

3. 將測量之數據作圖分析。

(三)結果：1. 圖形





(四)討論：1. LED 於低電壓時，電流無法通過，要大於某個電壓時，才開始有電流，此時電流會開始大幅上升，當電壓高於 LED 的耐壓時，內部結構遭到破壞，電流開始呈現不規律狀態，最後燒毀呈斷路。

3. 同樣是紅、黃、綠 LED，但透明殼和有色殼的明顯有不太相同之性質。

探討 2、LED 放電電壓之測試

(一)目的：測試不同 LED 燈在陽光下的充電情形

(二)步驟：1. 分別將不同色光之 LED 燈與 $470 \mu F$ 之電容連接(如右圖)。

2.將連接好的 LED 燈泡放在陽光下進行充電的測試。

3.照光 2 小時後，將充電完成之電容與三用電表並聯，測試其電壓之大小。

(三)結果：1. 數據

LED 規格	紅光	黃光	綠光	藍光	紫光	白光
最大電壓(V)	1.25	1.21	1.12	1.05	0.96	1.20

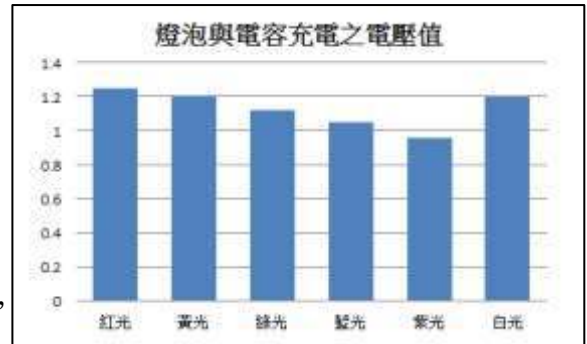
2.圖形(如右圖)

(四)討論：1. 紅、黃、白的 LED 在充電的結果中，
並看不出明顯的差異。

2. 利用電表測試電容之電壓時，電容會
快速放電，所以電壓值也會跟著下降，
因此必須快速將最大值記錄下來。

3. 雖然充電的時間相同，但是卻無法知道是否中間有電容已經充飽了，或是充不
進去了，所以並不能用此數據代表其充電的快慢。

4. 為了提高實驗的可信度，必須設計更嚴謹的實驗。

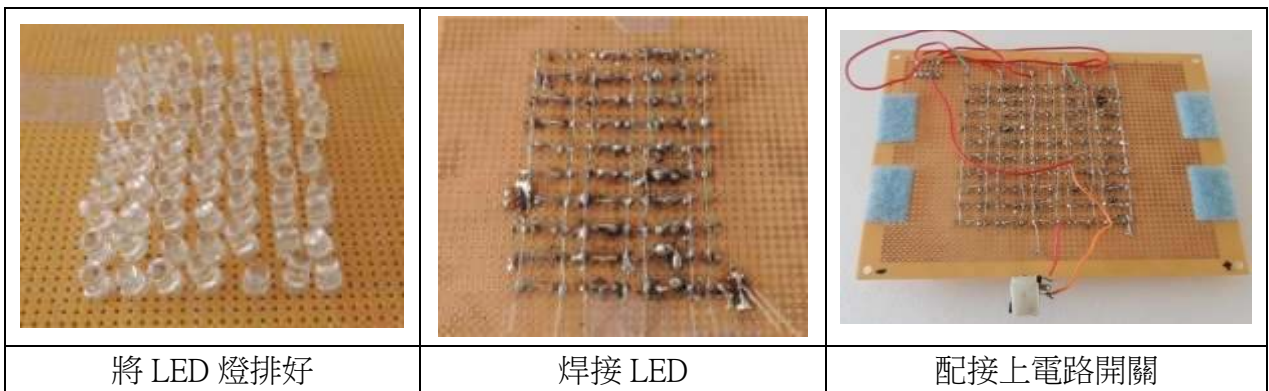


研究二、測試裝置的架設

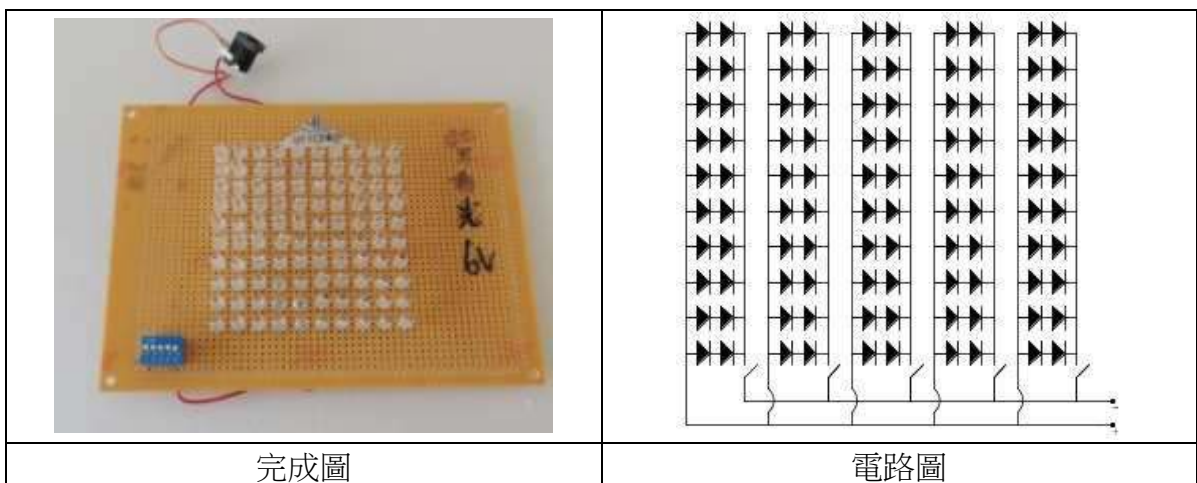
探討 1、如何自製燈具

(一)目的：自製接近單色光的燈具。

(二)步驟：1. 流程圖如下：



(三)結果：1. 完成圖及電路圖。



(四)討論：1. 焊接的過程有時因為焊錫用太多或是焊接時間過長，導致電路失效，所以失敗了好幾塊板子才成功。

探討 2、LED 燈在光柵下的色散情形

(一)目的：測試 LED 燈在光柵下的色散情形。

(二)步驟：1. 將 LED 燈打開後用光柵觀察。
2. 將觀察後的情形拍攝下來並分析。

(三)結果：1. 圖片

	紅光	黃光	綠光
無光柵			
有光柵			
	藍光	紫光	白光
無光柵			
有光柵			
	紅光(有色殼)	黃光(有色殼)	綠光(有色殼)
無光柵			
有光柵			

(四)討論：1. 利用簡易的光柵配合照相機拍攝，可以看到肉眼看不到的波段。

2. 紫光用肉眼觀察時，看不到色散的現象，但透過相機拍攝，可以清楚的看到紅、

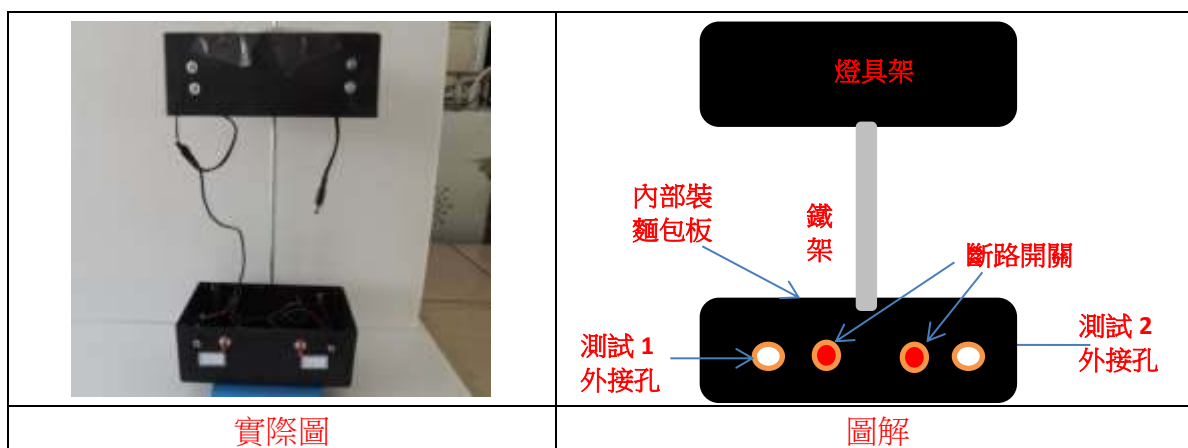
藍兩種色光分離，而白光則分離出類似彩虹的色光。

3. 其餘的色光在相機拍攝下看不到色散，顯示其單色光性良好。

探討 3、如何自製測試裝置

(一)目的：架設測試裝置。

(二)步驟：1. 設計測量裝置(如下圖)。



(三)結果：見上圖。

(四)討論：1. 將自製裝置再蓋上黑布後就可以確保內部的 LED 不會被外界的光影響。

2. 透過斷路開關的設計，可以控制測量的起始點與時間。

3. 利用外接測試孔，可在不打開黑布的情況下測試以提高準確度。

研究三、不同色光對 LED 燈電壓的影響

探討 1、不同色光對 LED 燈的影響

(一)目的：測試不同色光對 LED 的影響

(二)步驟：1. 將紅光 LED 燈置於紅色 LED 燈光下，利用三用電表測試其端電壓及電流。

2. 依序將發射光源改為黃光、綠光、藍光、紫光及白光重複步驟 1。

3. 依序將接收 LED 改為黃光、綠光、藍光、紫光及白光重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 數據

(1)電壓關係(單位：V ; 照度：4000Lux)

發射 接收	紅光	黃光	綠光	藍光	紫光	紅殼	黃殼	綠殼	白光
紅光	1.56	1.12	1.27	1.17	0.79	1.49	1.05	1.22	1.46
黃光	0.80	1.59	0.86	0.77	0.72	0.71	1.45	0.82	1.40

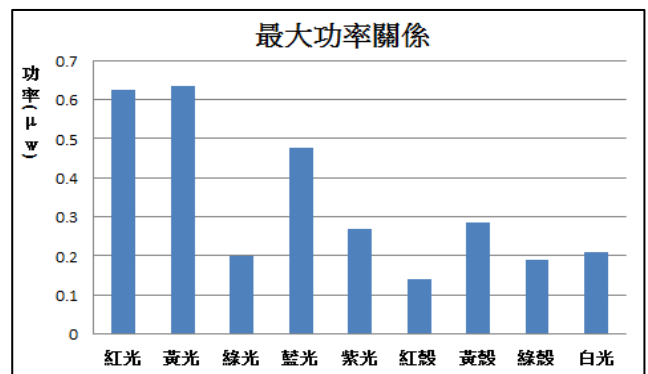
綠光	0.52	1.15	1.99	1.91	1.96	0.43	1.11	1.95	0.87
藍光	0.53	0.86	0.54	2.38	2.12	0.52	0.83	0.51	0.73
紫光	0.74	0.65	0.53	0.57	2.70	0.69	0.61	0.49	0.54
紅殼	1.41	1.02	1.12	1.11	0.72	1.40	1.00	1.06	1.38
黃殼	0.71	1.42	0.79	0.76	0.65	0.70	1.32	0.65	1.36
綠殼	0.42	1.03	1.91	1.85	1.81	0.36	0.93	1.38	0.85
白光	0.70	0.58	0.53	0.66	2.08	0.65	0.51	0.66	0.89

(2)最大功率比較

LED 燈	紅光	黃光	綠光	藍光	紫光	紅殼	黃殼	綠殼	白光
電壓(V)	1.56	1.59	1.99	2.38	2.70	1.41	1.42	1.91	2.08
電流(μA)	0.4	0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
功率(μW)	0.624	0.636	0.199	0.476	0.270	0.141	0.284	0.191	0.208

2.關係圖(如右圖)

- (四)討論：1. 由結果知，紅光與黃光的接收功率最高，且兩者都差不多。
2. 有色外殼 LED 的效果都十分不好，可能是自己本身的外殼造成濾光的效果，減少入射光照度，再加上二極體的材料也不太相同所致。



探討 2、太陽光對 LED 燈的影響

(一)目的：測試太陽光對 LED 的影響

- (二)步驟：1. 將紅光 LED 燈置於陽光下，利用三用電表測試其端電壓及電流。
2. 將接收 LED 改為黃光、綠光、藍光、紫光及白光重複步驟 1。

(三)結果：1. 數據

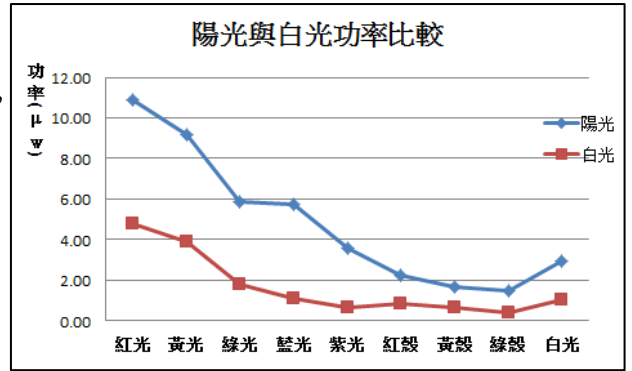
陽光	接收 LED 燈	紅光	黃光	綠光	藍光	紫光	紅殼	黃殼	綠殼	白光
	電壓(V)	1.51	1.46	1.13	1.25	1.12	1.32	1.13	1.12	0.96
	電流(μA)	7.2	6.3	5.2	4.6	3.2	1.7	1.5	1.3	3.1
	功率(μW)	10.87	9.20	5.88	5.75	3.58	2.24	1.70	1.46	2.98
白光	電壓(V)	1.46	1.4	0.87	0.73	0.54	1.38	1.36	0.85	0.89
	電流(μA)	3.3	2.8	2.1	1.5	1.2	0.6	0.5	0.5	1.2
	功率(μW)	4.818	3.920	1.827	1.095	0.648	0.828	0.680	0.425	1.068

2. 圖形(如右下圖)

(四)討論：1. 陽光造成的功率效果與白光 LED 比較接近，為了方便日後的變因控制，因此我

們使用白光 LED 來模擬陽光的效果。

2. 有色殼的 LED 因為外殼產生濾光效果，造成入射光強度不足，故不適宜作為發電之用。



研究四、不同照度對 LED 燈電壓的影響

探討 1、一日太陽光照度之大小

(一)目的：測試一天中光照度的大小

- (二)步驟：1. 於上午 8~16 時間將照度計分別置於陽光下及陰涼處，測量光強度大小。
2. 每隔一小時測量一次並記錄。

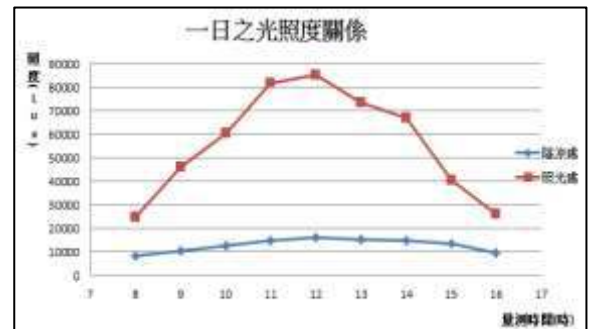
(三)結果：1. 數據

照度單位：100Lux

測量時間	8	9	10	11	12	13	14	15	16
陰涼處	83.1	105.6	127.2	147.7	160.4	150.7	148.6	134.7	94.3
照光處	249.0	460.0	602.0	815.0	851.0	733.0	668.0	406.0	261.0

2. 關係圖(如右圖)

- (四)討論：1. 不同時刻的陽光下之光強度大小變化很大，最小與最大有將近 3.5 倍的差距。
2. 在陰涼處的照度則在 10000~20000Lux 間變化幅度較陽光下小。



探討 2、不同光照度對 LED 燈之影響

(一)目的：測試不同光照度對 LED 的電壓影響

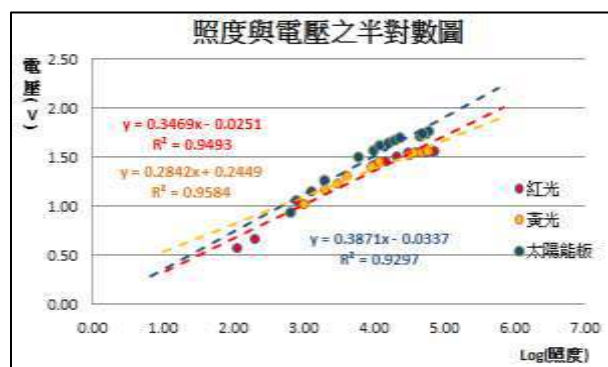
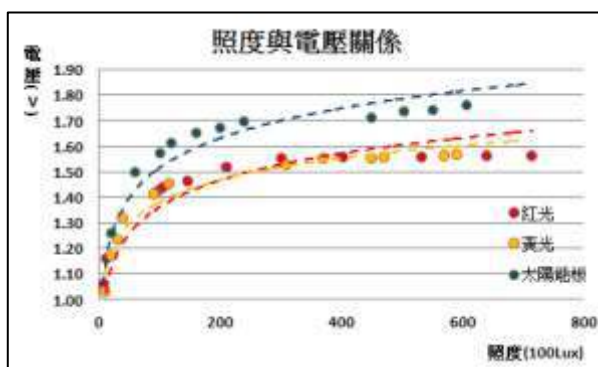
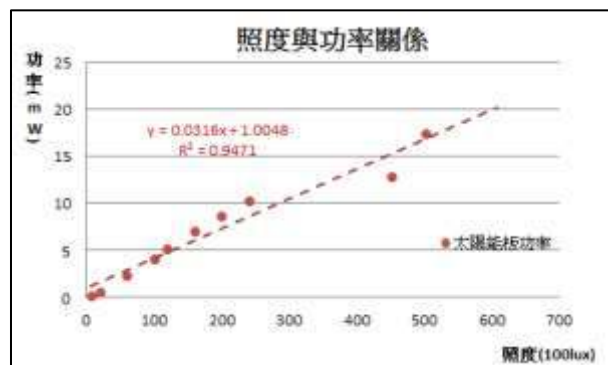
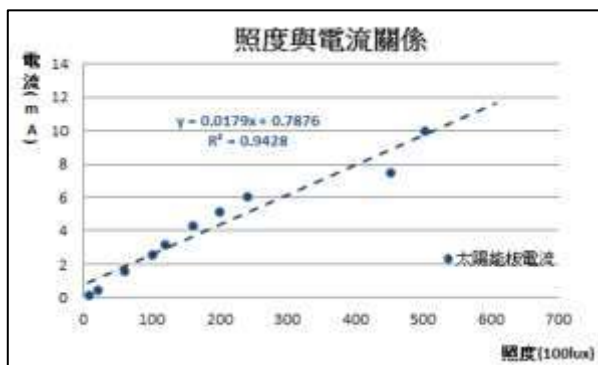
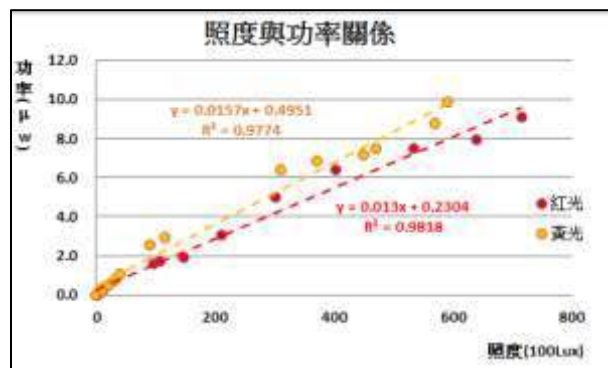
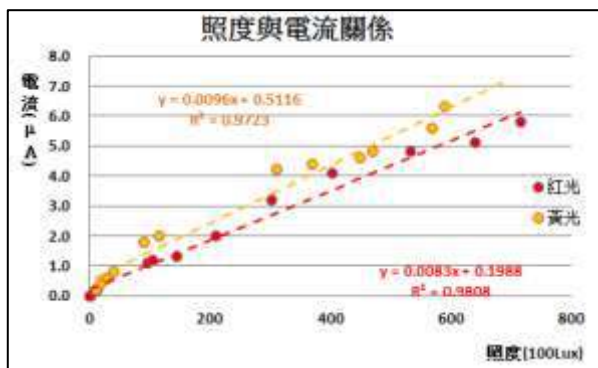
- (二)步驟：1. 將紅光 LED 燈放置在測試盒內，使用白光 LED 燈具做為發射光源。
2. 調整燈具與接收 LED 之距離，利用照度計測量光強度。
3. 透過外接的測試線，測試 LED 的端電壓。
4. 將紅光 LED 換成黃光 LED，並重複步驟 3。
5. 逐漸拉近燈具的距離，並重複步驟 2~4。

(三)結果：1. 數據

照度(100Lux)		19.9	25.8	29.2	42.6	60.5	100.8	148.7	269.0	443.0	605.0	666.0
紅光	電壓(V)	1.27	1.36	1.38	1.42	1.46	1.54	1.56	1.58	1.59	1.60	1.61
	電流(μA)	0.4	0.5	0.5	0.8	1.1	1.5	1.8	2.4	2.8	3.1	3.7

LED	功率(μw)	0.508	0.680	0.690	1.136	1.606	2.310	2.808	3.792	4.452	4.960	5.957
	照度(100Lux)	19.9	25.8	29.2	42.6	60.5	100.8	148.7	269.0	443.0	605.0	666.0
黃光	電壓(V)	1.42	1.51	1.52	1.54	1.56	1.59	1.62	1.63	1.65	1.66	1.66
	電流(μA)	0.2	0.3	0.4	0.7	0.9	1.3	1.7	2.7	3.6	4.2	4.3
LED	功率(μw)	0.284	0.453	0.608	1.078	1.404	2.067	2.754	4.401	5.940	6.972	7.138
	照度(100Lux)	6.6	20.0	60.0	100.0	120.0	200.0	240.0	451.0	503.0	552.0	607.0
太陽能板	電壓(V)	0.936	1.262	1.496	1.573	1.614	1.671	1.696	1.711	1.739	1.743	1.762
	電流(mA)	0.2	0.5	1.6	2.6	3.2	5.2	6.1	7.5	10.0	13.8	15.6
	功率(mw)	0.187	0.631	2.394	4.090	5.165	8.690	10.346	12.833	17.390	24.053	27.487

2. 關係圖



- (四)討論：1. 由結果可知，電流會隨著照度的增加而變大。電壓在照度小時，變化十分明顯，但照度超過 30000Lux 左右，變化幅度就漸漸趨緩。
2. 為了找出電壓和照度的關係，我們試著對照度取對數，製作電壓和照度的半對數圖形，結果發現在半對數圖形下，電壓和 Log(照度)可以呈現線性關係，且 LED

和太陽能板都有類似的趨勢，故我們嘗試用太陽能板模型來解釋 LED 之趨勢。

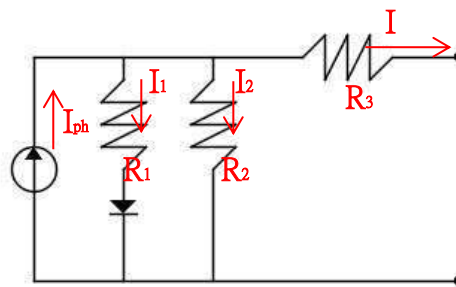
3.得到的關係式為

$$\text{紅光} : V = 0.3469 \log E_v - 0.0251 \quad I = 8.3 \times 10^{-5} E_v + 0.1988 (\mu A)$$

$$\text{黃光} : V = 0.2842 \log E_v + 0.2449 \quad I = 9.6 \times 10^{-5} E_v + 0.5116 (\mu A)$$

$$\text{太陽能板} : V = 0.3871 \log E_v - 0.0337 \quad I = 1.79 \times 10^{-4} E_v + 0.7876 (\text{mA})$$

4. 由太陽能電池之模型推論，在短路電流部分，當照度上升時， I_{ph} 呈線性上升，故量到的短路電流 I 也會跟著線性上升，其關係為 $I_{ph} \approx I$ 。在開路電壓



部分，設伏特計為一極大之電阻 R ，故量到的端電壓為 $V = I \times R$ ，且

$V + I \times R_3 = I_1 \times R_1$ ，故可得 $V = I_1 \times R_1 - I \times R_3$ ，其中 R_3 為固定之電阻，而 R_1 為非線性電阻，當電流 I_{ph} 上升時，分電流的大小也會跟著改變，其中 R 、 R_2 、 R_3 皆為固定電阻，而 R_1 為未知性質之電阻。其推論如下：

假設 R_1 為固定電阻，則分電流的分配比例不變，故 V 會隨著 I_{ph} 呈線性上升，此與實驗結果不符，故假設錯誤。 R_1 應為非線性電阻，根據圖形之趨勢可知 R_1 會隨著 I_{ph} 上升而下降，造成 I_1 分配的比例上升且 I 的分配比例下降，故量到的 V 之大小就會趨緩。

5. 由上面的比較可知，LED 在發電功率方面最大為 $7.138 \mu W$ ，遠遠比不上太陽能板 $27.487mW$ ，為了提高 LED 燈的發電功率，我們開始以下的實驗。

探討 3、不同照度對電壓大小之影響

(一)目的：測試 LED 串聯時的電壓

(二)步驟：1. 將紅光 LED 燈放置在測試盒內，使用白光 LED 燈具做為發射光源。

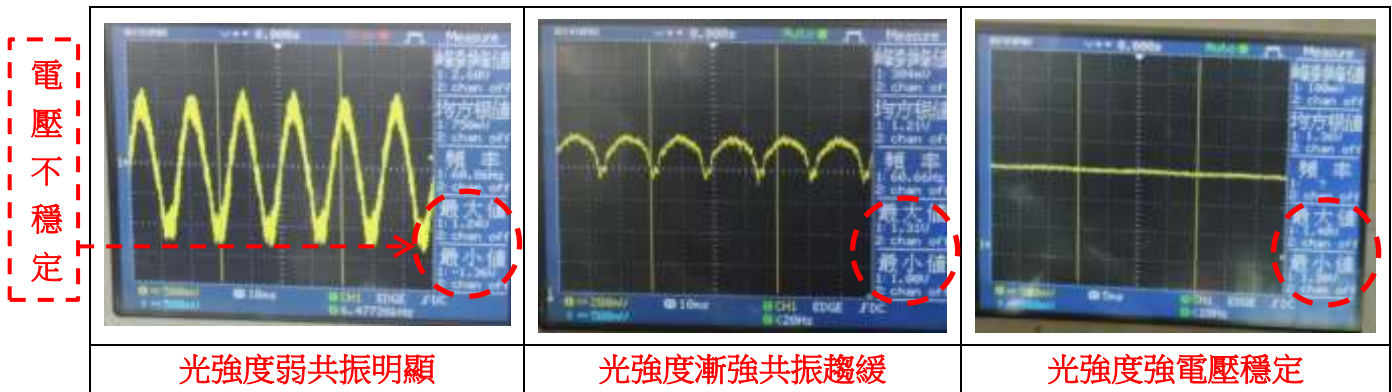
2. 調整燈具與接收 LED 之距離，利用照度計測量光強度

3. 透過外接的測試線，利用示波器測試 LED 的端電壓變化。

4. 將紅光 LED 換成黃光 LED，並重複步驟 3。

5. 逐漸拉近燈具的距離，並重複步驟 2~4。

(三)結果：1.示波器圖形



- (四)討論：1. 當發光強度小時，LED 兩端的最大及最小電壓差距很大，當照度漸大時，兩者的差距就漸漸縮小。由圖形我們推論是寄生元件就和電路產生共振的現象，所以示波器波形會呈現振盪的情形，而且振盪頻率都在 60Hz 左右，顯示和某個特定頻率電流產生共振的現象，且照度越小時影響越明顯。
2. 依照文獻，寄生電感的大小約為 10nH，將其代入 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 之公式後發現，其寄生電容必須要有 700F 以上才有可能達到，此大小已經大大地超越寄生電容的可能範圍，故我們認為，應該是儀器本身的電流竄入所導致的結果。
3. 隨著光照度越大，短路電流也越大，電壓之震盪也逐漸消失，顯示其受到儀器電流竄入之影響也越來越小。

研究五、LED 燈串聯時的影響

探討 1、LED 燈串聯時的電壓與電流

(一)目的：測試 LED 串聯時的電壓

- (二)步驟：1. 分別將紅光、黃光 LED 燈插在麵包板上，並用白光 LED 燈照射。
2. 利用示波器測試其電壓，用電表測試電流。
3. 分別改變 LED 串聯的顆數為 2、3、4、5、6、7、8 顆，並重複步驟 1~2。
4. 將光源改為陽光，並重複步驟 1~3。

(三)結果：1. 數據：(1) 電壓電流關係

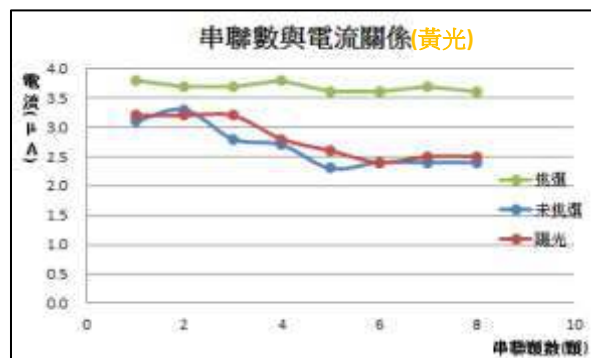
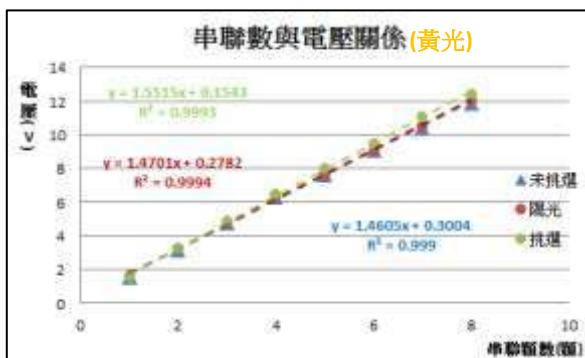
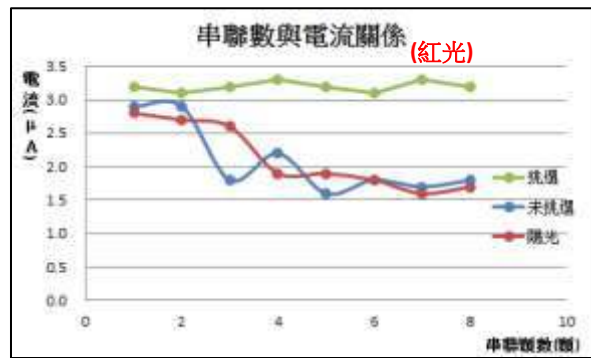
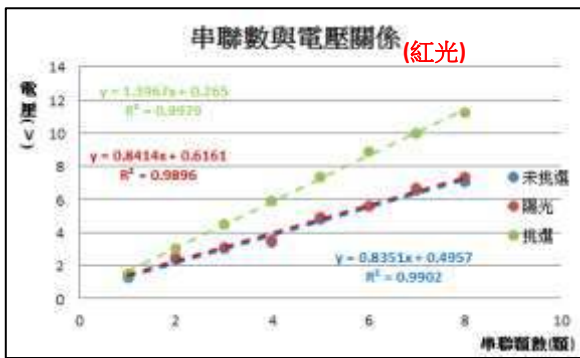
串聯數(顆)		1	2	3	4	5	6	7	8	
紅光	未挑	電壓(V)	1.29	2.36	3.04	3.42	4.76	5.56	6.56	7.04
	挑	電流(μA)	2.9	2.9	1.8	2.2	1.6	1.8	1.7	1.8

陽光	電壓(V)	1.5	2.52	3.12	3.51	4.92	5.62	6.67	7.36
	電流(μA)	2.8	2.7	2.6	1.9	1.9	1.8	1.6	1.7
挑選	電壓(V)	1.52	3.01	4.51	5.92	7.33	8.92	9.98	11.21
	電流(μA)	3.2	3.1	3.2	3.3	3.2	3.1	3.3	3.2
未挑	電壓(V)	1.60	3.20	4.76	6.32	7.66	9.11	10.41	11.92
	電流(μA)	3.1	3.3	2.8	2.7	2.3	2.4	2.4	2.4
黃光	電壓(V)	1.61	3.23	4.77	6.29	7.67	9.06	10.49	12.03
	電流(μA)	3.2	3.2	3.2	2.8	2.6	2.4	2.5	2.5
挑選	電壓(V)	1.60	3.22	4.85	6.46	7.98	9.51	11.08	12.39
	電流(μA)	3.8	3.7	3.7	3.8	3.6	3.6	3.7	3.6

(2) LED 挑選結果 (紅光良率：約 67%、黃光良率：約 83%)

編號		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
紅光	電壓(V)	1.46	1.47	1.41	1.42	1.49	1.45	1.46	1.42	1.43	1.46	1.46	1.45
	電流(μA)	2.8	2.7	1.0	1.5	2.9	2.7	2.5	0.8	1.8	2.8	2.7	2.8
黃光	電壓(V)	1.56	1.60	1.58	1.54	1.56	1.58	1.59	1.57	1.55	1.53	1.58	1.58
	電流(μA)	3.3	3.2	2.7	3.2	1.7	2.9	3.5	3.3	3.2	3.3	3.8	3.3

2.關係圖



(四)討論：1. 一開始隨機挑選 LED 進行測試時，發現其串聯電壓有忽大忽小的情況原本以為是光強度不均所造成，但實際移到陽光下，即使光照度均勻，仍然產生類似的結果，所以除了光照度不均外應該還有其他原因。

2. 仔細檢驗 LED 燈後發現，在相同的照度下，每一顆 LED 燈所產生的電壓與電流有著一定的差異，某些 LED 的電流更是明顯低落，會造成此原因應該是 LED 本

身內部電阻差異所造成的影響，所以除了光強度外，內部電阻也是很大的因素。

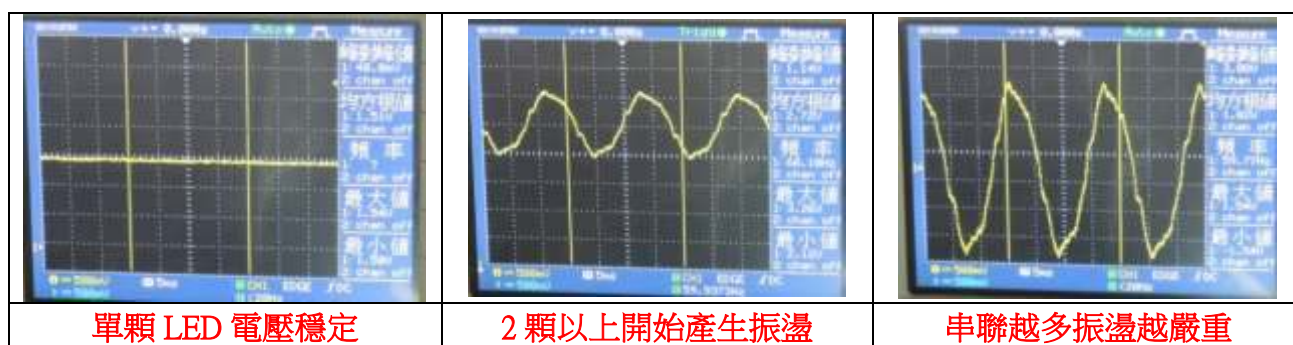
3. 挑選後的 LED 燈，在自製燈具照射下，也可以得到比例的關係，顯示輕微的光照度不均勻，對於電流的影響遠不如 LED 本身的電阻差異，故在製作發電板時，LED 的挑選也是一項很重要的工作。

探討 2、LED 燈串聯時的電壓圖形

(一)目的：測試 LED 串聯時的電壓圖形

- (二)步驟：
1. 將紅光 LED 燈插在麵包板上，並用白光 LED 燈照射。
 2. 利用示波器測試其電壓圖形。
 3. 分別改變 LED 串聯的顆數為 2、3、4、5、6、7、8 顆，並重複步驟 1~2。
 4. 將紅光 LED 改為黃光，並重複步驟 1~3。

(三)結果：1. 關係圖



- (四)討論：
1. 由上圖，當串聯顆數越多時，波形振盪的越嚴重，顯示串聯時電流微弱，內電阻也大，無形中就了許多能量，故在非必要的情况下，要盡量減少串聯的數量。

研究六、LED 燈並聯的影響

探討 1、LED 燈並聯時的電壓與電流

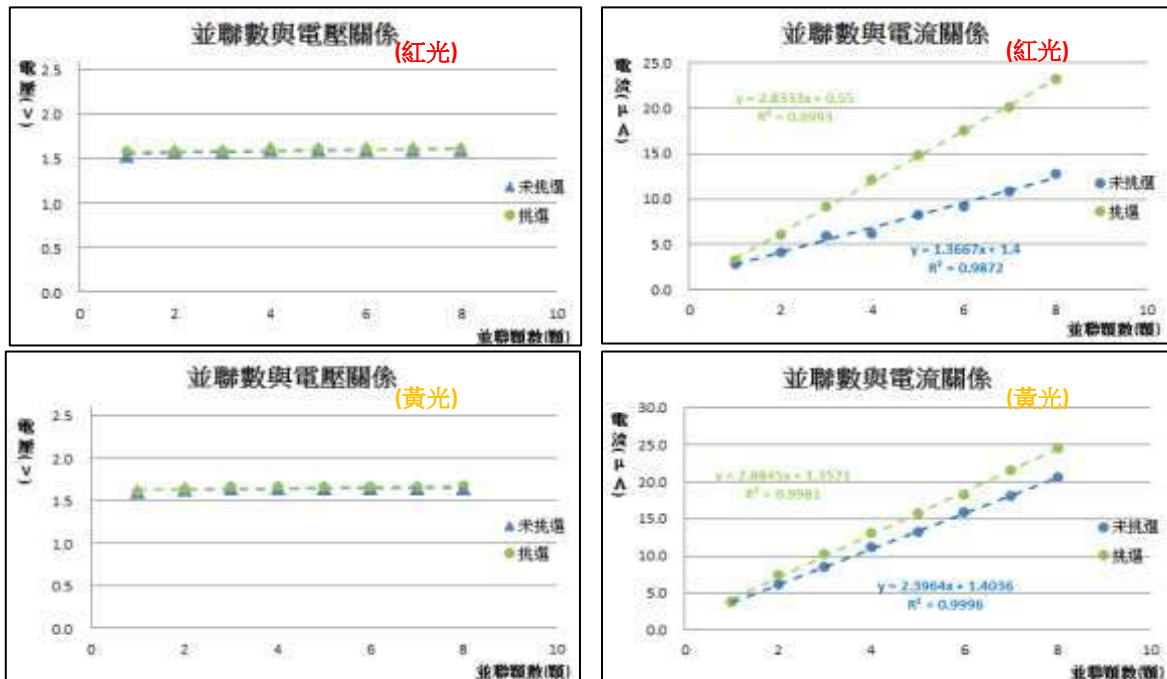
(一)目的：測試 LED 燈並聯時的電壓與電流關係

- (二)步驟：
1. 將紅光 LED 燈插在麵包板上，並用白光 LED 燈照射。
 2. 利用示波器測試其電壓，用電表測試電流。
 3. 分別改變 LED 串聯的顆數為 2、3、4、5、6、7、8 顆，並重複步驟 1~2。
 4. 將紅光 LED 改為黃光，並重複步驟 1~3。

(三)結果：1. 數據

串聯數(顆)			1	2	3	4	5	6	7	8
紅光	未挑選	電壓(V)	1.55	1.58	1.59	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61
		電流(μA)	2.9	4.2	5.9	6.2	8.3	9.2	10.9	12.8
	挑選	電壓(V)	1.58	1.58	1.59	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61
		電流(μA)	3.2	6.1	9.2	12.1	14.9	17.6	20.1	23.2
黃光	未挑選	電壓(V)	1.61	1.63	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
		電流(μA)	3.8	6.2	8.5	11.2	13.2	15.9	18.1	20.6
	挑選	電壓(V)	1.61	1.63	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.67
		電流(μA)	3.8	7.5	10.2	13.1	15.8	18.2	21.5	24.6

2. 圖形



- (四)討論：
1. 並聯時電壓的變化不大，電流則隨著並聯越多就越大，經過挑選後的 LED 燈，電流增加的幅度也越多。
 2. 當 LED 燈並聯 20 顆時，其面積的大小與太陽能板差不多，再利用上面的關係推論，其電流大小約為 $60 \mu A$ 左右，電壓約為 1.55V，電功率為 $93 \mu W$ 左右，仍遠遠比不上太陽能板的發電功率。

探討 2、LED 燈並聯時的電壓圖形

(一)目的：測試 LED 並聯時的電壓圖形

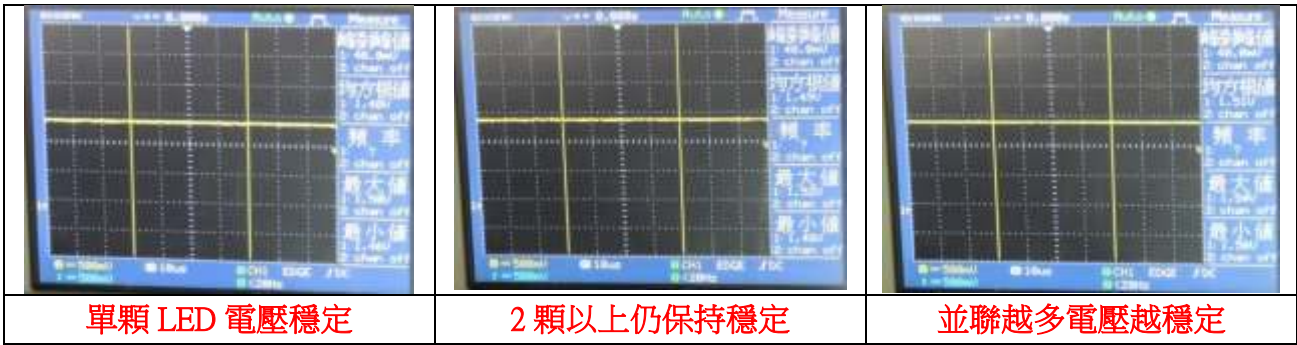
(二)步驟：1. 將紅光 LED 燈插在麵包板上，並用白光 LED 燈照射。

2. 利用示波器測試其電壓圖形。

3. 分別改變 LED 並聯的顆數為 2、3、4、5、6、7、8 顆，並重複步驟 1~2。

4. 將紅光 LED 改為黃光，並重複步驟 1~3。

(三)結果：1. 關係圖



(四)討論：1. 電壓會隨著並聯的數量越多就越穩定，這樣較有利於充電的進行。

研究七、LED 燈充電測試

探討 1、串聯電路充電的效果

(一)目的：測試串聯電路充電的效果

(二)步驟：1. 將紅光 LED 和 $220\mu F$ 電容連接好(如右圖)。



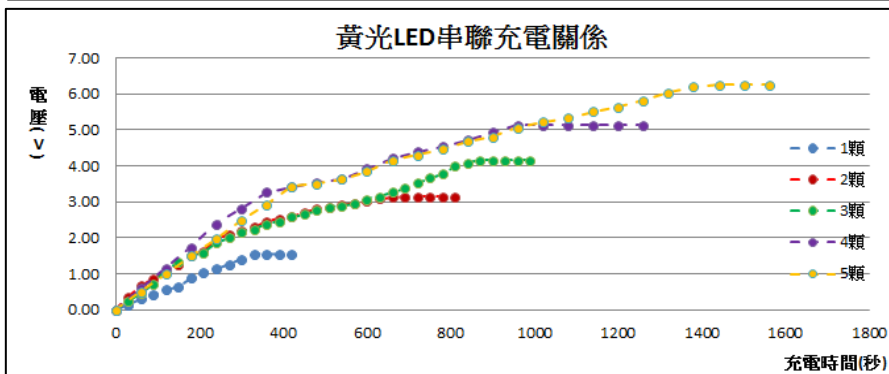
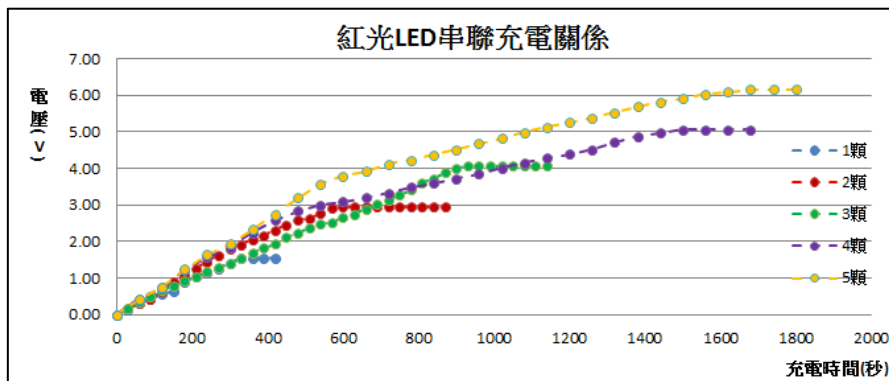
單顆

2. 以白光 LED 為發光源，讓紅光 LED 對電容進行充電。
3. 每 30 秒用電表快速測一下電容兩端的端電壓並記錄。
4. 改變串聯的 LED 數為 2、3、4、5 顆，重複步驟 1~3。
5. 改為黃光 LED，重複步驟 1~4。



2 顆串聯

(三)結果：1.數據(電壓單位：V)



(四)討論：1. 由公式 $C = \frac{Q}{V}$ 可知，當電容之大小固定時，電量 $Q = C \times V$ ，故可以透過電壓 V 之變化計算電容內部儲存之電量 Q 。故串聯越多時，充電到飽和所需的時間越長，其飽和電壓越大，充進去的電量也越多。

探討 2、測試並聯電路充電的效果

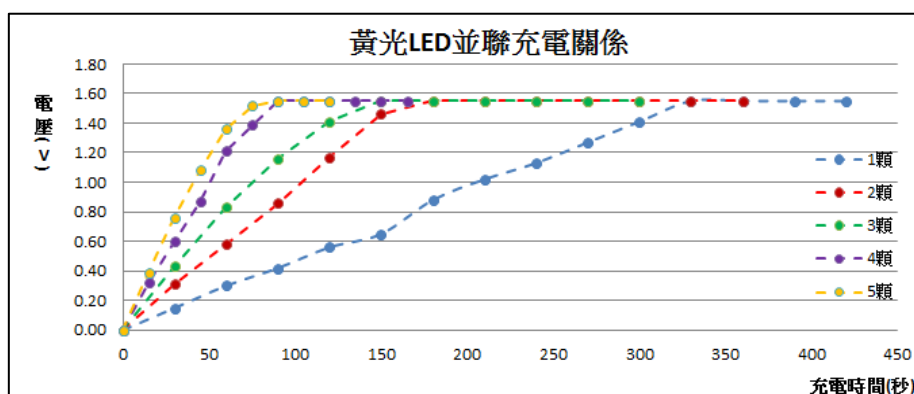
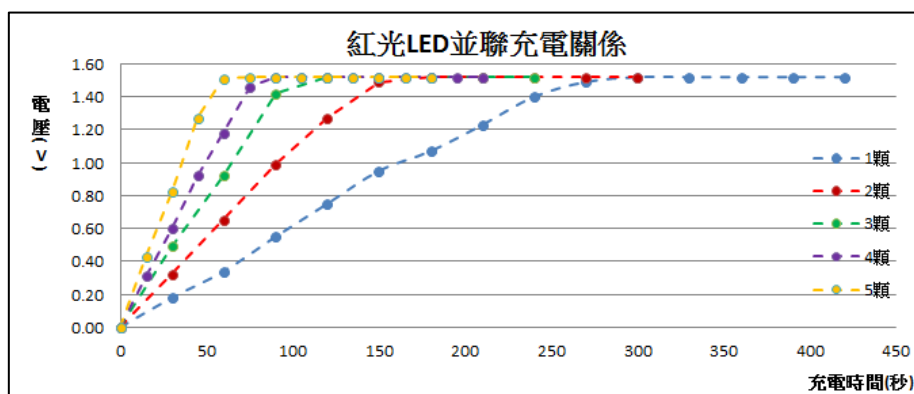
(一)目的：測試並聯電路的充電效果

- (二)步驟：
1. 將紅光 LED 和 $220 \mu F$ 電容連接好。
 2. 以白光 LED 為發光源，讓紅光 LED 對電容進行充電。
 3. 每 30 秒用電表快速測一下電容兩端的端電壓並記錄。
 4. 改變並聯的 LED 數為 2、3、4、5 顆，重複步驟 1~3。
 5. 改為黃光 LED，重複步驟 1~4。

2
顆
並
聯



(三)結果：1. 圖形



- (四)討論：
1. 並聯的 LED 越多充電的時間得越短，但紅光只能達到 1.52V，黃光可以達到 1.55，表示並聯可以加大電流，但是最大電壓則無法提升。
 2. 綜合以上結果，紅光 LED 在實際的充電實驗中，最大電壓與黃光 LED 差不多，但是充電到飽和所需的時間略小於黃光 LED。

- 為了縮短充電所需的時間，我們採用並聯的方式來加快充電速率，但並聯越多，代表放電時所耗的電能也越大，雖然整體短路電流上升，，但單一之電流卻不變。在開路電壓部分，因為並聯的關係，其電壓為 1.5V 左右，此電壓無法直接點亮 LED 燈，在此也面臨了電壓不足的問題。
- 是否有方法可以同時解決低電壓高電流所帶來的問題呢？為了解決這樣的疑惑，我們繼續了以下的測試。



研究八、找尋影響短路電流之變因

探討 1、測試陽光下 LED 燈的電流效果

(一)目的：測試 LED 燈在陽光下的電流

- (二)步驟：
- 將 LED 接好放置陽光下。
 - 利用三用電表測試 LED 燈的電壓與電流。
 - 使用 fresnel 透鏡聚光，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 數據&圖形 (陽光照度：60000Lux)

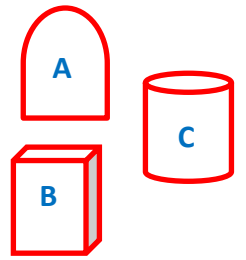
	
聚光前	聚光後
紅光	電壓：1.51V 電流：0.010 mA
黃光	電壓：1.46V 電流：0.008 mA
	電壓：1.60V 電流：1.109mA
	電壓：1.57V 電流：0.723mA

- (四)討論：
- 此測試得到一個令人振奮的結果，原本低糜的電流，在經過聚光後，紅光 LED 電流一口氣提升了 101 倍，變成 1.109mA，電功率也達到了 1.72mW，約為太陽能板(27.487mW)的 6.5%。顯示此方法可以有效地增強電流及發電功率。
 - 綜合以上研究可知，利用並聯以及聚光的方式可提升電流，以加快充電速率。
 - 除了照度外，是否仍有其他因素影響短路電流呢？為了瞭解這點，我們開始了以下的比較。




探討 2、不同外殼形狀之紅光 LED 燈之影響

(一)目的：比較不同透明外殼之 LED 燈之關係

- (二)步驟：1. 將紅光 LED 燈(A：圓頭)插在麵包板上，並用白光 LED 燈照射。
 2. 利用示波器測試其電壓，用電表測試電流。
 3. 改變紅光 LED 燈為 B(方形)、C(平頭)，並重複步驟 1~2。



(三)結果：1. 數據

形狀	A 圓頭		B 方形		C 平頭	
電壓(V)	1.539		1.466		1.425	
電流(μA)	1.7		0.5		0.4	
功率(μW)	2.616		0.733		0.570	



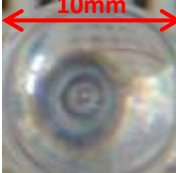
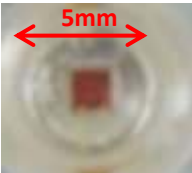
- (四)討論：1. 由以上的的測試中發現，同樣都是 5mm 大小的 LED，當因為外型不同，效果也不相同。
 2. 為了瞭解不同規格 LED 的效能，我們又找了不同規格的 LED 進行測試。

探討 3、不同規格之紅光 LED 燈之影響

(一)目的：比較不同規格之 LED 燈之關係

- (二)步驟：1. 將紅光 LED 燈 a 插在麵包板上，並用白光 LED 燈照射。
 2. 利用示波器測試其電壓，用電表測試電流。
 3. 改變紅光 LED 燈為 b、c、d，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 數據

形狀	5mm 紅光	3 晶 5mm 紅光	10mm 紅光	高功率紅光
特寫				
電壓(V)	1.539	1.458	1.465	1.481
電流(μA)	1.7	5.2	1.1	28.0
功率(μW)	2.616	7.582	1.612	41.468

- (四)討論：
1. 從上面的測試中我們發現，充電電流之大小與 LED 內部晶片的個數以及面積有很大的關係。當晶片數越多或面積越大時，電流的大小也越大，其效果就好像是 LED 並聯電流上升一樣。
 2. 10mm 紅光 LED 的功率並不如預計中的提高，其效果竟然和 5mm 的 LED 差不多，仔細觀察內部的晶片後發現，5mm 和 10mm 紅光內部的晶片大小竟然差不多，而其較大的外殼反而造成能量的損耗，所以功率並不大。
 3. 以高功率紅光 LED 為例，其晶片邊長約為 1.25mm，所以面積為 1.5625mm^2 ，而太陽能板為 $50\text{mm} \times 29\text{mm}$ 規格，故面積為 1450mm^2 ，為 LED 晶片的 920 倍，若 LED 晶片的面積與太陽能板的面積相同時，依前面的數據推論，功率可從 $41.468 \mu\text{W}$ 上升 920 倍以上達到 38.151mW ，已達到太陽能板的電功率(27.487mw)的 1.39 倍之多，若此推論正確，這將會是一個重大的發現，也打破業界認為 LED 發電效果不好的觀念，但礙於材料來源的問題，目前只能做理論上的推算。
 4. 串聯可以拉高開路電壓但短路電流卻無法提升，並聯可以升高短路電流，但開路電壓卻不高，但 LED 的發光電壓約為 2.0V，如果電壓過低將無法作用。
 5. 為了解決此的問題，我們決定利用升壓電路，使低電壓之電源點亮 LED。

研究九、焦耳小偷(Joule Thief)電路之效能分析

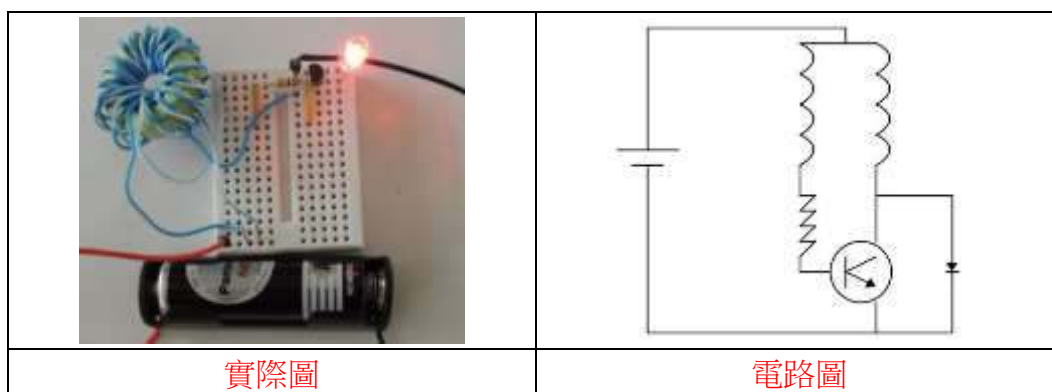
探討 1、不同線圈數對焦耳小偷電路之影響

(一)目的：測試線圈數對焦耳小偷電路的影響

(二)步驟：1. 將焦耳小偷的電路接好(如下圖)。

2. 將電源部分接上電壓較低(1.25V)的廢電池。

3. 分別改變線圈的圈數為 0、2、4、...、16、18 及 20 圈，並用示波器測試。

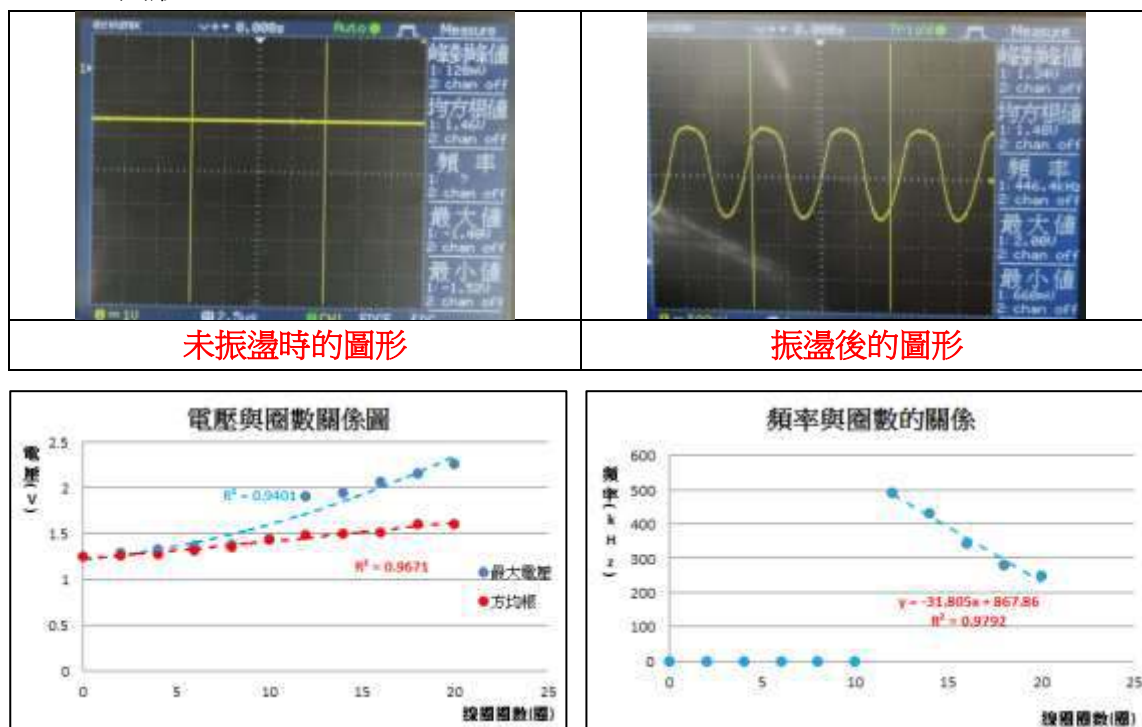


(三)結果：1.數據

0：表示未測出

圈數(圈)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
最大電壓(V)	1.25	1.29	1.32	1.36	1.38	1.44	1.90	1.94	2.06	2.16	2.26
方均根電壓(V)	1.25	1.26	1.27	1.31	1.35	1.43	1.49	1.50	1.51	1.60	1.60
頻率(kHz)	0	0	0	0	0	0	491.4	431.0	343.6	280.1	248.8

2.圖形



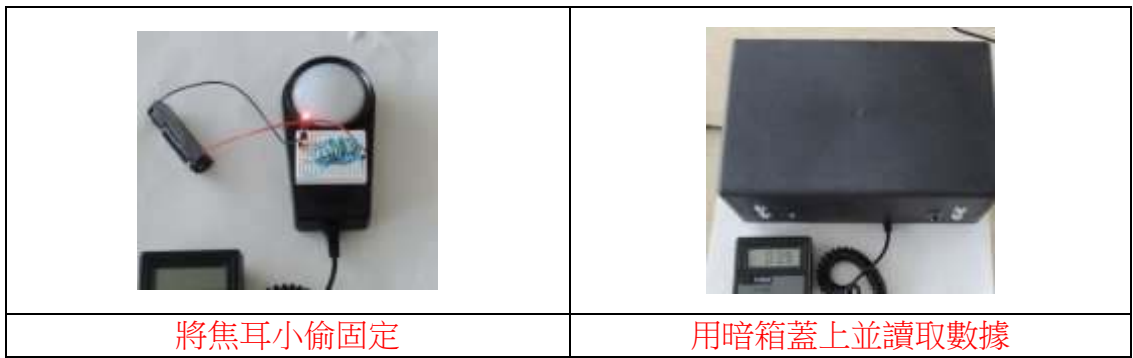
- (四)討論：
1. 點亮 LED 燈的最低電壓約為 1.8V 左右。當線圈圈數較少時，焦耳小偷無法有升壓的效果，其電壓為 1.46V，無法點亮 LED 燈，也測不到振盪的波形。
 2. 當圈數到達 12 圈以上時，感應線圈就可以產生足夠大的電感，將磁能轉成電能並拉高電壓，而成功地點亮 LED 燈。
 3. 由上圖可知，後半段的頻率隨著圈數的增加而遞減，顯示當電感越大時，可以越快儲存到足夠的磁能而釋放，並產生更大的電壓。

探討 2、焦耳小偷對不同 LED 燈之影響

(一)目的：測試不同 LED 燈的發光效果

(二)步驟：1. 將焦耳小偷的電路接好並固定在照度計上。






2. 將照度計用暗箱蓋上，並測試紅光 LED 燈的發光強度。
3. 分別將 LED 燈改為黃光、綠光、藍光、紫光，並重複步驟 1~2。



將焦耳小偷固定

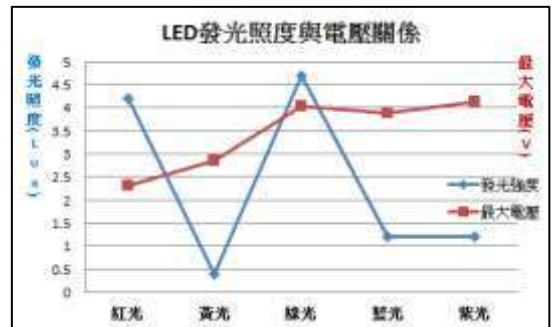
用暗箱蓋上並讀取數據

(三)結果：1.數據

LED 顏色	紅光	黃光	綠光	藍光	紫光
照度(lux)	4.2	0.4	4.7	1.2	1.2
最大電壓(V)	2.32	2.84	4.04	3.88	4.12
方均根(V)	1.32	1.37	1.53	1.59	1.61
頻率(kHz)	241.5	242.1	304.5	295.0	308.6
發光情形					

2.圖形(如右圖)

(四)討論：1. 黃光雖然有較好的發電效果，但利用焦耳小偷轉換後，雖然可達到啟動電壓，亮度卻十分的小，對於自體充放電是一大不利條件。



2. 發光效果最好的為紅光與綠光，但綠光充電的效果卻遠不如紅光，綜合此結果可知，紅燈 LED 可以達到自體充放電最佳效果。

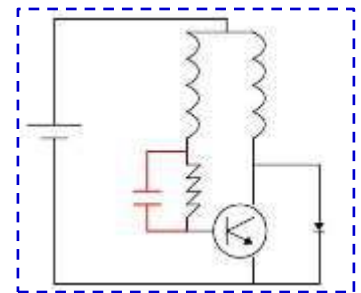
探討 3、不同電壓大小對焦耳小偷電路之影響

(一)目的：測試電壓大小對焦耳小偷電路的影響

(二)步驟：1. 將焦耳小偷的電路接好並加上電容(如右圖)。






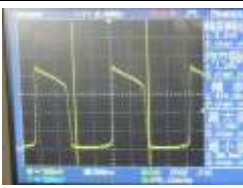




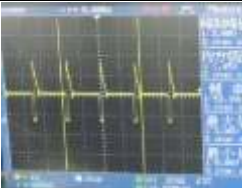

2. 利用示波器測量 LED 燈兩端的電壓變化。

3. 利用電源供應器改變電壓之大小為 0.1、0.2、...、1.4、1.5V 並重複步驟 1~2。



(三)結果：1.數據

外加電壓(V)	0.4	0.5	0.6	0.7
最大電壓(V)	1.84	2.06	2.14	2.22
方均根(V)	0.75	0.06	1.06	1.16
頻率(kHz)	1800.0	978.0	757.3	624.8

波形圖				
發光比率	1/3	1/4	2/5	1/3
外加電壓(V)	0.8	0.9	1.0	1.1
最大電壓(V)	2.20	2.26	2.28	2.42
方均根(V)	1.19	1.29	1.33	1.12
頻率(kHz)	634.0	474.5	447.5	54.84
波形圖				
發光比率	1/3	1/2	1/2	1/15
外加電壓(V)	1.2	1.3	1.4	1.5
最大電壓(V)	2.88	2.88	3.00	3.04
方均根(V)	1.26	1.30	1.45	1.54
頻率(kHz)	57.12	57.35	58.39	58.31
波形圖				
發光比率	1/10	1/9	1/9	1/9

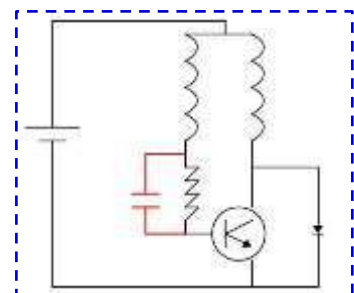
註：發光比率 = $\frac{\text{一次尖峰電壓時間}}{\text{週期}}$ (代表 1 秒內 LED 實際發亮的時間)

(四)討論：1. 影響尖峰電壓出現的最主要變因為電壓之大小，大約在 1.00V ~1.10V，電容可以提早或延遲此情況出現的時機，但若電壓低於 1.0V，不管電容如何改變，都不會出現這樣的圖形。

探討 4、不同電容大小對焦耳小偷電路之影響

(一)目的：測試電容大小對焦耳小偷電路的影響。

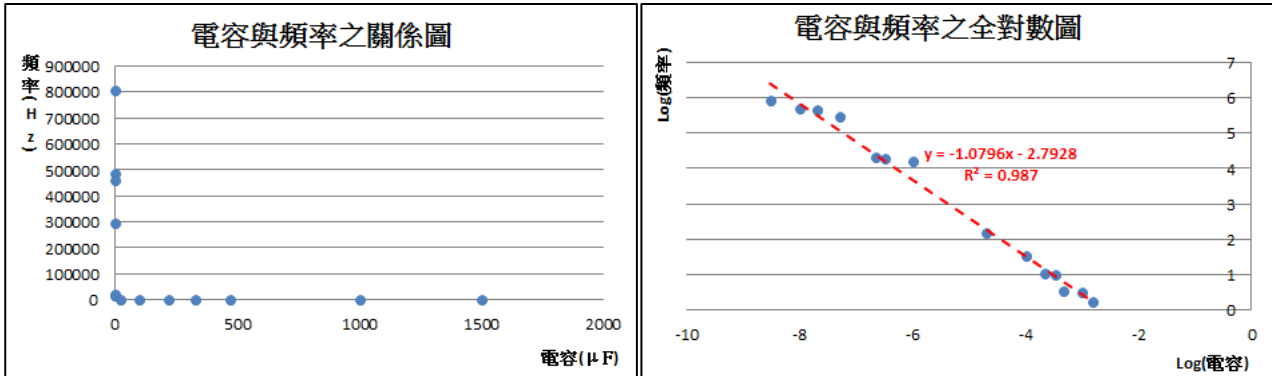
- (二)步驟：1. 將焦耳小偷的電路接好並加上電容(如右圖)。
2. 利用示波器測量 LED 燈兩端的電壓及頻率。
3. 改變電容之大小，並重複步驟 1~2。



(三)結果：1.數據

電容(μF)	0.003	0.01	0.02	0.05	0.22	0.33	1
頻率(kHz)	806.50	487.80	460.80	294.50	20.77	18.52	16.45
電容(μF)	20	100	220	330	470	1000	1500
頻率(Hz)	155.94	33.47	10.60	10.26	3.43	3.16	1.80

2.圖形



(四)討論：1. 透過電容的改變，可以讓電壓產生尖峰的波形，此波形可以大大減少發光時間，以延長整體發光時間，並可透過電容之改變，形成閃爍的效果。

2. 由電容與頻率之關係圖，不易看出其趨勢，於是我們將電容與頻率之數據分別取對數，發現其關係式為 $\log f = -1.0796 \log C - 2.7928$ ，將其對數去掉後可得

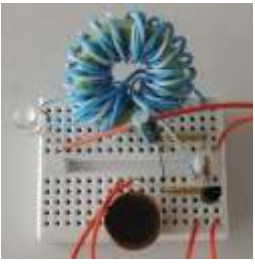
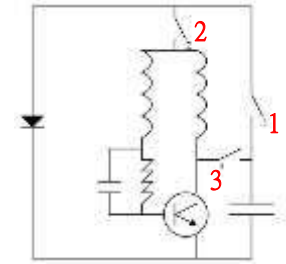
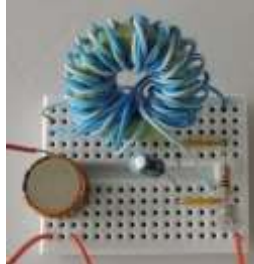
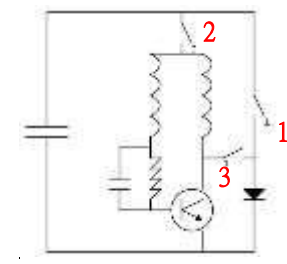
$$f = \frac{1}{10^{2.7928}} \times \frac{1}{C^{1.0796}} \approx \frac{1}{10^{2.7928}} \times \frac{1}{C} \propto \frac{1}{C}$$

故可知，在此電路中，頻率(f)與電容(C)成反比關係。

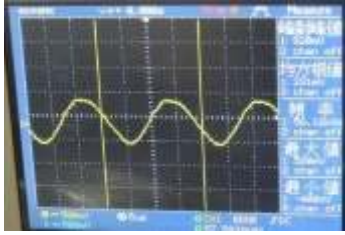
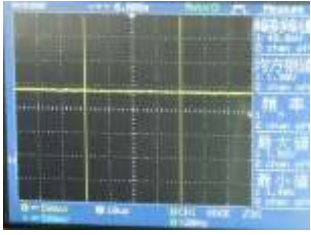
探討 5、焦耳小偷連接方式對電路的影響

(一)目的：測試焦耳小偷對電路的影響

(二)步驟：1. 將焦耳小偷和電容器連接(如下圖)。 2. 測試兩種連接方式對電路的影響。

			
實際圖一	電路圖一	實際圖二	電路圖二
<p>一、直接用焦耳小偷拉高電壓來充電</p> <p>1. 開關 2、3 關閉，1 開啟，由 LED 燈發電透過焦耳神偷拉高電壓對電容充電。</p> <p>2. 開關 1 關閉，2、3 開啟，電容放電後，可直接點亮 LED 燈。</p>		<p>二、先進行充電再用焦耳小偷拉高電壓</p> <p>1. 開關 1 關閉，2、3 開啟，由 LED 燈發電直接對電容充電。</p> <p>2. 開關 2、3 關閉，1 開啟，電容放電後，透過焦耳小偷拉高電壓，點亮 LED 燈。</p>	

(三)結果：1. 數據

電路編號	電路一	電路二
測試圖		
最大電壓(V)	0.520	1.52
方均根(V)	0.331	1.50

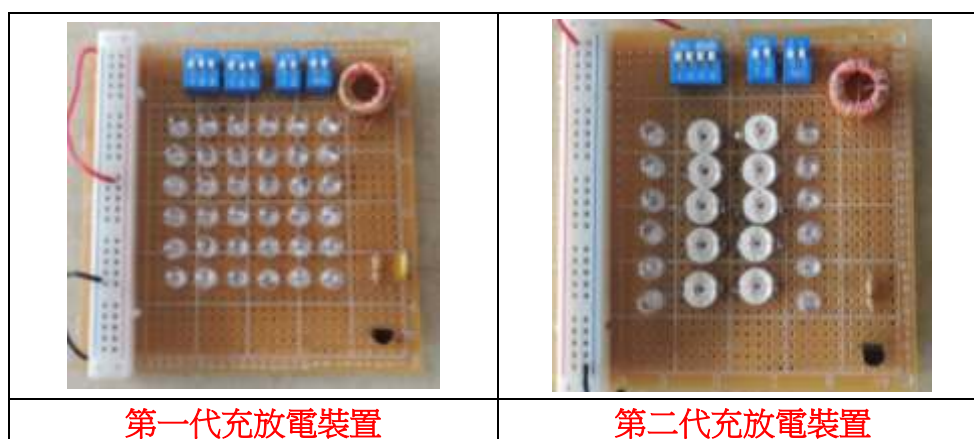
- (四)討論：
1. 電路圖一的設計，LED 燈發的電，透過焦耳小偷後，並無法如預期性地拉高電壓，反而產生上下震盪的電壓(如電路一)，原因可能是 LED 燈產生的電流不足，所以電路無法發揮效果。
 2. 電路圖二的設計，可以先用 LED 燈之直流電(如電路二)對電容進行充電，等到要放電時，再透過焦耳小偷將電壓拉高，並形成高頻率間接性放電，可大幅延長 LED 發亮的時間。
 3. 綜合兩種結果可知，電路二可達到 LED 發光的需求。

研究十、充放電發光設備之設計

探討 1、充放電裝置的功率關係

(一)目的：測試電路的放電效果

(二)步驟：1. 將設計好的裝置(如下圖)放置於紅光 LED 燈下照射。

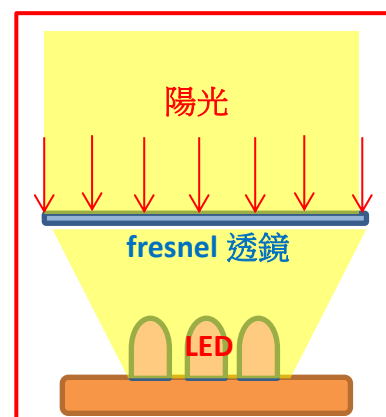


2. 關閉開關 1，開啟開關 2、3，利用三用電表測試其電流及電壓。
3. 將光源改為陽光及聚光後的陽光，重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 數據

裝置	第一代			第二代		
光源	紅光	陽光	聚光	紅光	陽光	聚光
電壓(V)	1.564	1.604	1.637	1.527	1.529	1.604
電流(mA)	0.206	0.322	5.670	0.823	1.010	15.71
功率(mW)	0.322	0.516	0.928	1.257	1.544	25.20

(四)討論：1. 第一代裝置是全部利用 5mm 的 LED 燈來發電，並將其集中在中央，這樣一來可以透過 fresnel 透鏡聚光在中央(如右圖)，達到提高功率的效果。



2. 第二代則是將中間的部分改成高功率 LED 燈，結果發電功率果然得到將近 4 倍的提升。

3. 接著再透過 fresnel 透鏡聚光後，不僅提高了短路電流，

也提高了開路電壓，其電功率又大幅提升至 25.20mW，不僅是原先的 20 倍之多，其發光功率也接近了太陽能板的發光功率(27.487mW)。

4. 如果能加大中央晶片的面積，再透過 fresnel 透鏡聚光，其發光功率一定可以大幅超越太陽能板。

5. 另外聚光後開路電壓也有些微的上升，使得電容的最大儲電量也可得到提升。

探討 2、充放電裝置的充電效果

(一)目的：測試電路的充電效果

(二)步驟：1. 將第一代的裝置置於紅光 LED 燈下照射。

2. 關閉開關 1，開啟開關 2、3，讓裝置對 1F 之電容充電。

3. 定時測量電容的電壓並記錄。

4. 開啟開關 1，關閉開關 2、3，讓裝置放電。

5. 將裝置改成第二代，重複步驟 1~4。

(三)結果：1. 數據(充電)

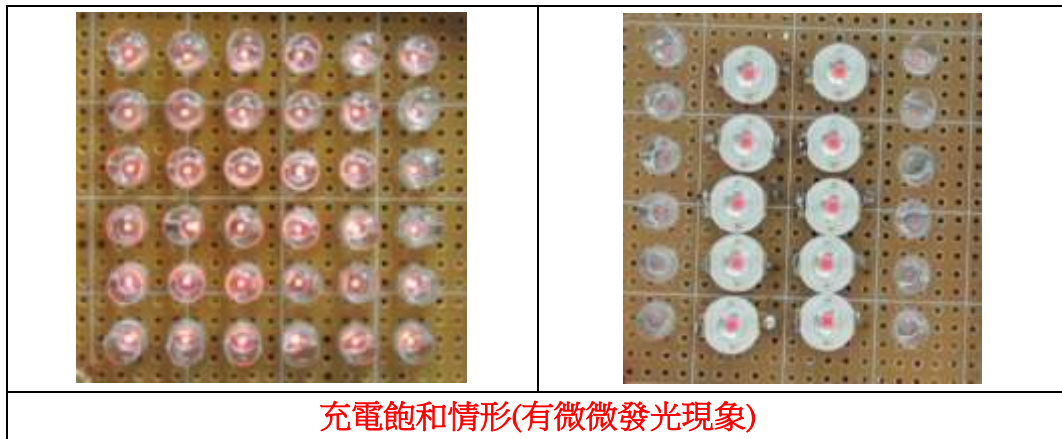
第一代

時間(分)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
電壓(V)	0.031	0.232	0.492	0.623	0.761	0.862	0.992	1.123	1.321	1.476	1.511	1.511

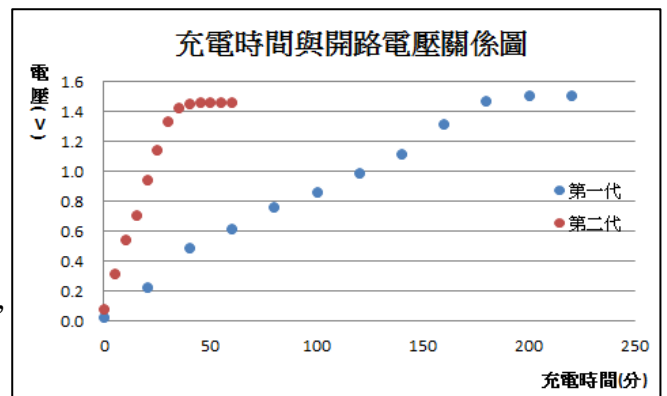
第二代

時間(分)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
電壓(V)	0.084	0.323	0.542	0.708	0.950	1.148	1.338	1.427	1.452	1.468	1.468	1.468

2. 圖形



(四)討論：1. 由上面的結果發現，當電壓到達 1.5V 附近時，LED 就會開始出現微微發光的情況，表示 LED 在充電的同時也在放電，因為 1.5V 達到紅光 LED 微微發亮的最低電壓，所以才會出現這樣的情況，這也代表此時 LED 已經接近充電的極限。



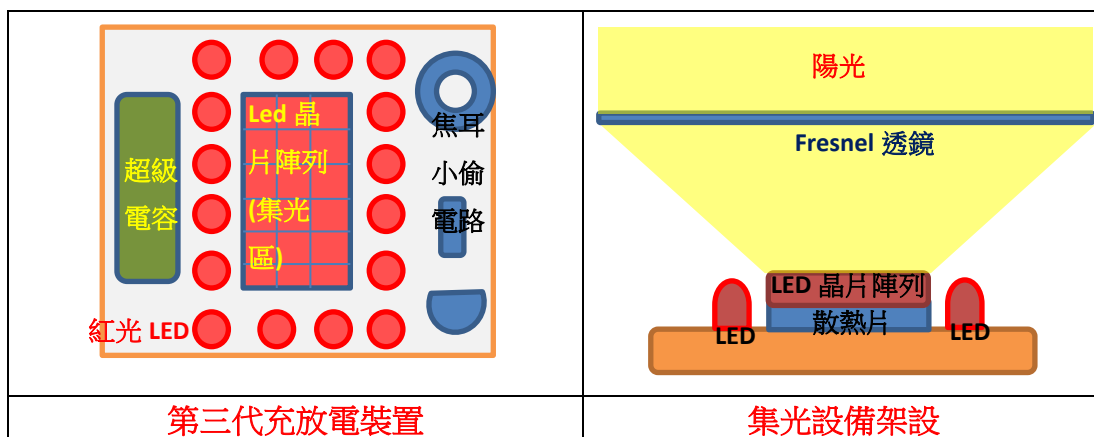
2. 第二代充電裝置大約在 40~45 分鐘就可將電充完，比第一代更加快速。

探討 3、第三代裝置的設計

(一)目的：設計第三代充放電裝置。

(二)步驟：1. 設計第三代充放電裝置(如下圖)。

(三)結果：1. 第三代充放電裝置



(四)討論：1. 中央之集光區除了可以當作太陽能板用來發電之外，必要時也可以分區發光，用來增加亮度，這也是太陽能板所辦不到的。

2. 利用 Fresnel 透鏡將陽光聚集，可提高集光區的發電功率。
3. 若依照理論推算，若集光區的面積與太陽能板相同(1450mm²)，則大約可以容納 920 片晶片，根據第二代之效能推算，10 片晶片經聚光後，功率可達 25.20mW，則 920 片晶片在同樣面積的集光區聚光後，可得到 25.20mW×92 = 2318.4mW 之發電功率，大約為 2.3W。這樣的效果已經足夠在數小時內將超級電容充飽，並提供夜間閃爍或警示照明用，達到自給自足的效果，必要時又可大面積發光，達到最佳的照明或警示效果，這也是太陽能板所辦不到的。

陸、結論

- 一、LED 在順向偏壓的情況下，需到了某個特定的電壓才開始有電流通過，接著電流會快速上升，若超過其負荷就會呈現不規則的情況。
- 二、為了能將變因做最好的控制，我們用 100 顆 LED 燈焊了不同顏色的燈具，且在光柵中發現，黃光 LED 燈竟然沒有色散的現象，與理化課本講的黃光為混色光不太一樣。
- 三、我們用兩個黑盒子自製了一個暗箱，以減少外界光害影響實驗的結果，透過外接測試孔，可在不打開暗箱的情況下測量。
- 四、在色光的實驗中發現，LED 對於相同波段的色光會有比較好的發電功率效果，其中以紅光及黃光效果最好，實際在陽光下測試，結果也相同。
- 五、在照度影響的實驗中發現，電壓在照度弱時變化很大，但照度大時變化就逐漸趨緩，而電流則是會隨著照度的上升而上升，此趨勢和太陽能板相似。於是我們將照度之大小取對數，再和電壓做成半對數之圖形，發現其線性關係，其關係如下：

紅光	$V = 0.3469 \log Ev - 0.0251$	$I = 8.3 \times 10^{-5} Ev + 0.1988 (\mu A)$
黃光	$V = 0.2842 \log Ev + 0.2449$	$I = 9.6 \times 10^{-5} Ev + 0.5116 (\mu A)$
太陽能板	$V = 0.3871 \log Ev - 0.0337$	$I = 1.79 \times 10^{-4} Ev + 0.7876 (mA)$

- 六、在實驗中我們意外的發現，LED 在照度弱時，電壓並不是一個定值，而是會呈現一個振盪的現象，照度越弱，振盪越明顯。探討其原因發現，應是示波器電流竄入所造成的影響，當照度小時，短路電流微弱，易受外在電流影響，當照度變大時，短路電流增強，外在影響就會變小，故在測量低電流時，必須要使用更靈敏的電表。

- 七、將 LED 串聯後照光，可以提高 LED 的端電壓，但電流卻沒有顯著的上升，表示串聯後仍受 LED 內部電阻的影響，所以無法提高電流。且串聯 2 顆後，LED 的端電壓又出現振盪的情況，顯示在高電壓低電流的情況下，受外在影響較大。
- 八、我們也意外的發現，即使是同一批 LED 燈，其開路電壓及短路電流也有很大的差異，這些差異會對測試造成非常大的影響，故在測試前需要對每一顆進行檢驗的工作。
- 九、將 LED 並聯後照光，可以提高 LED 的電流，以加快充電的速率，而且電壓穩定，比串聯時更適合用來充電。
- 十、實際利用電容進行充電測試，串聯可以充到比較高的電壓，但時間也較長，並聯可以短時間內就充飽，但電壓較低。
- 十一、為了解決電流不足的問題，我們使用了 fresnel 透鏡進行聚光，成功地使電流從 0.01mA 大幅提升了上百倍之多，達到了 1.109mA，這也使其發電功率，一口氣提升了上百倍。
- 十二、我們測試不同規格的 LED 燈後發現，LED 的發電功率與其內部的發光晶片面積有關，面積越大或式晶片越多時，其效果就好像 LED 並聯一樣。將其面積換算成等面積的太陽能板後，發現其發電功率可達到 38mW 以上，已超越太陽能板的 27mW。
- 十三、為了使低電壓(1.5V)的電源可以點亮 2.0V 以上的 LED 燈，我們使用了在科學營學到的焦耳小偷(Joule Thief)電路。在此電路的效能測試中發現，外加電容的情況下，電壓大約在 1.0 伏特時，LED 的電壓會產生尖峰的波形，這也意味著其實 LED 正以非常快的速率進行閃爍，但因頻率太大，所以人眼無法察覺，但若善加利用此特性，就可以將 LED 的發光時間延長數十倍。
- 十四、綜合以上的結果，製作了第一代及第二代的充放電裝置，其中第二代裝置在聚光後，發電功率可達到 25.2mW，已和太陽能板相當。
- 十五、以此為基礎設計第三代裝置，在經過聚光後，其集光晶片的發電功率在理論上可達到 2.3W 以上，也真正達到自給自足的目標。

柒、未來展望

本研究成功地設計出 LED 的充放電裝置，並找出 LED 發電的關鍵因素，但礙於材料的限制，最後之實驗僅能做理論推導，若能透過廠商的幫忙將理論的想法實現，並用實驗證實再加以改良，使其充電功能更為強大，最後透過 Fresnel 透鏡將短路電流放大，一定可以讓這個發現更有應用價值，使 LED 成為可充電又可放電的產品。

捌、參考資料

- 一、康軒文教事業(2014)。自然與生活科技第六冊。**第一章 電與生活**。台北：康軒文教事業。
- 二、康軒文教事業(2014)。自然與生活科技第五冊。**第四章 電**。台北：康軒文教事業。
- 三、康軒文教事業(2014)。自然與生活科技第三冊。**第四章 光與色**。台北：康軒文教事業。
- 四、焦耳小偷 <http://www.geekfans.com/thread-54343-1-1.html>
- 五、光生伏打 <http://www.zwbk.org/MyLemmaShow.aspx?zh=zh-tw&lid=212846>
- 六、蕭德仁(2005)。**提升太陽能電池發電效率參數與機構之研究**。正修科技大學機電工程研究所碩士論文。
- 七、蔡進譯(2005)。超高效率太陽電池-從愛因斯坦的光電效應談起。**物理雙月刊**，27(5)，701-719。

【評語】 030112

很完備的工作呈現，表現出 LED 發電及充電的功能，參賽者在電路結構很用心，可在光電材料充放電的物理方面多研讀，以期有更佳表現。