

# 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 工程學科(二)科

**第三名**

052402

**什麼？雷射筆差很大！**

學校名稱：國立金門高級中學

作者：  高一 洪 曄  高一 蔡依辰	指導老師：  李育賢  王哲剛
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：二極體、雷射筆、通電曲線

## 摘要

本研究針對 LED 與雷射筆進行探究，並歸納出一些特別的性質，探討通電的特性與類太陽能板的性質。我們意外發現市售綠光雷射筆，發出的光線經光譜儀可以確定除了綠光波長，還有紅外光，綠光雷射筆是由共振腔與增益介質共同組成，對照紅光與藍光雷射筆，發現紅藍光雷射筆就是 LED 光源，我們以紅藍綠三色的 LED 燈源以光柵實驗，配合 I-V 曲線的量測到的閾值電壓，再用本科展所發現的方法可以有系統的細部區別紅光與藍光雷射筆的材料特性。

此外，我們自行製作了 LED 陣列當作實驗儀器，來測量 LED 照光的通電 I-V 曲線。實驗結果所量到的短路電流  $I_{sc}$  遠小於一般市售的太陽能電池，是因為 LED 為了提升發光效率，在 PN 結的位置有許多的量子井，以利電子和電洞結合放出光子。

## 壹、研究動機

在高一的物理課中，我們學習到了光的干涉現象以及普朗克常數、光電方程式的概念，我們對普朗克常數感到好奇，並發現今年(2018)，國際基本的單位制中，最後依據測量實際物體做為標準的基本單位公斤，將以普朗克常數重新定義，於是請教老師要怎麼以我們目前的知識找尋出它，老師說以高中生的程度，或許可以利用光電方程式來找出，但需要實驗才能找到光子的電壓與波長，於是我們找了相關資料，並設計了實驗，用來得知 LED 的 I - V 關係，以及用光柵求出  $\Delta y$ ，而且相關的實驗中，意外的發現了 LED 和 LASER 的特殊性質，因此又繼續發現了一連串的新奇現象，並決定開始製作科展作品。

## 貳、研究目的

LED 在照光通電的過程中，會有和太陽能電池有相似的特性，在正極和負極產生端電壓，如果接上電路則會產生電流，我們意外的發現，雷射筆頭也有相同的特性。我們以不同顏色的 LED 與雷射筆頭互相照光，研究不同顏色 LED 與雷射筆頭的通電 I-V 曲線之特性，在本作品中，發現簡單的方法找到雷射筆頭的構造差異。

## 參、研究設備及器材

### 一、 實驗器材

- (一) 紅藍綠三色雷射筆、紅藍綠 LED 燈、光柵眼鏡、100 公分的尺
- (二) 無段式電源供應器、三用電表、單色發光二極體並聯陣列（串聯 1 個  $10k\Omega$  的電阻）
- (三) 1.5V 乾電池\*3、萬用麵包板、可變電阻、杜邦線、單芯線

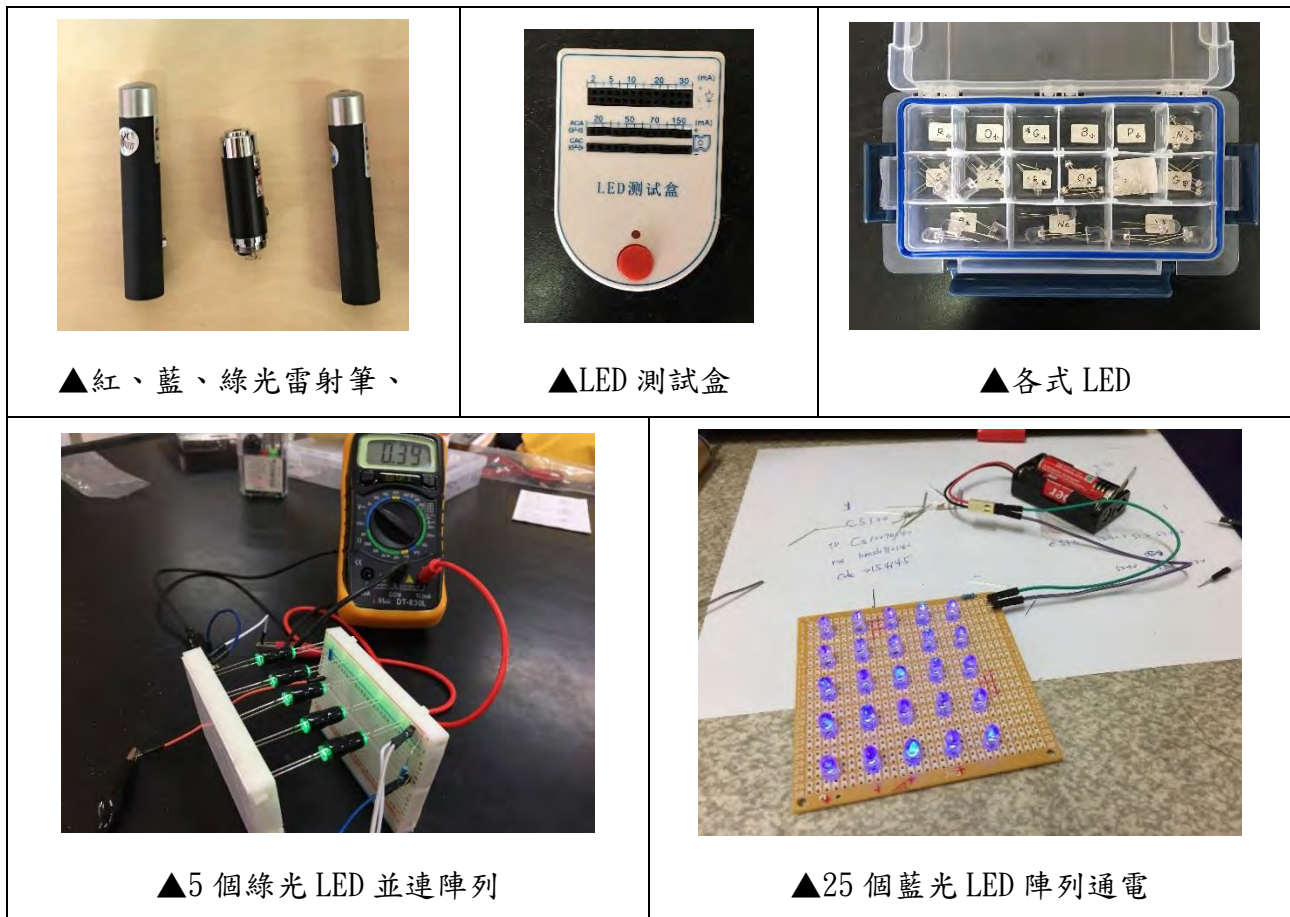


圖 1-實驗相關設備

### 二、 陣列說明

在實驗中，如果只使用一組 LED 做照光，僅能測量到電壓，其產生的電流太小，一般三用電表無法測量，因此我們試做了 5 個 LED 和 25 個 LED 並聯的陣列，利用電路並聯的特性  $I_{\text{總}} = I_1 + I_2 + \dots$ ，來將電流的數值放大，以利 I -V 曲線的量測。根據實驗結果，25 個 LED 的陣列效果較 5 個 LED 的陣列來得好，因此模組化通電陣列，並連後來觀測微弱電流。

## 肆、研究方法與結果

### 實驗一、繞射亮紋量測




	<p>說明(一)</p> <p>我們在黑板上固定一 1m 的尺(L 為 1 公尺)，分次架上 LED (用 LED 測試盒) 紅、藍、綠光，再找出光柵眼鏡 (<math>d=500\text{lines/mm}</math>) 與黑板的固定距離 (一公尺)，將 LED 的高度調成與視線高度平行，接著進行光源判斷與測量，由一人敘述、確認光點或某一色光位置，另一人畫記，並多次測量記錄數據。</p>
	<p>說明(二)</p> <p>因雷射光強度較強，故可藉由投射在黑板反射來判讀，所以光源放在受試者的後方，同時也發現斜射與直射的結果沒有差別，為了安全起見，採用斜射方式降低亮度，且較為方便。同樣也是使用相同的光柵眼鏡，與黑板的距離也為一公尺，雷射光點高度與視線平行。總共測量了紅綠藍三色光，多次數據取平均值。</p>
	<p>說明(三)</p> <p>此圖為 LED 經過光柵眼鏡到肉眼所看到的實際情況，在尺的刻度零位置的光點和光源距離就是 <math>\Delta y</math>。</p>

圖 2-光柵實驗操作說明

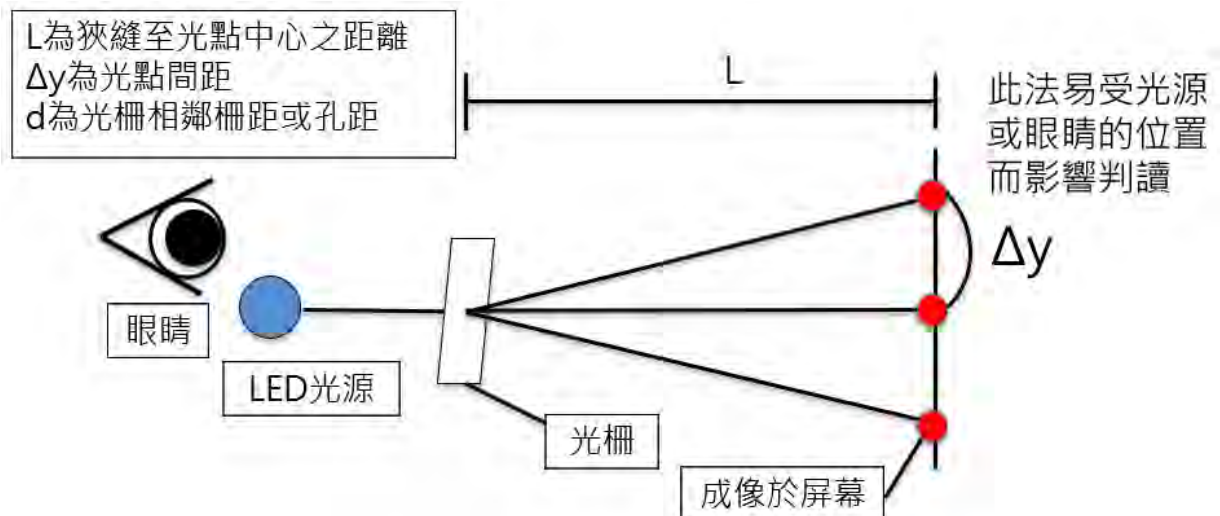


圖 3 - 一般高中課程觀測繞射條紋的方法

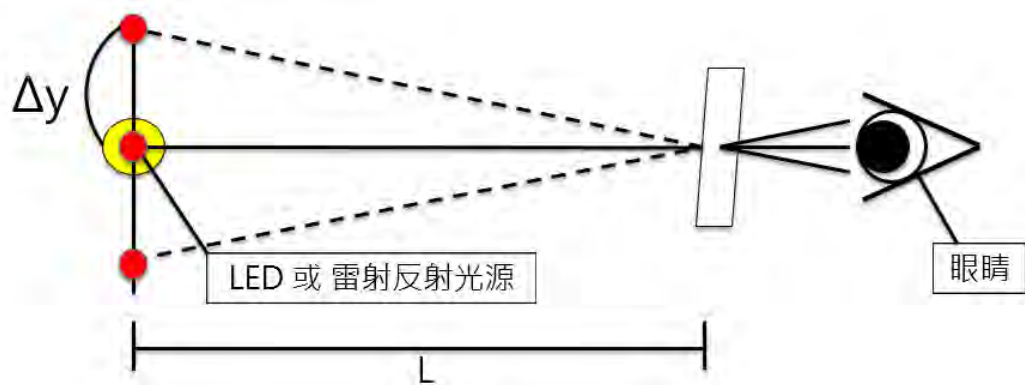


圖 4-本次實驗以反射光觀察，有效減少實驗誤差

我們實驗後發現，用眼睛直接以光柵觀測，不受雷射筆入射方向的影响，可以有效減少實驗誤差，而且，以反射光線觀察，也較不傷眼睛，意外的發現這個值得推廣的觀測方法。LED 的部份因為中央光源太亮，沒有明確的點，所以量測時用兩條第一亮紋的距離  $2\Delta y$  做記錄量測。

表 1 - 雷射光源光柵(干涉)條紋間距，量測值為  $\Delta y$ ，單位(m)

雷射源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光	0.323	0.332	0.331	0.336	0.334	0.330	0.327	0.329	0.330	$0.330\pm 0.001$
綠光	0.274	0.273	0.278	0.279	0.276	0.272	0.275	0.274	0.274	$0.275\pm 0.001$
藍光	0.204	0.212	0.206	0.216	0.214	0.208	0.209	0.211	0.205	$0.209\pm 0.001$

表 2 - LED 光源光柵(干涉)條紋間距，量測值為  $2\Delta y$ ，單位(m)

LED 源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光	0.647	0.649	0.644	0.641	0.640	0.642	0.649	0.643	0.648	$0.644\pm 0.001$
綠光	0.548	0.552	0.543	0.537	0.557	0.539	0.540	0.542	0.543	$0.545\pm 0.002$
藍光	0.475	0.458	0.439	0.446	0.447	0.432	0.451	0.441	0.446	$0.448\pm 0.004$

## 實驗二、LED 接收體電壓量測

### (一) 實驗方法

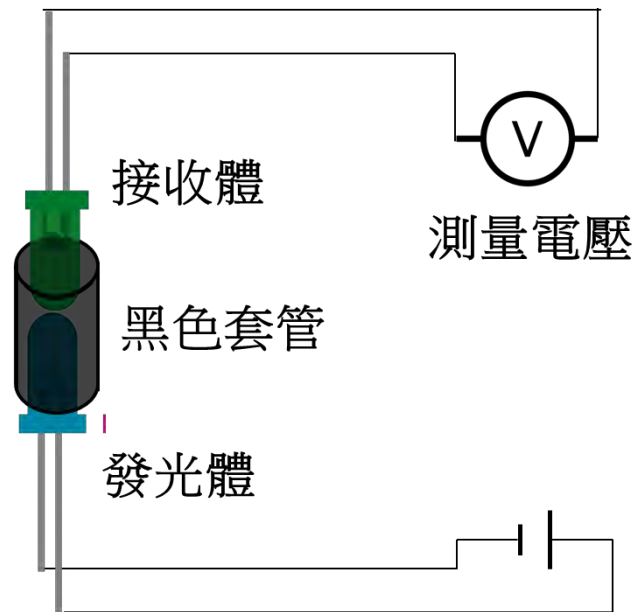


圖 5-實驗方法示意圖，避免環境變因，使用管套住兩個 LED 燈泡

(二) 實驗結果

我們將紅光(R)、黃光(Y)、綠光(G)、藍光(B)、白光(W)等不同色光的 LED 接在特定電流下，照射另一個 LED，並且使用三用電表測量其電壓值，實驗結果如下列表格所示。

表 3

發光體 接收體	R	Y	G	B	W
R	0.99±0.01	1.08±0.01	1.29±0.01	1.25±0.01	1.29±0.01
Y	0.01±0.00	0.97±0.01	1.41±0.01	1.31±0.01	1.34±0.02
G	0.00±0.00	0.00±0.00	1.48±0.02	1.79±0.01	1.59±0.01
B	0.00±0.00	0.00±0.00	0.26±0.00	1.89±0.02	2.01±0.02
W	0.00±0.00	0.02±0.00	0.00±0.00	0.38±0.00	1.18±0.01

▲接收體 LED 被照光後電壓值，單位：伏特(V)，輸入電壓 9V

▲接收體 LED 被照光後，以短一級波長發射體 LED 照射後的電壓值較高

由上述的實驗歸納出下表，若 R 照 R 以 RR 表示，Y 照 R 以 YR 表示，下表由以由相同 LED 的互照連成一條線區分成 2 區，且由實驗明顯可知，YR 值比 RR 值高，GY 值會比 YY 值高，BG 值會比 GG 值高，相同的 LED 互照不如較短一級波長的 LED 照射的電壓值來得高。



這個現象可以使用斯托克位移(stokes shift)來解釋，由參考資料「LED 工程師基礎概念與應用」第八章可知斯托克位移的物理意義為放射光子的能量將低於吸收光子。如圖所示，其激發與放射光譜最高峰之能量差，短波長的發光體 LED 可以激發長波長的發射體 LED。同色 LED 互照電壓值較小的原因，也可以由斯托克位移來解釋這個現象。至於紅光照黃光的 RY 組以及綠光照藍光的 GY 組，有測量到微小的電壓，我們推測是因為這兩組的波長十分靠近，因此被照光的 LED 才會產生電壓。

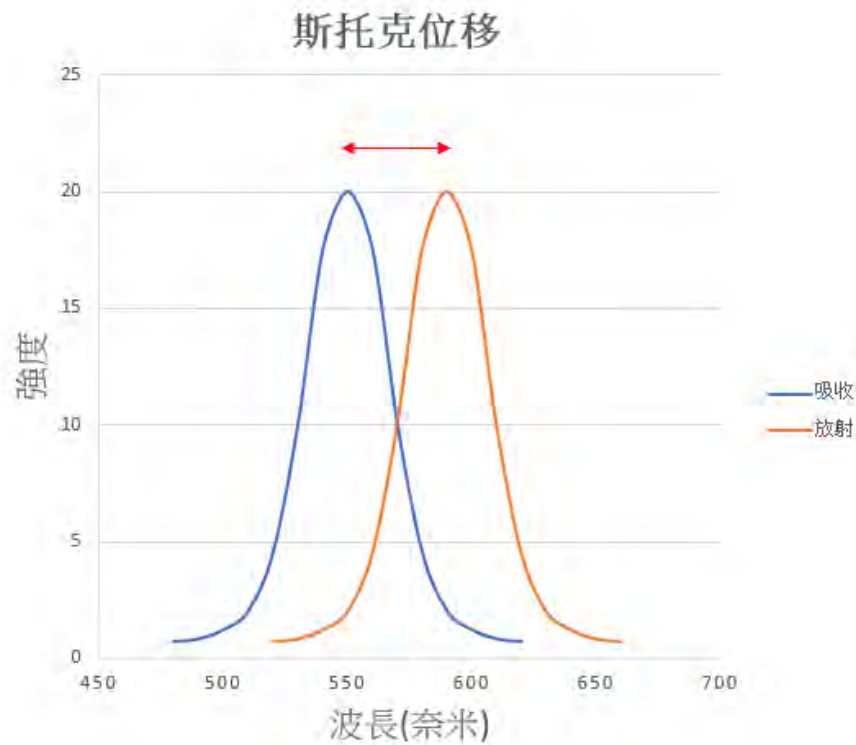


圖 6-斯托克位移示意圖

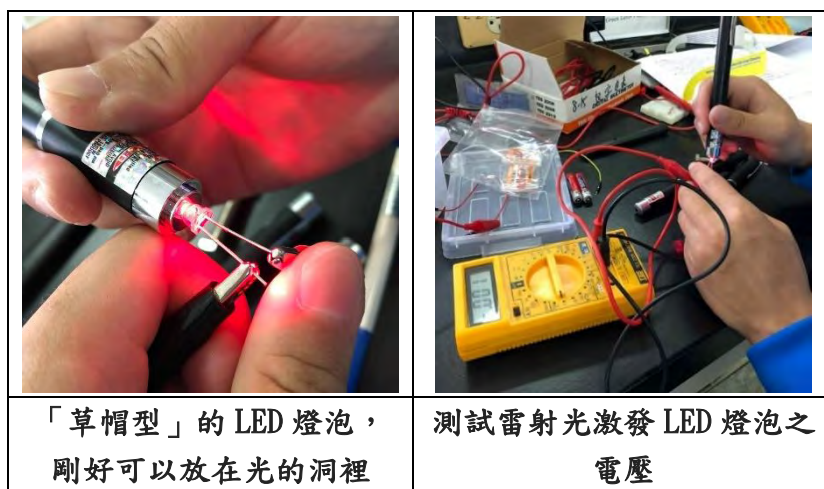


圖 7-實驗操作圖，為測試雷射光激發 LED 燈泡之電壓的近態寫真

我們為了實驗準確性，找了一款「草帽型」的 LED 燈泡，其大小剛好可以放置在雷射筆發射光的洞裡，去除照射角度可能造成的誤差，並用手圈住此裝置，排除日光燈的影響。先在 LED 正負極接上三用電錶，按下雷射筆後多次測量紀錄電壓值。測試雷射光激發 LED 燈泡之電壓實驗設備全圖，分別用紅藍綠三色雷射光個別照射紅、黃、綠、藍、白五色 LED 燈泡



圖 8-雷射筆照 LED 示意圖

表 4-LASER 照 LED (最大值)，單位：伏特 V

發光體 (雷射筆) 接收體 LED	R	G	B
R	1.58±0.02	1.39±0.01	0.94±0.01
Y	0.00±0.00	1.57±0.02	0.43±0.01
G	0.03±0.01	0.01±0.01	1.99±0.01
B	0.04±0.01	0.00±0.00	2.45±0.03
W	0.00±0.00	0.00±0.00	1.87±0.01

我們發現，綠光雷射筆照射綠光 LED 的產生的電壓值為 0，於是我們使用光譜分析儀，來檢視各 LED 與雷射光的光譜，以確定其波長。(詳細數據可查參考資料二)。

其中可以發現，紅光雷射筆照 G 與 B，有微弱的電壓，主要是因為以相同輸入電壓時，紅光的強度明顯比綠光還有藍光強，因此本次實驗不時會有類似的現象產生，(可由後面實驗圖 14 做解釋)。



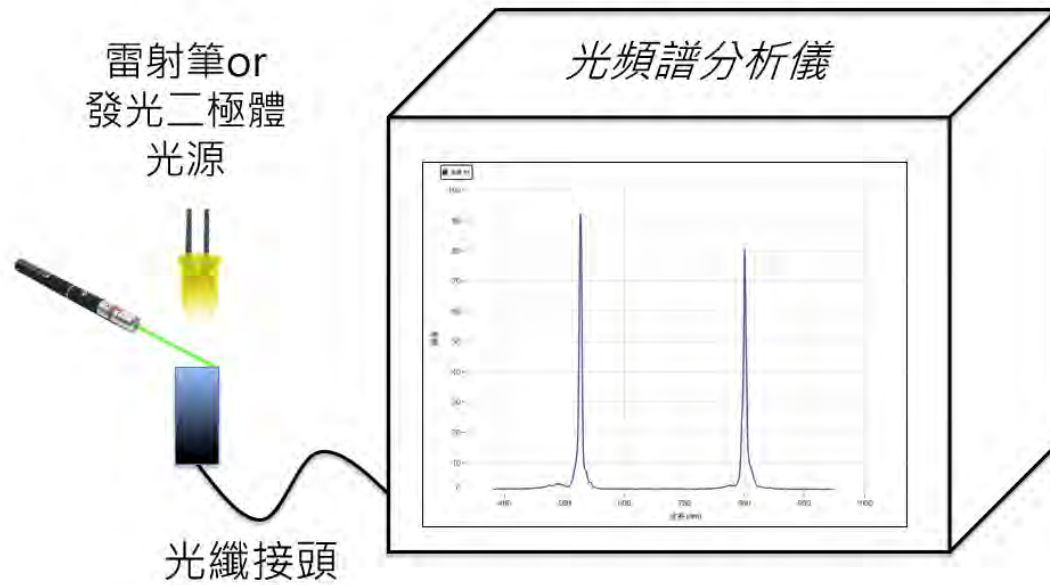


圖 9-光譜儀示意圖，圖為綠光雷射筆的光譜圖

在觀察的時候，綠光雷射筆有兩個峰值，可以發現除了綠光以外，還有一個 808nm 的波段出現，對照綠光 LED 的光譜，我們可以發現，綠光 LED 的波長較綠光雷射筆短。

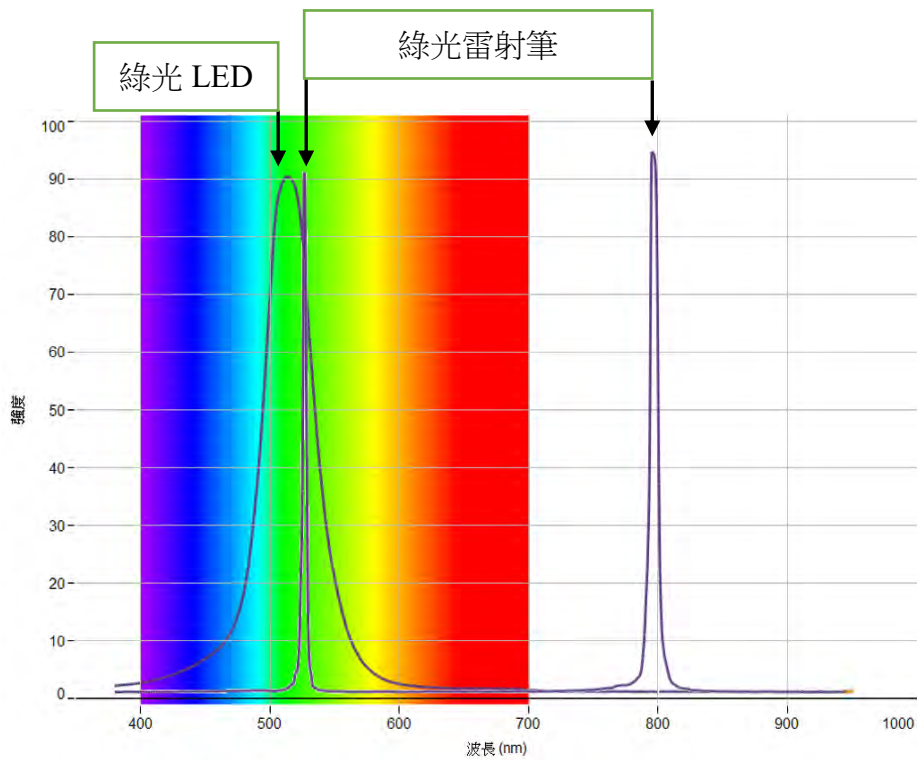


圖 10-綠光雷射筆與綠光 LED 光譜疊合圖

實驗三、雷射筆頭接收體電壓量測



圖 11-雷射筆當做接收體示意圖

(一)LED 照 LASER 頭

表 5、Test1

接收體：紅光 LASER 頭，發光體：紅黃綠藍白五色 LED

LED 源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光	0.133	0.148	0.156	0.272	0.185	0.260	0.207	0.206	0.276	0.205±0.017
黃光	0.148	0.155	0.166	0.251	0.179	0.252	0.156	0.248	0.248	0.200±0.015
綠光	0.188	0.248	0.224	0.357	0.205	0.384	0.193	0.233	0.199	0.248±0.023
藍光	0.229	0.189	0.262	0.359	0.234	0.379	0.220	0.238	0.364	0.275±0.023
白光	0.158	0.154	0.283	0.198	0.255	0.368	0.199	0.248	0.239	0.234±0.021

單位：伏特 (V) (取實驗最大值)

表 6、Test2

接收體：藍光 LASER 頭，發光體：紅黃綠藍白五色 LED

LED 源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光	0.202	0.230	0.219	0.247	0.235	0.178	0.213	0.220	0.117	0.207±0.012
黃光	0.143	0.113	0.201	0.217	0.116	0.123	0.198	0.114	0.120	0.149±0.014
綠光	0.242	0.257	0.163	0.270	0.246	0.229	0.233	0.213	0.222	0.231±0.010
藍光	0.265	0.193	0.290	0.290	0.180	0.256	0.188	0.237	0.246	0.238±0.013
白光	0.256	0.182	0.167	0.167	0.190	0.235	0.265	0.237	0.243	0.216±0.012

單位：伏特 (V) (取實驗最大值)

## (二)LASER 照 LASER 頭

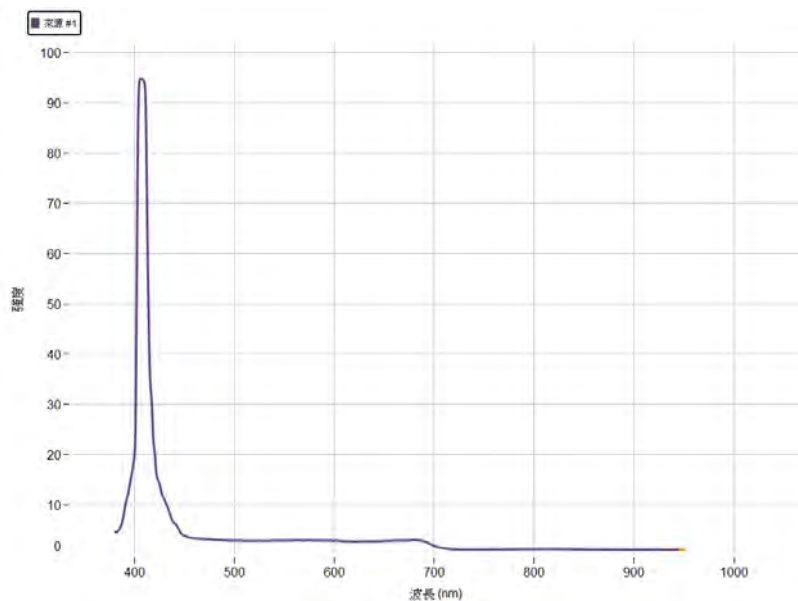


圖 12- 藍光雷射筆光譜圖，沒有像綠光雷射筆有兩個峯值

把雷射筆當作接收體，發現非常特別的現象：每個 LED 都能激發藍光雷射筆。且本次實驗，綠光雷射筆頭無法被光激發出電壓，推測發光的二極體被共振腔擋住所導致

表 7、Test1

接收體：紅光 LASER 頭，發光體：紅綠藍三色 LASER

雷射源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光	0.492	0.491	0.488	0.487	0.489	0.493	0.499	0.495	0.486	0.491±0.001
綠光	0.508	0.505	0.510	0.506	0.504	0.505	0.503	0.504	0.508	0.506±0.001
藍光	0.505	0.505	0.504	0.510	0.501	0.512	0.513	0.515	0.509	0.508±0.002

單位：伏特 (V)

表 8、Test2

接收體：藍光 LASER 頭，發光體：紅綠藍三色 LASER

雷射源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光	0.213	0.200	0.218	0.215	0.203	0.219	0.210	0.200	0.199	0.209±0.003
綠光	0.362	0.351	0.370	0.356	0.369	0.360	0.367	0.359	0.352	0.361±0.002
藍光	0.493	0.480	0.500	0.485	0.499	0.496	0.497	0.482	0.486	0.491±0.003

單位：伏特 (V)

雷射筆照射雷射筆一樣發現，藍光的雷射筆同樣可以被各色的雷射筆激發出電壓。

## 實驗四：LED 與雷射筆的通電特性

### (一)LED 的通電曲線

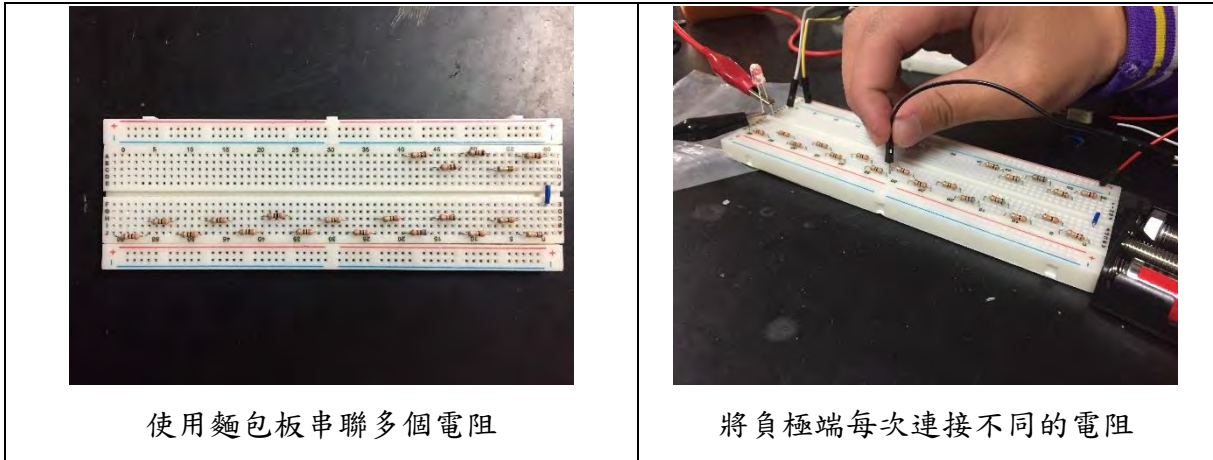


圖 13-LED 的通電曲線實驗方法，改變電阻

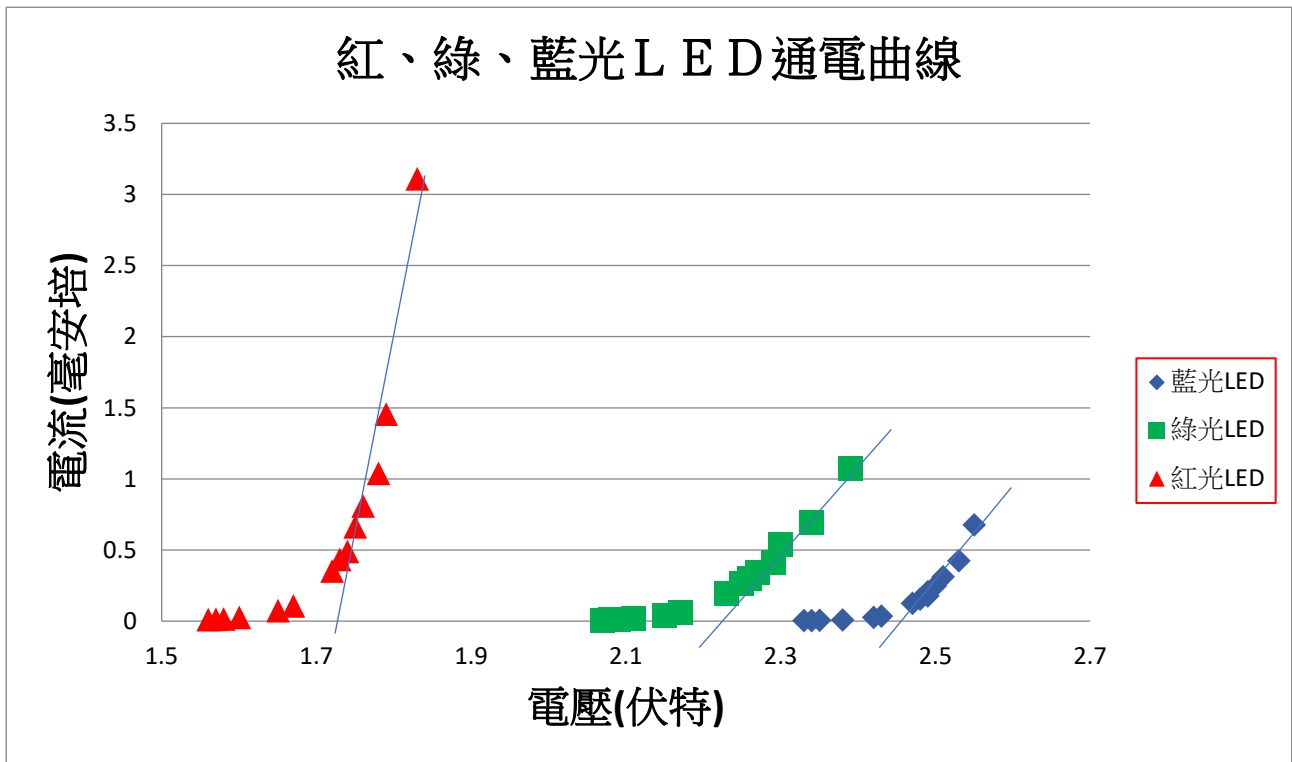


圖 14-三色 LED 的 I-V 曲線

將紅、藍、綠三原色的實驗結果放入同一張表可以得知，紅光 LED 可以用較小的電壓，輸出較大的電流，表示紅光 LED 在相同供應的電壓下，強度較強。

根據實驗數據畫出來的 LED I-V 曲線圖，可以很明顯的看出並非線性函數，也就是說電壓和電流的比值不是定值，不符合歐姆定律，因此驗證了 LED 屬於非歐姆式導體。LED 的 I-V 曲線圖隨著電壓增加，電流值大幅度的增加，這種情況在數學上稱為指數函數，LED 電流和電壓的函數可以用下列方程式表示，

$$I = I_s \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right)$$

$I$  代表電流， $V$  是電壓， $q$  代表一個電子的電量， $k_B$  是波次曼常數， $T$  是絕對溫度。 $I_s$  為逆向飽和電流 (Reverse Saturation Current)，當加在二極體上的電壓  $V$  為負時， $e^{\frac{qV}{k_B T}} = 0$ ， $\therefore I = -I_s$ ，故名之。為了找到各色 LED 的閾值電壓，我們以 excel 輸入直接部份的數據，找到直線方程式後，以此方程式找到截距，即為閾值電壓。

測量物	直線方程式	截距，閾值電壓(V)
紅光 LED	$y = 8.43x - 14.08$	1.76
綠光 LED	$y = 5.48x - 12.07$	2.20
藍光 LED	$y = 3.85x - 9.320$	2.42

### 實驗五、雷射筆頭通電特性

我們把紅光與綠光的雷射筆通電曲線找到直線方程式，並找到截距

測量物	直線方程式	截距，閾值電壓(V)
紅光雷射筆	$y = 0.047x - 0.078$	1.66
綠光雷射筆	$y = 0.406x - 0.695$	1.71

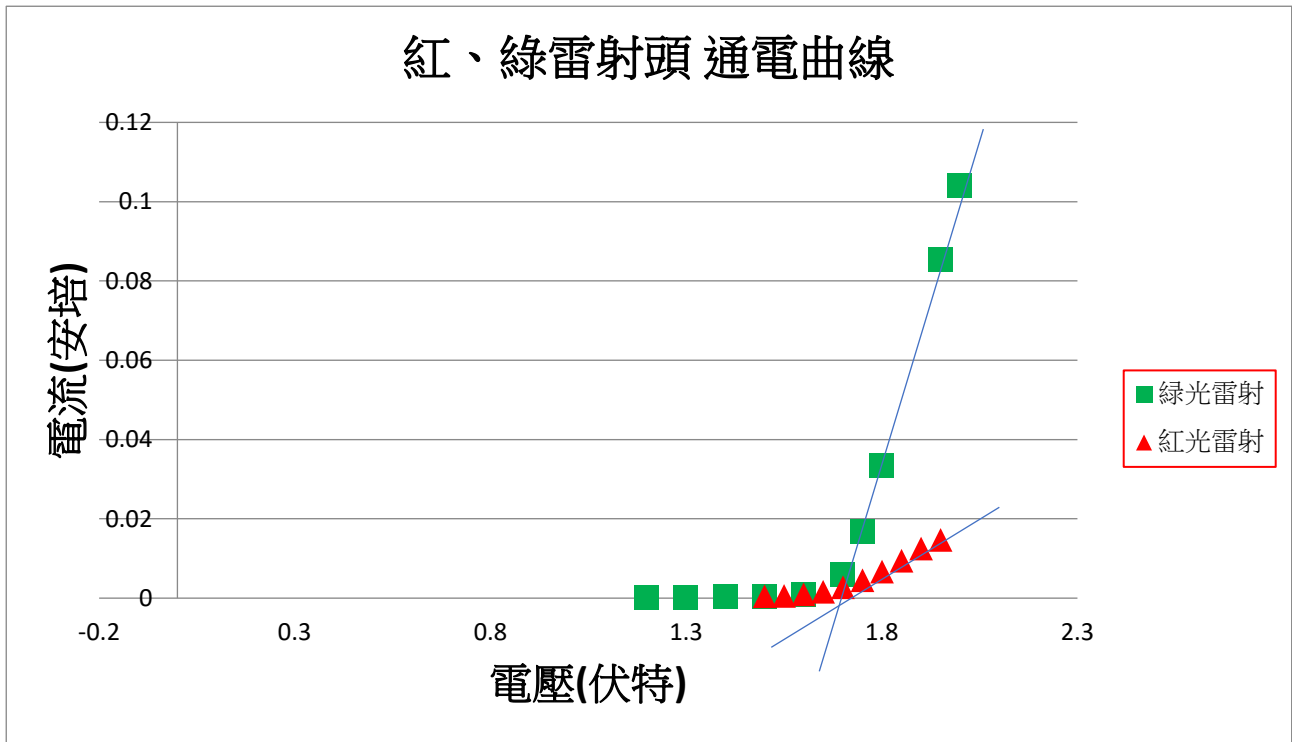


圖 15-紅光綠光雷射筆的 I-V 曲線

我們由高中物理課本可以得知光電方程式為

$$eV = \frac{hc}{\lambda}$$

並由干涉的公式可以得知

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d} \text{ 可以得到 } \lambda = \frac{\Delta y \cdot d}{L}$$

把普朗克常數  $h$ 、距離  $L$ 、光柵間距(雙狹縫寬度) $d$ 、電子電量  $e$ 、量到的亮紋距離 $\Delta y$

$$V = \frac{hc \cdot L}{\Delta y \cdot d \cdot e}$$

其中在計算理論電壓時， $\Delta y$ 代入平均標準差計算出理論電壓亦含平均標準差值。

表 9、由光柵的干涉結果推測理論閾值電壓與實際的電壓對照表

樣品	$\Delta y(m)$	理論電壓	I-V 曲線電壓	誤差：(理論-實際)/理論
紅 LED	$0.322 \pm 0.001$	$1.925 \pm 0.001$	1.76	8.6%
綠 LED	$0.273 \pm 0.001$	$2.275 \pm 0.002$	2.20	3.3%
藍 LED	$0.224 \pm 0.002$	$2.768 \pm 0.004$	2.42	12.6%
紅雷射	$0.330 \pm 0.001$	$1.879 \pm 0.001$	1.66	11.7%
綠雷射	$0.275 \pm 0.001$	$2.254 \pm 0.001$	1.71	24.1%
藍雷射	$0.209 \pm 0.001$	$2.966 \pm 0.001$	0.83	72.0%



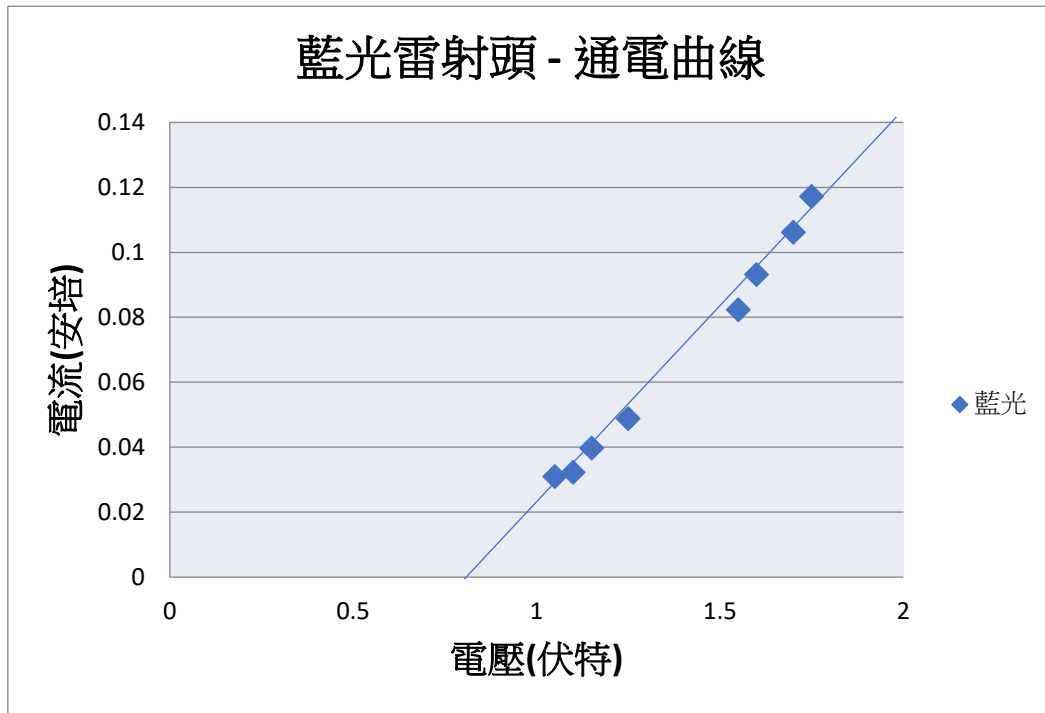


圖 16-藍光雷射筆的 I-V 曲線

藍光的雷射頭非常容易燒掉，因此我們做了很多次以後(燒掉多支藍光雷射筆)，把某次較佳的實驗結果呈現如上，可以發現，藍光雷射筆頭的閾值電壓明顯的較紅光低，以 LED 的特性來說，這是個很特別的現象。

**藍光雷射通電曲線直線方程式  $y = 0.122x - 0.101$ ，截距為 0.83(V)**

表 10、藍光 LED 與藍光雷射筆的數據對照

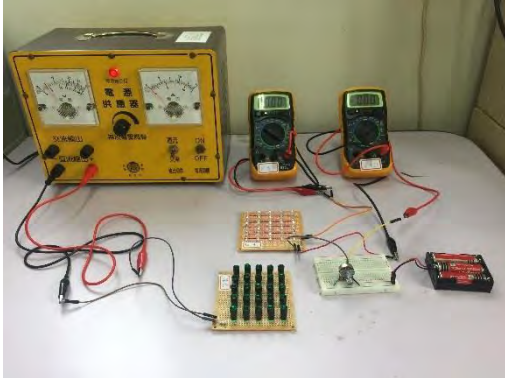
樣品	$\Delta y(m)$	理論電壓	I-V 曲線電壓	誤差：(理論-實際)/理論
藍 LED	$0.224 \pm 0.002$	$2.768 \pm 0.004$	2.42	12.6%
藍雷射	$0.209 \pm 0.001$	$2.966 \pm 0.001$	0.83	72.0%

藍光的 LED 實驗結果與藍光雷射筆的 I-V 曲線對照後可以發現，雷光雷射筆的誤差高達 257.3%，這出乎意料的數字會在結果與討論四特別的來探討。

## 實驗七：LED 陣列照光的通電曲線

### (一)實驗方法

在實驗一：發光體 LED 與接收體 LED 的實驗中，我們知道接收體 LED 最佳的吸收波段可以利用 Stokes shift 來解釋。因此我們選擇了兩組實驗來進行，分別是藍光 LED 照射綠光 LED、綠光 LED 照射紅光 LED。由於單一個接收體 LED 所測到的電流太小，我們使用自製的 LED 陣列來進行實驗，實驗裝置如圖所示。

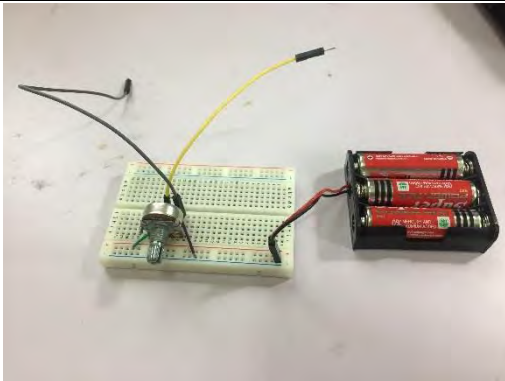


1、有黑色套管的為發射體 LED 陣列，無套管的為接收體 LED 陣列。

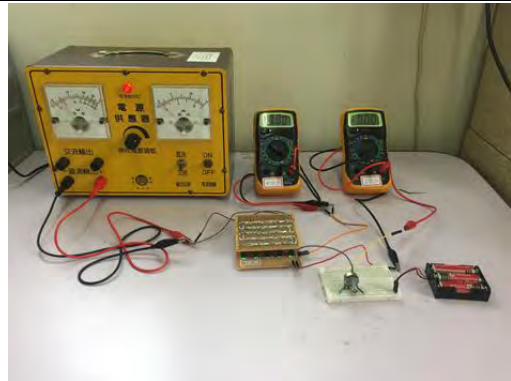


2、將兩組陣列組合，可以測得接收體 LED 陣列的短路電流  $I_{SC}$

(圖中短路電流  $I_{SC} = -1.0\mu A$ )



3、串聯 3 個 1.5V 的乾電池當作接收體 LED 的電源，使用可變電阻來調整輸入電壓。



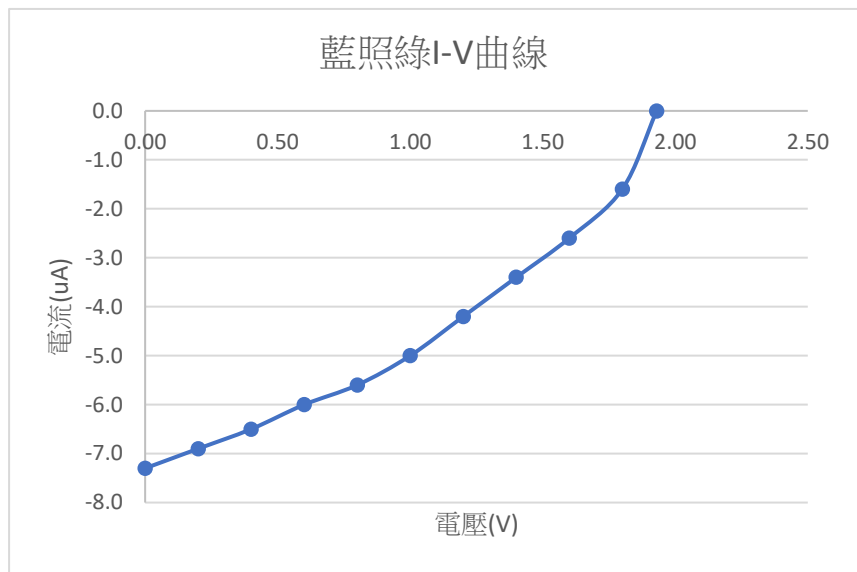
4、逐步調整接收體的電壓直到短路電流  $I_{SC} = 0.0\mu A$

(圖中短路電流  $I_{SC} = 0.0\mu A$ ，電壓  $V = 1.30V$ )

圖 17、陣列實驗步驟說明

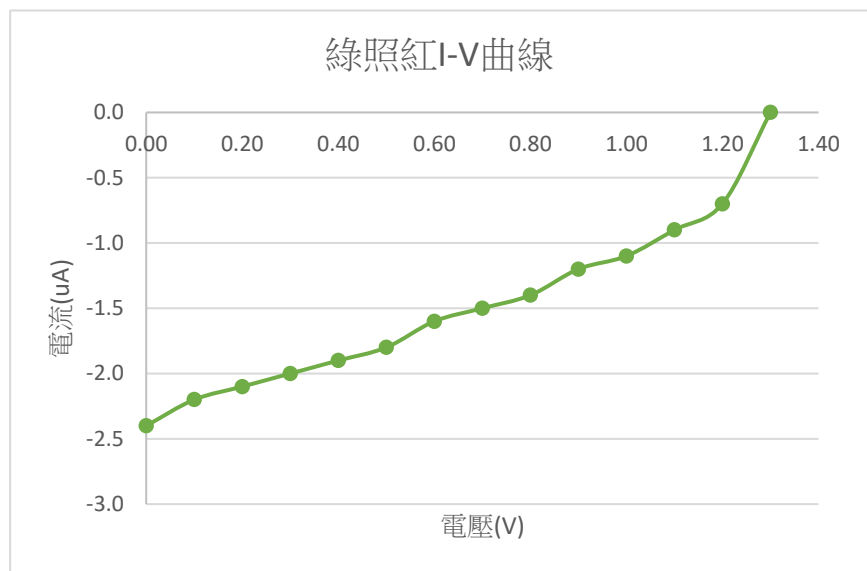
(二)實驗結果

藍光照綠光	
電壓(V)	電流( $\mu A$ )
0.00	-7.3
0.20	-6.9
0.40	-6.5
0.60	-6.0
0.80	-5.6
1.00	-5.0
1.20	-4.2
1.40	-3.4
1.60	-2.6
1.80	-1.6
1.93	0.0



\*藍光 LED 陣列電壓為 2.50V

綠光照紅光	
電壓(V)	電流( $\mu A$ )
0.00	-2.4
0.10	-2.2
0.20	-2.1
0.30	-2.0
0.40	-1.9
0.50	-1.8
0.60	-1.6
0.70	-1.5
0.80	-1.4
0.90	-1.2
1.00	-1.1
1.10	-0.9
1.20	-0.7
1.30	0



\*綠光 LED 陣列電壓為 2.20V

## 伍、討論

### 一、導體與半導體的探討

國中課本中有提到若是一個導體在通電的過程中，電壓和電流的比值等於定值，這種符合歐姆定律的導體，稱為歐姆式導體，反之，若是電壓和電流的比值並非定值，則稱為非歐姆式導體。在查詢 LED 的資料時，就知道 LED 屬於非歐姆式導體，因此我們設計了實驗來驗證 LED 是否為歐姆式導體。

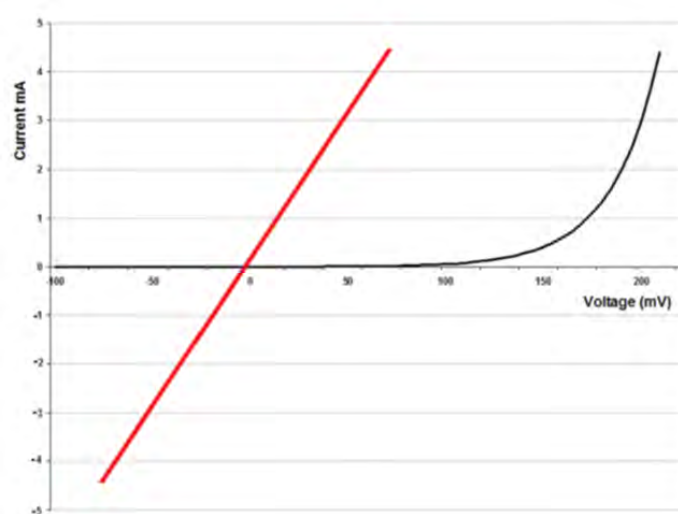


圖 18、-歐姆式導體(紅線)與非歐姆式導體(黑線)的通電 I-V 曲線圖

在做這個實驗時，學校內並沒有無段式的電源供應器，因此我們在使用電池串聯提供高電壓，接著利用電阻可以降低電壓的特性，使用麵包板串聯多個電阻，就可以得到多種電壓，由此來量測 LED 的通電 I-V 曲線。我們使用的 LED 為單色光 LED（紅、綠、藍）做各種實驗測量。

### 二、太陽能電池(光電二極體)與 LED(發光二極體)的差異

太陽能電池又名光電二極體，也是二極體的一種，太陽能電池在照射光線時，兩端電路會出現短路電流  $I_{SC}$ ，光線越強  $I_{SC}$  越大， $I_{SC}$  大小與光線成正比。電池兩端持續短路是可以允許的，並不會損壞太陽電池，這與一般電源系統禁止短路是不相同的。

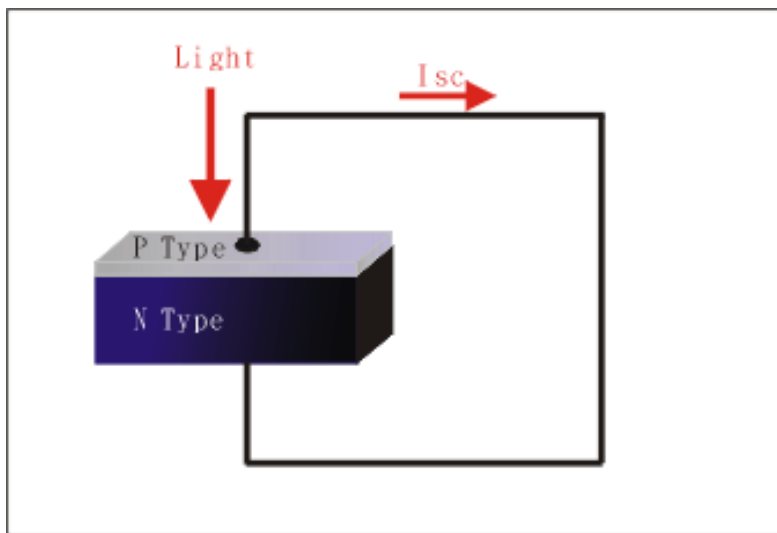


圖 19、太陽能電池兩端短路會有一電流  $I_{sc}$

的 I-V 曲線如下圖，藍色為沒有照光時的曲線，紅色為照光後的曲線，照光後會有短路電流  $I_{sc}$ ，隨著電壓提高到最佳工作電流  $V_{mp}$  會有對應的最佳工作電流  $I_{mp}$  後，其電流值急劇下降到 0，此時的電壓稱為開路電壓  $V_{oc}$ 。

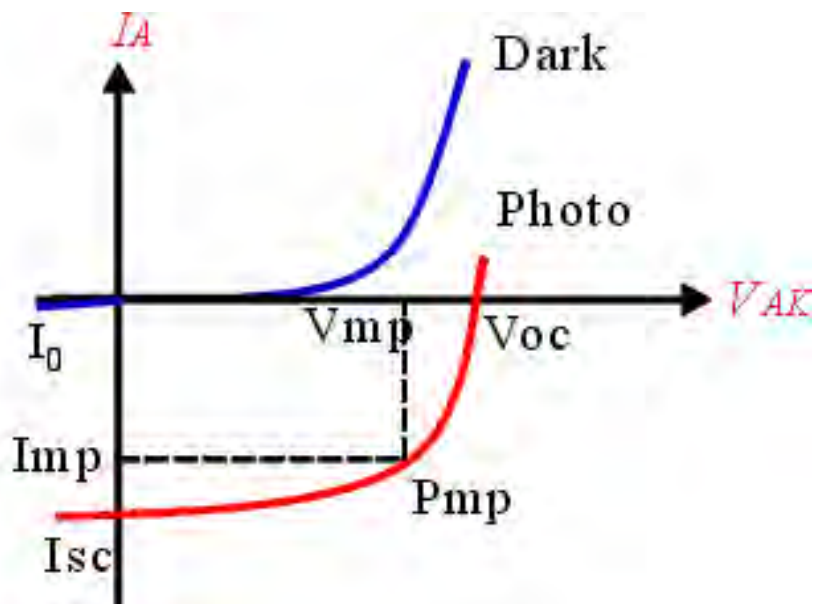


圖 20、太陽能電池的通電 I-V 曲線

同樣為是二極體的 LED，又名發光二極體，也有和太陽能電池相似的特性，我們將實驗七：LED 陣列照光的通電曲線，得到的 I-V 曲線標出其  $I_{SC}$ 、 $I_{mp}$ 、 $V_{mp}$ 、 $V_{OC}$ 。

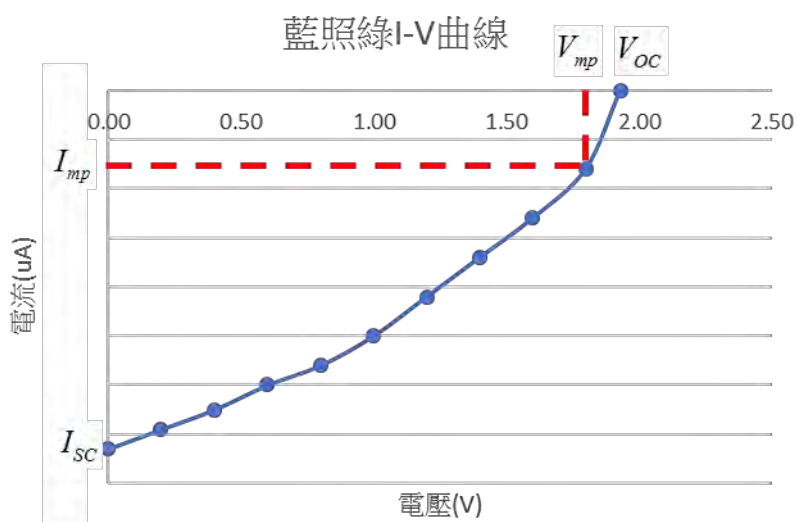


圖 21、藍 LED 陣列照綠 LED 陣列 I-V 曲線

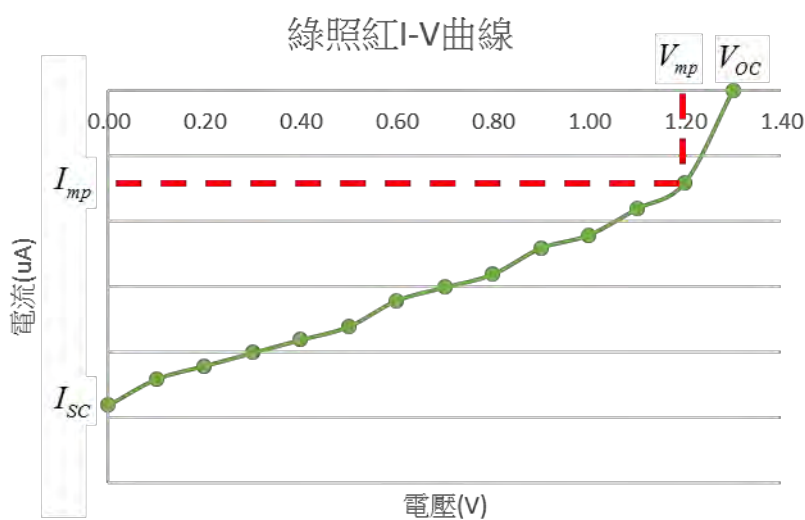


圖 22、綠 LED 陣列照紅 LED 陣列 I-V 曲線

表 11、 $I_{SC}$ 、 $I_{MP}$ 、 $V_{MP}$ 、 $V_{OC}$  的數值表格

	$I_{SC}$	$I_{mp}$	$V_{mp}$	$V_{OC}$
藍照綠	-7.3	-1.6	1.80	1.93
綠照紅	-2.4	-0.7	1.20	1.30
單位	微安培 ( $\mu A$ )		伏特 ( $V$ )	



一般太陽能電池的  $I_{SC}$  介於-0.5~-3.5A 之間，我們製作的 LED 陣列所產生的  $I_{SC}$  卻只有微安培( $\mu A$ )的大小，有推測與 LED 本身的結構有關係。以下我們比較太陽能電池(光電二極體)，以及 LED(發光二極體)的結構差異。

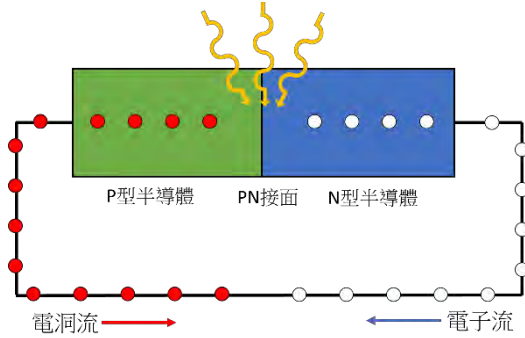
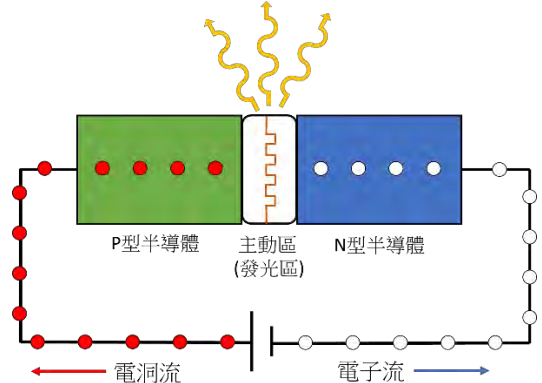
光電二極體	發光二極體
	
<p>在 PN 結的地方光子的能量驅動電子和電洞往兩邊擴散，因而形成電流。</p>	<p>因為外加電壓，P 型半導體的電洞與 N 型半導體的電子均往主動區的部分擴散，當電子和電洞複合，就會放出光子，因此稱為發光二極體。</p>

圖 23、光電二極體與發光二極體的差異

在發光二極體的結構中，為了要提升發光的效率，因此在主動區的結構會設計量子井，提高電子和電洞結合的機率。我們推測正是因為量子井的結構，造成 LED 在照光時，其外部的光子要驅動電子和電洞往兩邊擴散形成電流時，必須先克服量子井的能量，因此大大降低了其短路電流  $I_{SC}$  的大小。

我們根據實驗的結果，發現可以利用 Stokes shift 的理論，選定兩組 LED 陣列，做為實驗裝置，分別為藍光照綠光組，以及綠光照紅光組。實驗結果得到 LED 照光後的短路電流雖然遠小於一般市售太陽能電池，但其 I-V 曲線和太陽能電池一樣，當電壓到達  $V_{mp}$  後，電流會急遽下降。因為 LED 有量子井的能量障礙，在未來若是想要提升其照光後的  $I_{SC}$ ，可以使用透鏡將照光的能量集中，這樣一來就可以克服量子井的限制，提高  $I_{SC}$  的量值，甚至將 LED 照明設備也能當作太陽能電池，達到節省電能的效果。

### 三、紅藍綠雷射筆的內部構造探討

表 12、雷射三要素：能量源、增益介質、共振腔，目前市售雷射的其整理列表

	能量源	增益介質	共振腔	倍頻晶體
紅光	乾電池	砷化鋁鎵(AlGaAs) 二極體雷射	有	無
綠光	808nm 二極體雷射	摻釹釩酸鈮(Nd:YVO4) (放出 1064nm) 固態二極體	有	磷酸態化鉀(KTP) 放出(532nm)
藍光	乾電池	氮化鎵鎵(InGaN) 二極體雷射	有	無

紅光與藍光都是二極體雷射，其中以綠光較不一樣，綠光是由波長 808nm 的二極體雷射激發 Nd:YVO4 晶體產生波長 1064nm 的光，再透過倍頻晶體 KTP 讓產生波長 532nm 的綠光，這也是為何在測量綠光雷射的波長時，在特殊角度(感測器非垂直接收)時，會有 808nm 的波長出現。綠光是屬於固態雷射，體積也較紅、藍光雷射筆來得笨重，架構如下表格。

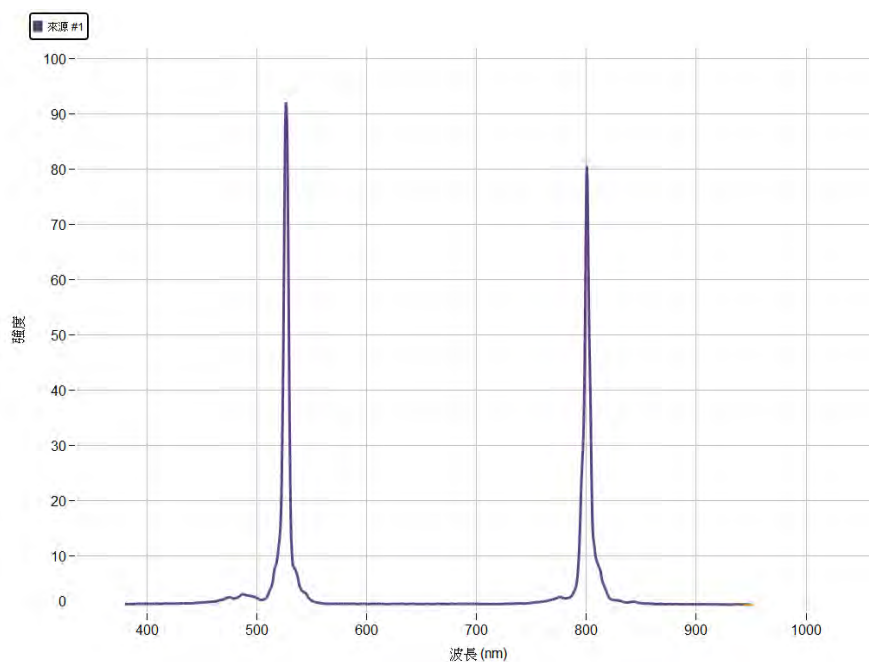


圖 24-量測綠光雷射(532nm)波長時，在特定角度會出現 808nm 的光

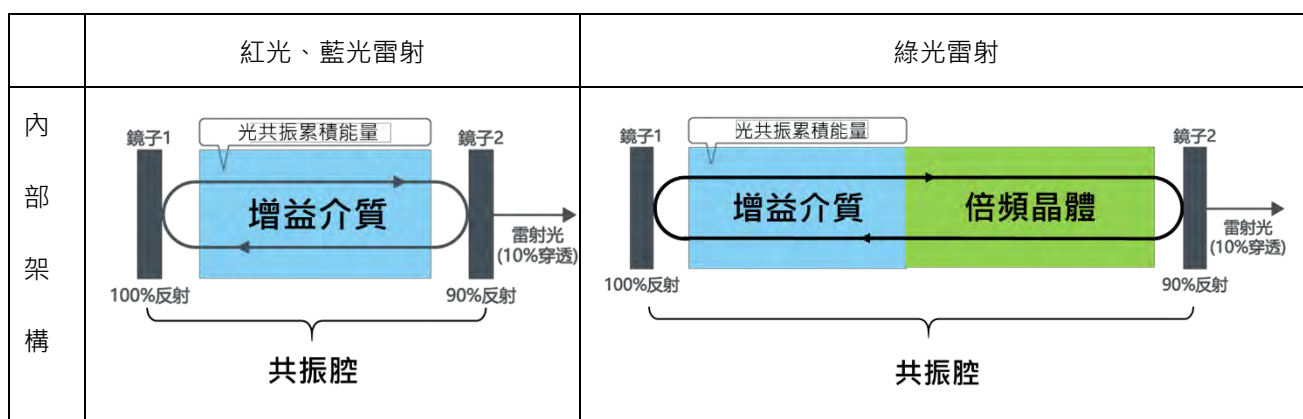


圖 25-雷射筆構造比較

#### 四、LED 燈照雷射頭的特殊性質

因為氮化鎵鎵(InGaN)化合物的能隙範圍在 0.7 eV 到 3.4 eV 之間，幾乎涵蓋了太陽光譜全部的波長範圍，也因此，可見光 LED 在照射藍光雷射時，就像是把藍光雷射的增益介質氮化鎵鎵(InGaN)當做是光電二極體(太陽能電池)，因此能夠量得到電壓。

表 13、紅光與紫光二極體數據

	波長(nm)	頻率(Hz)	能量
紅光	780	$3.85 \times 10^{14}$	1.59 eV
紫光	380	$7.89 \times 10^{14}$	3.26 eV

因此，我們可以針對藍光雷射的頭可以確定一件事，就是我們實驗後的 I-V 曲線得到的閾值電壓為 0.828 主要為藍光雷射頭的材質為複合性材料，綠光雷射筆最初的光源不是綠光，很有可能是紅光。

表 14、由光柵的干涉結果推測理論閾值電壓與實際的電壓對表及構造推測

樣品	$\Delta y(m)$	理論閾值電壓	閾值電壓	誤差	構造
紅 LED	$0.322 \pm 0.001$	$1.925 \pm 0.001$	1.76	8.6%	紅光 LED
綠 LED	$0.273 \pm 0.001$	$2.275 \pm 0.002$	2.20	3.3%	綠光 LED
藍 LED	$0.224 \pm 0.002$	$2.768 \pm 0.004$	2.42	12.6%	藍光 LED
紅雷射	$0.330 \pm 0.001$	$1.879 \pm 0.001$	1.66	11.7%	紅光 LED
綠雷射	$0.275 \pm 0.001$	$2.254 \pm 0.001$	1.71	24.1%	有倍頻晶體
藍雷射	$0.209 \pm 0.001$	$2.966 \pm 0.001$	0.83	72.0%	(InGaN)混合物

註：綠光雷射筆與紅光 LED 閾值電壓誤差為 11.2%，藍光雷射筆與紅光 LED 閾值電壓誤差為 56.9%

## 陸、結論

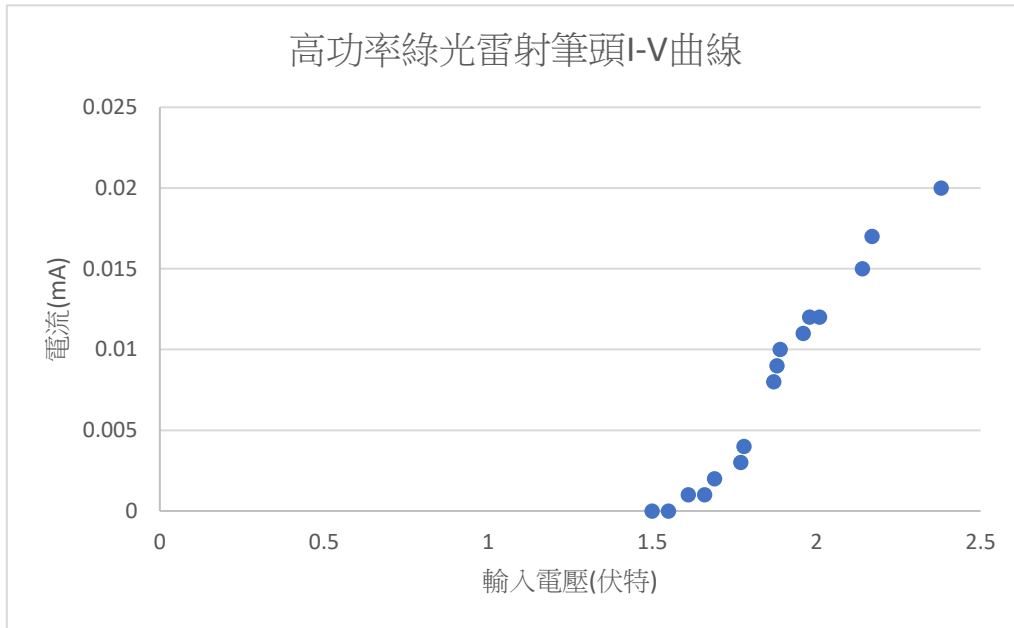
- 一、LED 互照的實驗中發現，相同的 LED 互照不如較短一級波長的 LED 照射的電壓值來得高，以史托克位移理論可以完美解釋本現象。
- 二、因為 LED 有量子井的結構，照光後需要克服量子井的能量障礙，所以其短路電流遠小於一般市售太陽能電池。但實驗後發現，其 I-V 曲線和太陽能電池一樣，當電壓到達  $V_{mp}$  後，電流會急遽下降。
- 三、由雷射筆的通電曲線，可以得知藍、綠 2 色的雷射筆與原色的 LED 有明顯的差異，主要是因為市售藍、綠光雷射筆與 LED 的半導體材料與結構有所不同。
- 四、由 LED 的與紅光雷射筆通電曲線配合光柵實驗，我們可以找到其理論對應的閾值電壓與實際通電曲線的結果相符，但是藍光與綠光雷射筆頭的 I-V 曲線得到的閾值電壓套入光電方程式不符合該色光的所對應的閾值電壓。
- 五、用本科展發現的實驗過程，可以不破壞雷射筆的情況下，探究雷射筆的構造。
- 六、綠光雷射筆頭無法被光激發出電壓，原因為倍頻晶體阻礙了外部的光進入。
- 七、藍光雷射筆可被各波段的光照射後，激發出電壓，與藍光 LED 特性不同。

## 柒、參考資料及其他

- 一、中華民國光電協會(2012)。LED 工程師基礎概念與應用。五南書版
- 二、陳偉珩 2016。發光二極體的神秘面紗。中華民國第 56 屆中小學科學展覽會作品
- 三、高涌泉等。高中基礎物理<一>。龍騰出版
- 四、金華成金屬。太陽能電池的原理。取自：<http://www.jhcsolar.com.tw/jhc/known/index.html?subfun=3>
- 五、洪艾疆譯(2016)。最後的單位原器。取自：<http://sa.ylib.com/MagArticle.aspx?Unit=newscan&id=3219>
- 六、羅姆半導體集團。電子小百科。取自：[http://www.rohm.com.tw/web/taiwan/ld\\_what1](http://www.rohm.com.tw/web/taiwan/ld_what1)
- 七、卓俊佑等(2016)。雷射光頻轉換，取自：[http://psroc.org.tw/Bimonth/article\\_detail\\_acc.php?classify=p1&cid=113](http://psroc.org.tw/Bimonth/article_detail_acc.php?classify=p1&cid=113)
- 八、黃曉薇(2014)。含漸變銦含量主動層的氮化銦鎵太陽能電池。中央大學碩士班論文
- 九、師大科學園。實驗數據的處理。取自：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=Notes/dataProcess>
- 十、高涌泉等。高中選修物理下冊。龍騰出版

## 附錄

### 一、高功率綠光雷射筆的 I-V 曲線



附圖 1、閾值電壓與低功率綠光雷射筆相同

### 二、高功率綠光雷射筆照射紅光、藍光雷射筆輸出電壓值

附表 1、接收體：紅光、藍光 LASER 頭，發光體：高功率綠光 LASER

接收源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光雷射	0.448	0.461	0.453	0.455	0.445	0.444	0.456	0.449	0.450	0.451±0.002
綠光雷射	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000±0.000
藍光雷射	0.479	0.412	0.456	0.457	0.443	0.467	0.477	0.444	0.452	0.454±0.007

單位：伏特 (V)。註：高功率照射與一般市售雷射筆數值差異不大。

### 三、高功率綠光雷射筆照各 LED 輸出電壓值

附表 2、接收體：紅光、藍光 LASER 頭，發光體：高功率綠光 LASER

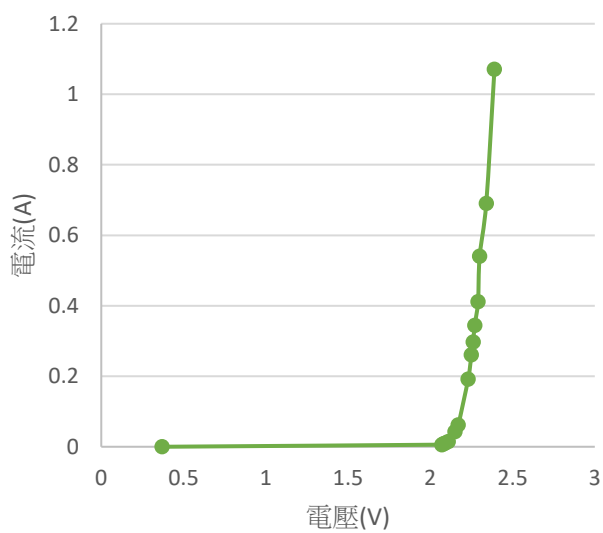
接收源	次數 1	次數 2	次數 3	次數 4	次數 5	次數 6	次數 7	次數 8	次數 9	平均±平均標準差
紅光 LED	1.214	1.190	1.201	1.211	1.199	1.205	1.206	1.197	1.188	1.201±0.003
黃光 LED	1.578	1.573	1.577	1.579	1.569	1.568	1.573	1.578	1.580	1.575±0.001
綠光 LED	0.110	0.096	0.111	0.105	0.099	0.101	0.106	0.107	0.102	0.104±0.002
藍光 LED	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002±0.000
白光 LED	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000±0.000

單位：伏特 (V)。註：高功率照射與一般市售雷射筆數值差異不大。

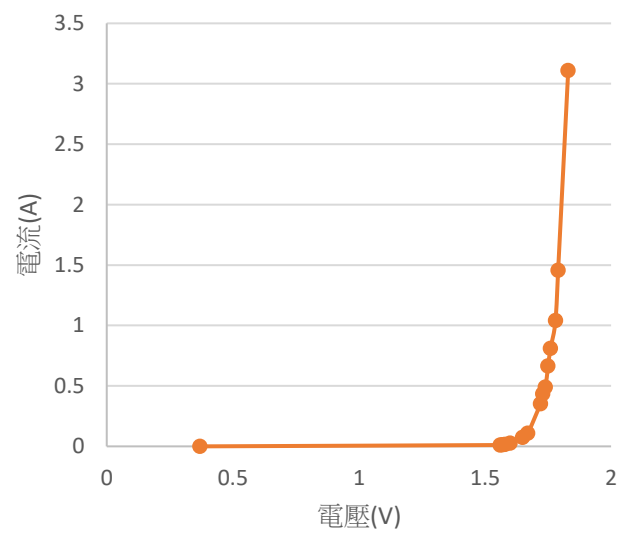
#### 四、各色LED的I-V曲線

紅光 LED	電壓 (V)	0.37	1.56	1.57	1.58	1.6	1.65	1.67	1.72	1.73	1.74	1.75	1.76	1.78	1.79	1.83
	電流 (A)	0	0.011	0.013	0.016	0.026	0.074	0.109	0.353	0.434	0.491	0.665	0.81	1.04	1.456	3.11
綠光 LED	電壓 (V)	0.37	2.07	2.08	2.09	2.11	2.15	2.17	2.23	2.25	2.26	2.27	2.29	2.3	2.34	2.39
	電流 (A)	0	0.006	0.008	0.01	0.015	0.043	0.062	0.192	0.261	0.297	0.344	0.412	0.541	0.69	1.071
藍光 LED	電壓 (V)	0.73	2.33	2.34	2.35	2.38	2.42	2.43	2.47	2.48	2.49	2.49	2.5	2.51	2.53	2.55
	電流 (A)	0	0.004	0.005	0.006	0.01	0.026	0.037	0.125	0.156	0.178	0.207	0.249	0.313	0.425	0.677

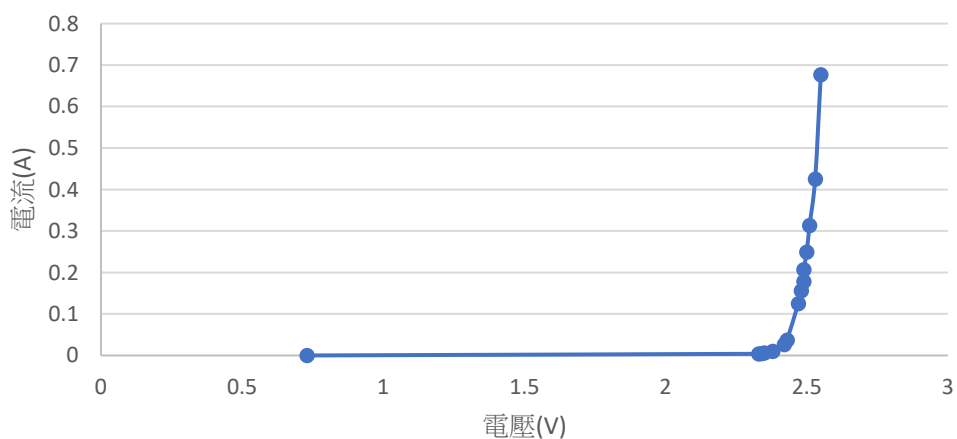
#### 綠光LED I-V曲線



#### 紅光LED I-V曲線



#### 藍光LED I-V曲線





## 【評語】 052402

本作品針對 LED 與雷射筆進行探究，發現以 LED 照光通電的過程中，和太陽能電池有相似的特性；以不同顏色的 LED 與雷射筆頭互相照光，研究其通電 I-V 曲線之特性，發現市售綠光雷射筆，發現綠光雷射筆是由共振腔與增益介質共同組成。報告中研究目的是在找出雷射筆頭構造差異，對現有產品構造再以科學實驗去發現，學術價值稍弱。報告之撰寫宜參考學術報告之格式，公式變數宜清楚定義。圖及表宜有簡明標題。本作品在學術與實用價值可再強化。



## 摘要

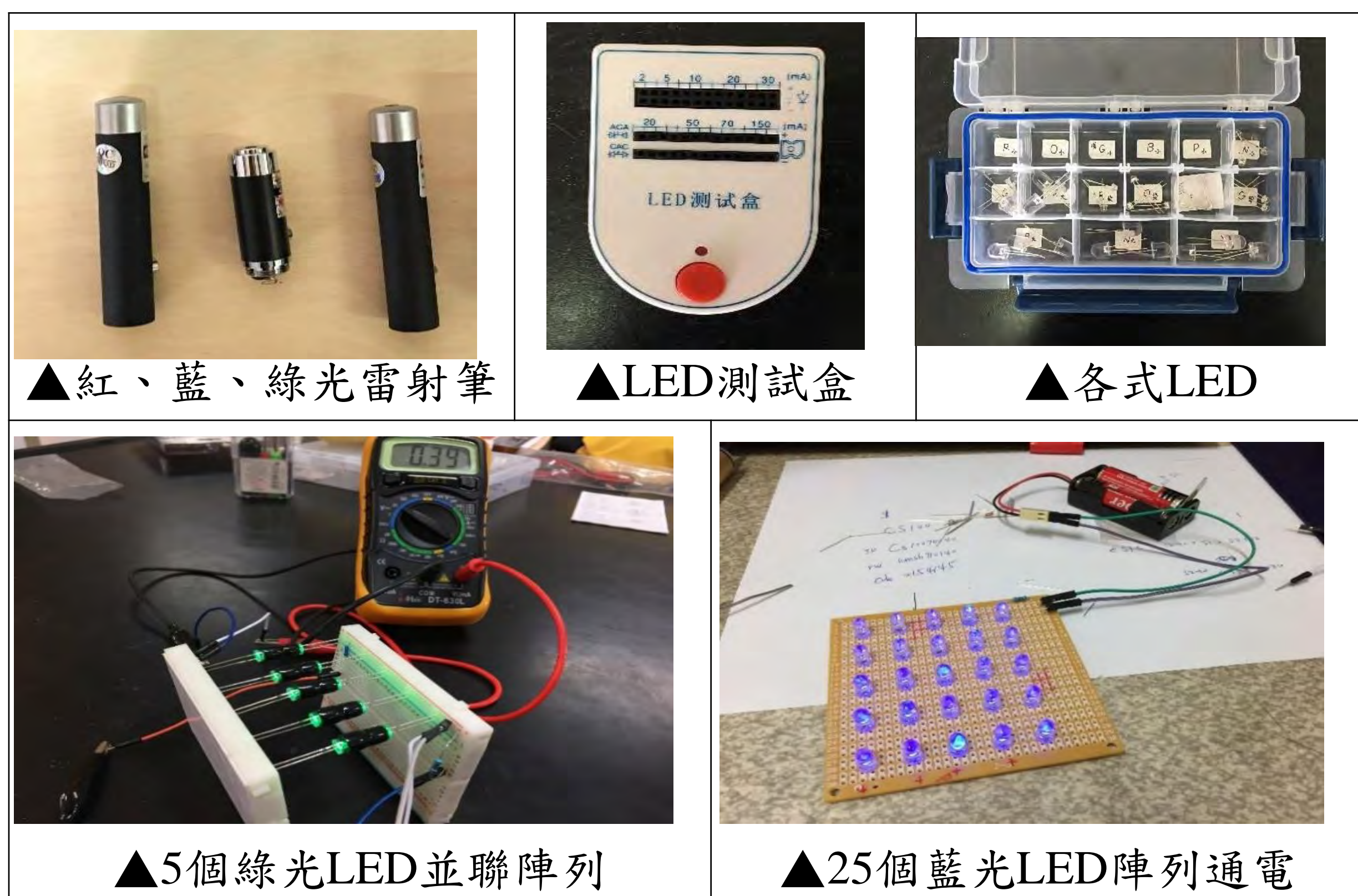
本研究針對LED與雷射筆進行探究，並歸納出一些特別的性質，探討通電的特性與類太陽能板的性質。我們意外發現市售綠光雷射筆，發出的光線經光譜儀可以確定除了綠光波長，還有紅外光，綠光雷射筆是由共振腔與增益介質組成，對照紅光與藍光雷射筆，發現紅藍光雷射筆就是LED光源，我們以紅藍綠三色的LED燈源以光柵實驗，配合I-V曲線的量測到的閾值電壓，再用本科展所發現的方法可以有系統的細部區別紅光與藍光雷射筆的材料特性。

此外，我們自行製作了LED陣列當作實驗儀器，來測量LED照光的通電I-V曲線。實驗結果所量到的短路電流  $I_{sc}$  小於一般市售的太陽能電池，是因為LED為了提升發光效率，在PN結的位置有許多的量子井，以利電子和電洞結合放出光子。

## •研究動機

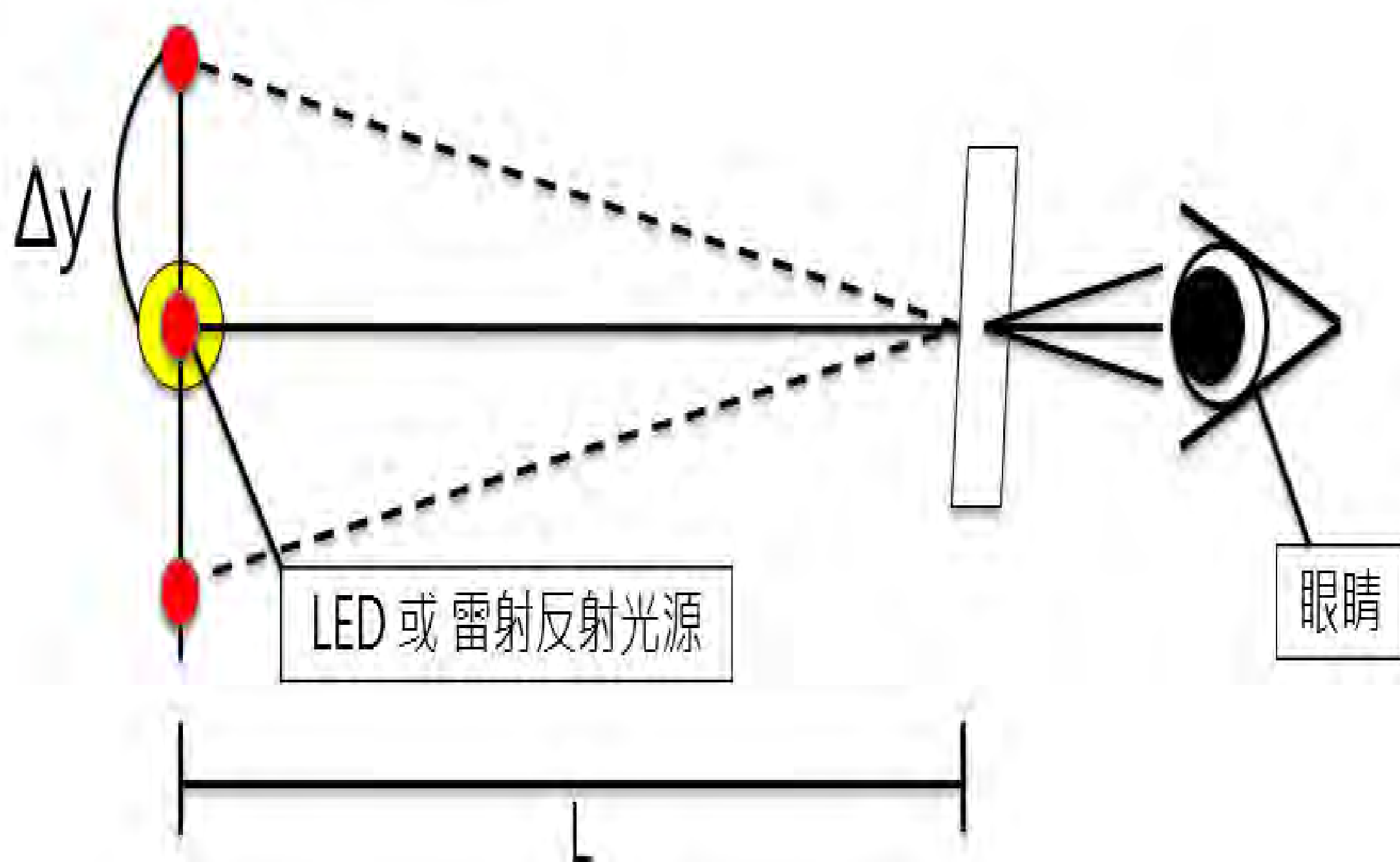
在高一的物理課中，我們學習到了光的干涉現象以及普朗克常數、光電方程式的概念，我們對普朗克常數感到好奇，並發現今年(2018)，國際基本的單位制中，最後依據測量實際物體做為標準的基本單位公斤，將以普朗克常數重新定義，於是請教老師要怎麼以我們目前的知識找尋出它，老師說以高中生的程度，或許可以利用光電方程式來找出，但需要實驗才能找到光子的電壓與波長，於是我們找了相關資料，並設計了實驗，用來得知LED的I-V關係，以及用光柵求出 $\Delta y$ ，而且相關的實驗中，意外的發現了LED和LASER的特殊性質，因此又繼續發現了一連串的新奇現象，並決定開始製作科展作品。

## •研究設備及器材



## •研究方法與結果

### •實驗一、繞射亮紋量測



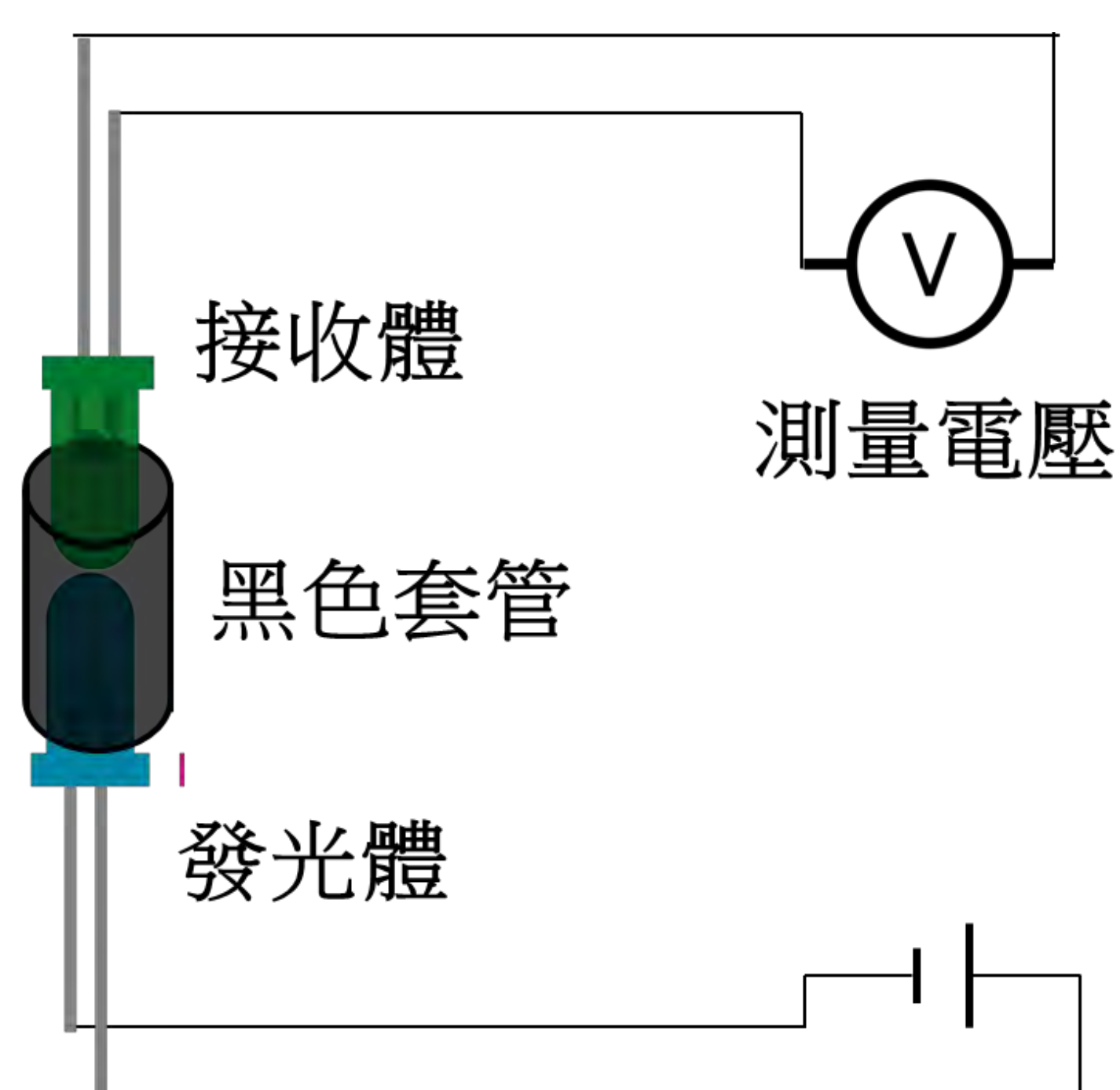
雷射源	次數1	次數2	次數3	次數4	次數5	次數6	次數7	次數8	次數9	平均±平均標準差
紅光	0.323	0.332	0.331	0.336	0.334	0.330	0.327	0.329	0.330	0.330±0.001
綠光	0.274	0.273	0.278	0.279	0.276	0.272	0.275	0.274	0.274	0.275±0.001
藍光	0.204	0.212	0.206	0.216	0.214	0.208	0.209	0.211	0.205	0.209±0.001

表1-雷射光源光柵(干涉)條紋間距，量測值為 $\Delta y$ ，單位(m)

LED燈	次數1	次數2	次數3	次數4	次數5	次數6	次數7	次數8	次數9	平均±平均標準差
紅光	0.647	0.649	0.644	0.641	0.640	0.642	0.649	0.643	0.648	0.644±0.001
綠光	0.548	0.552	0.543	0.537	0.557	0.539	0.540	0.542	0.543	0.545±0.002
藍光	0.475	0.458	0.439	0.446	0.447	0.432	0.451	0.441	0.446	0.448±0.004

表2-LED光源光柵(干涉)條紋間距，量測值為 $2\Delta y$ ，單位(m)

## 實驗二、LED接收體電壓量測



發光體 接收體	R	Y	G	B	W
R	0.99±0.01	1.08±0.01	1.29±0.01	1.25±0.01	1.29±0.01
Y	0.01±0.00	0.97±0.01	1.41±0.01	1.31±0.01	1.34±0.02
G	0.00±0.00	0.00±0.00	1.48±0.02	1.79±0.01	1.59±0.01
B	0.00±0.00	0.00±0.00	0.26±0.00	1.89±0.02	2.01±0.02
W	0.00±0.00	0.02±0.00	0.00±0.00	0.38±0.00	1.18±0.01

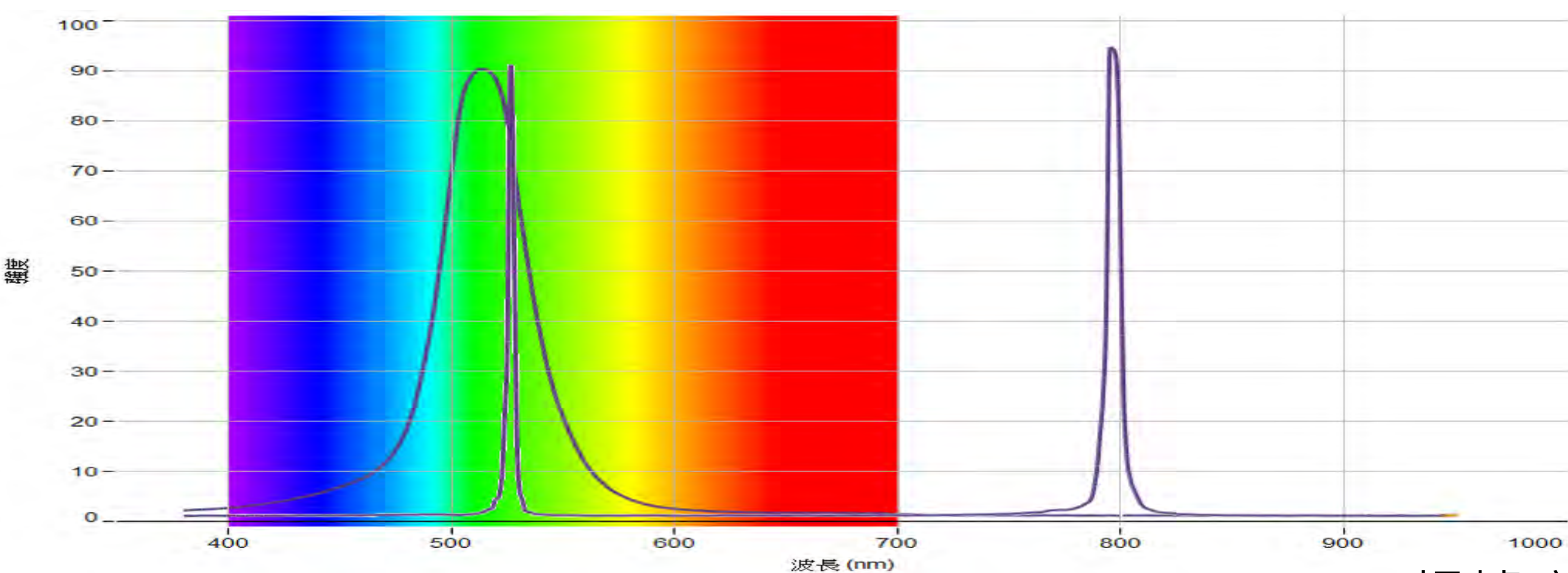
▲接收體LED被照光後電壓值，單位：伏特(V)，輸入電壓9V

▲以短一級波長發射體LED照射後的電壓值較高



接收體 LED \ 發光體 (雷射筆)	R	G	B
R	1.58±0.02	1.39±0.01	0.94±0.01
Y	0.00±0.00	1.57±0.02	0.43±0.01
G	0.03±0.01	0.01±0.01	1.99±0.01
B	0.04±0.01	0.00±0.00	2.45±0.03
W	0.00±0.00	0.00±0.00	1.87±0.01

表4-LASER照LED(最大值)，單位：伏特V



在用光譜儀觀察的時候，綠光雷射筆有兩個峰值，可以發現除了綠光以外，還有一個808nm的波段出現，對照綠光LED的光譜，我們可以發現，綠光LED的波長較綠光雷射筆短。

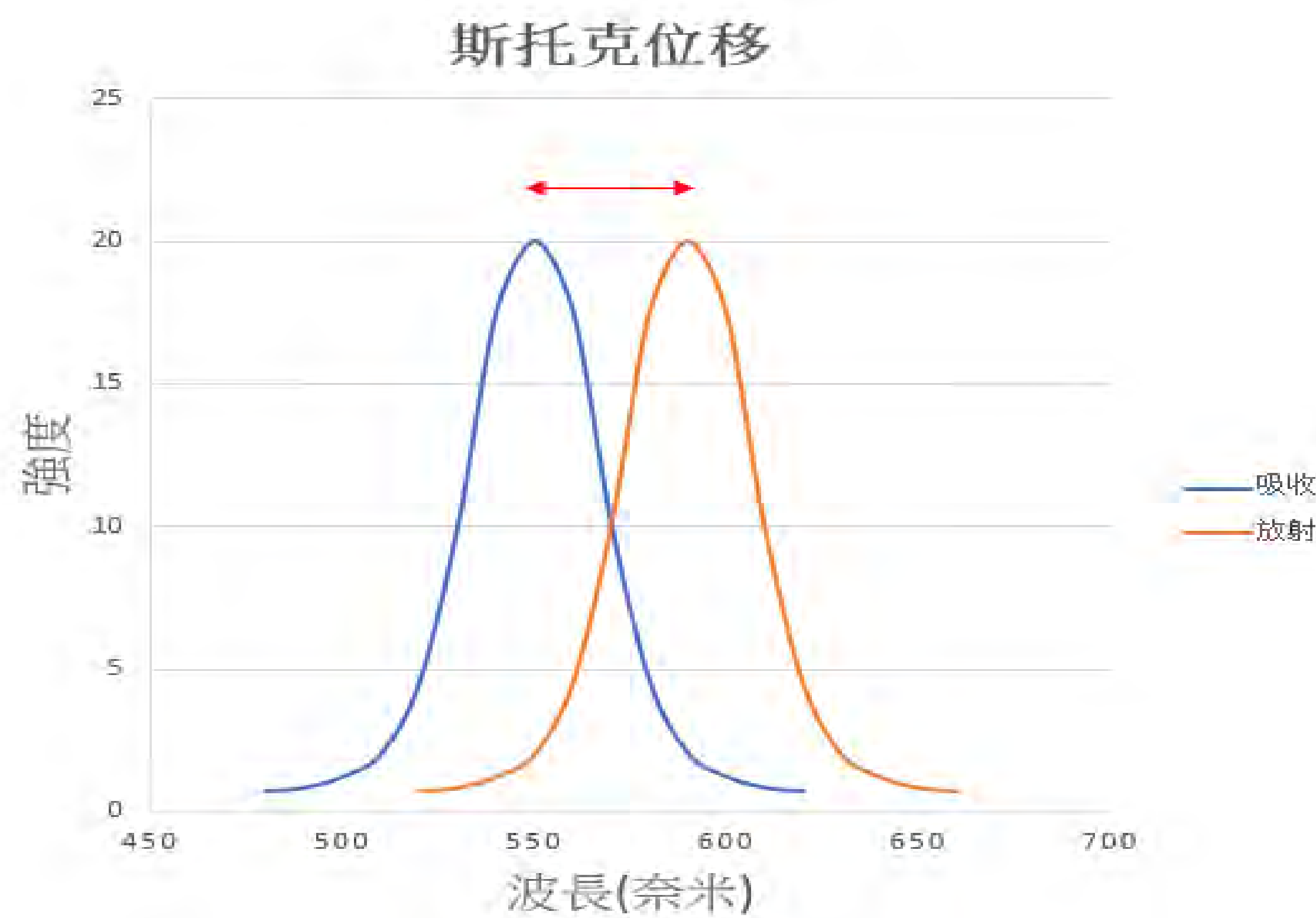


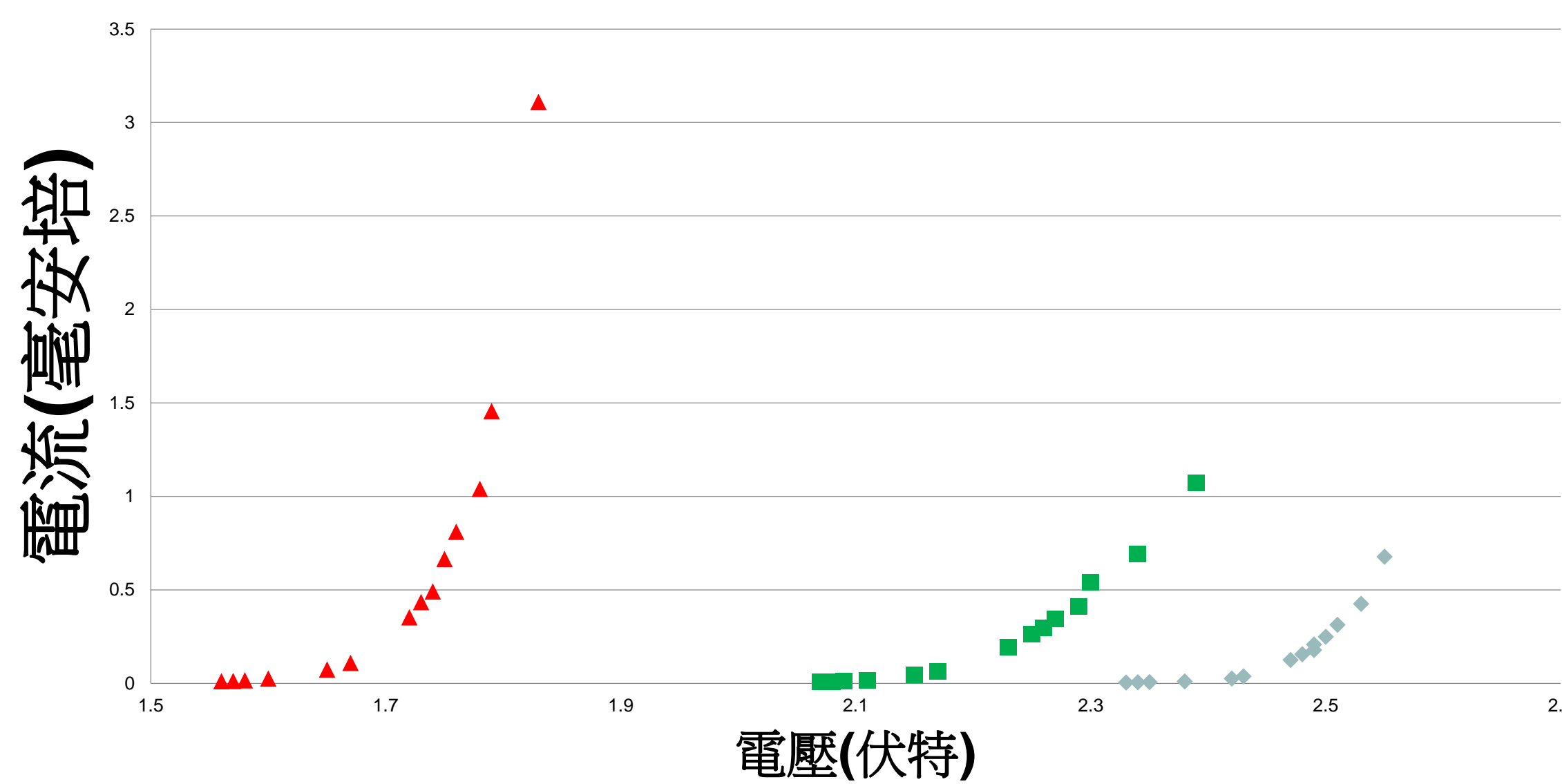
圖6-斯托克位移示意圖

### 實驗三、LED與雷射筆I-V曲線量測

根據實驗數據畫出來的LED I-V曲線圖，可以很明顯的看出並非線性函數，也就是說電壓和電流的比值不是定值，不符合歐姆定律，因此驗證了LED屬於非歐姆式導體。LED電流和電壓的函數可以用下列方程式表示：

$$I = I_s(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1)$$

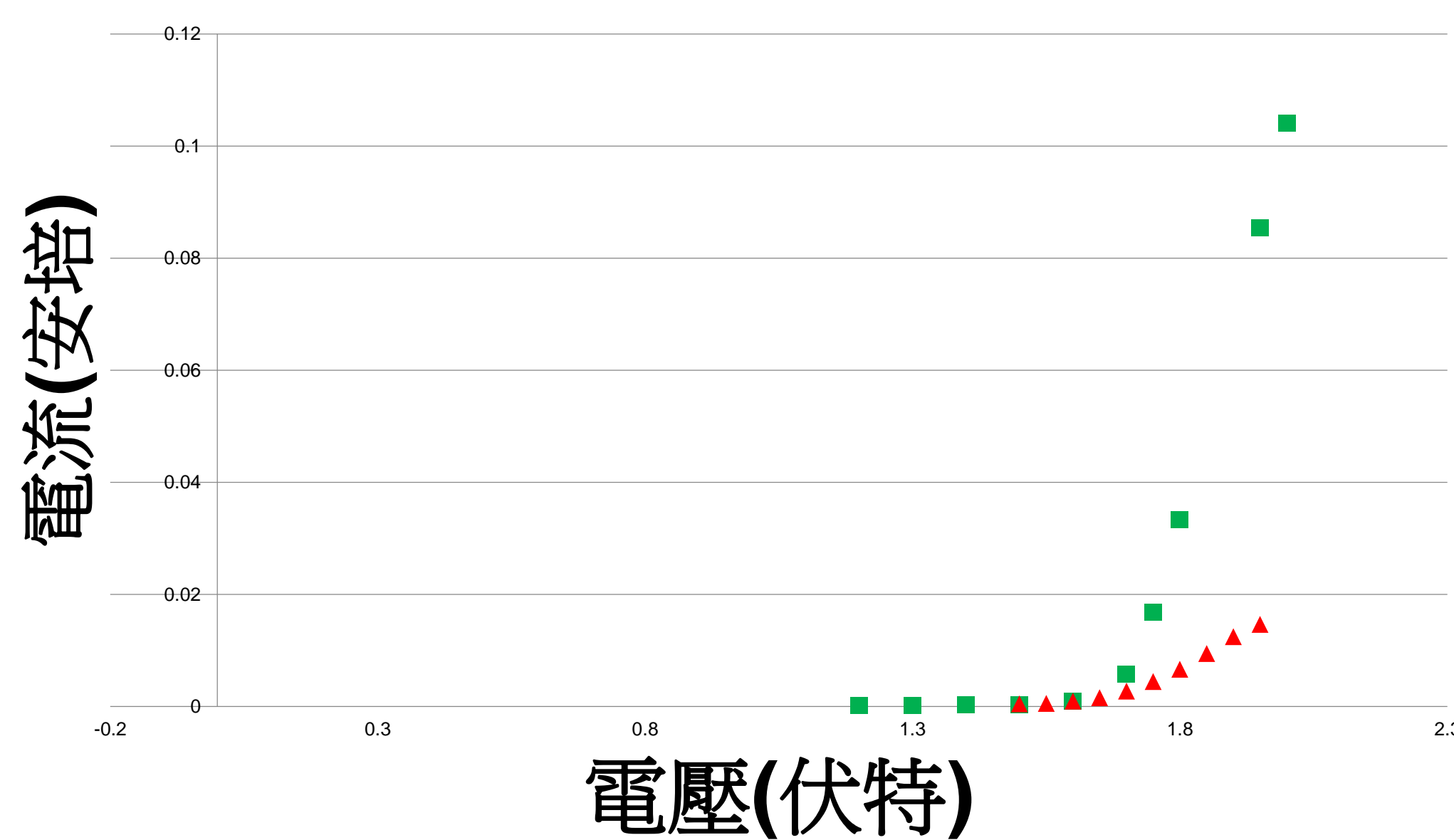
紅、綠、藍光LED通電曲線



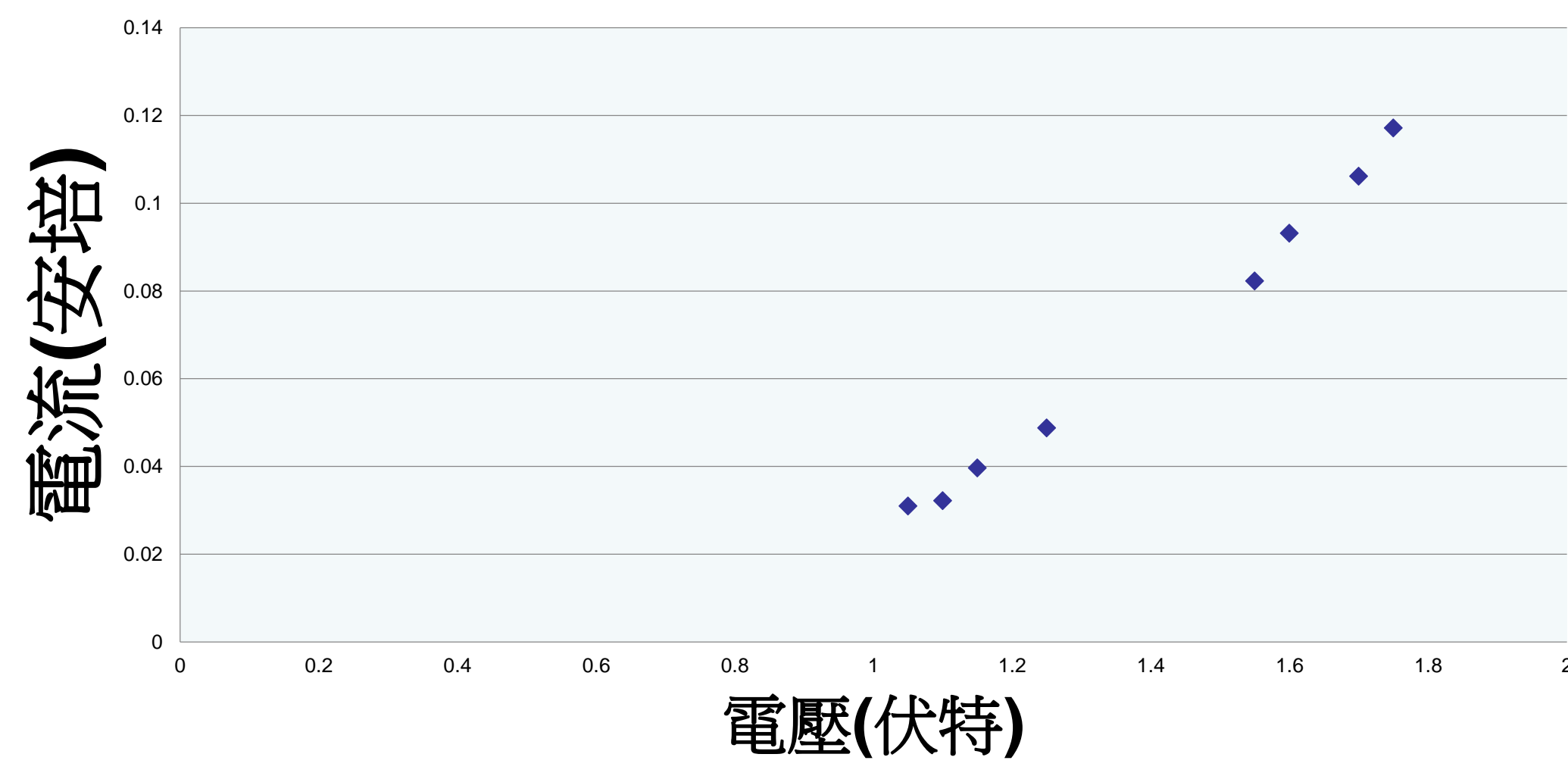
測量物	直線方程式	截距，閾值電壓(V)
紅光LED	$y = 8.43x - 14.08$	1.76
綠光LED	$y = 5.48x - 12.07$	2.20
藍光LED	$y = 3.85x - 9.320$	2.42

測量物	直線方程式	截距，閾值電壓(V)
紅光雷射筆	$y = 0.047x - 0.078$	1.66
綠光雷射筆	$y = 0.406x - 0.695$	1.71

紅、綠雷射頭通電曲線



藍光雷射頭 - 通電曲線



光電方程式  $eV = \frac{hc}{\lambda}$ ，干涉的公式  $\lambda = \frac{\Delta y \cdot d}{L}$ ，把普朗克常數  $h$ 、距離  $L$ 、光柵間距(雙狹縫寬度)  $d$ 、電子電量  $e$ 、量到的亮紋距離  $\Delta y$ ，

$V = \frac{hc \cdot L}{\Delta y \cdot d \cdot e}$ ，其中在計算理論電壓時

$\Delta y$  代入平均標準差計算出理論電壓亦含平均標準差值。

樣品	$\Delta y(m)$	理論電壓	I-V曲線電壓	誤差：
藍LED	$0.224 \pm 0.002$	$2.768 \pm 0.004$	2.42	12.6%
藍雷射	$0.209 \pm 0.001$	$2.966 \pm 0.001$	0.83	72.0%

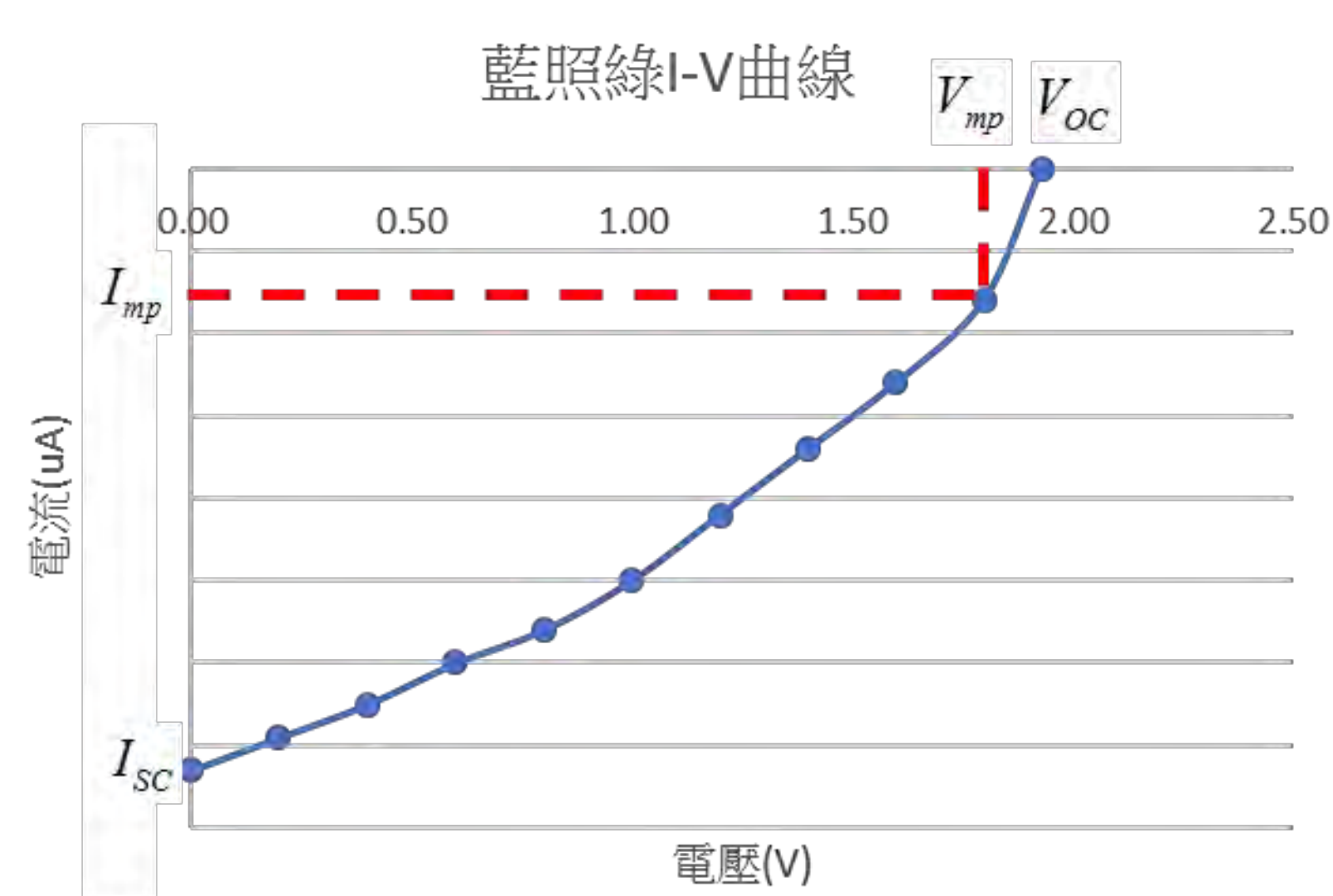
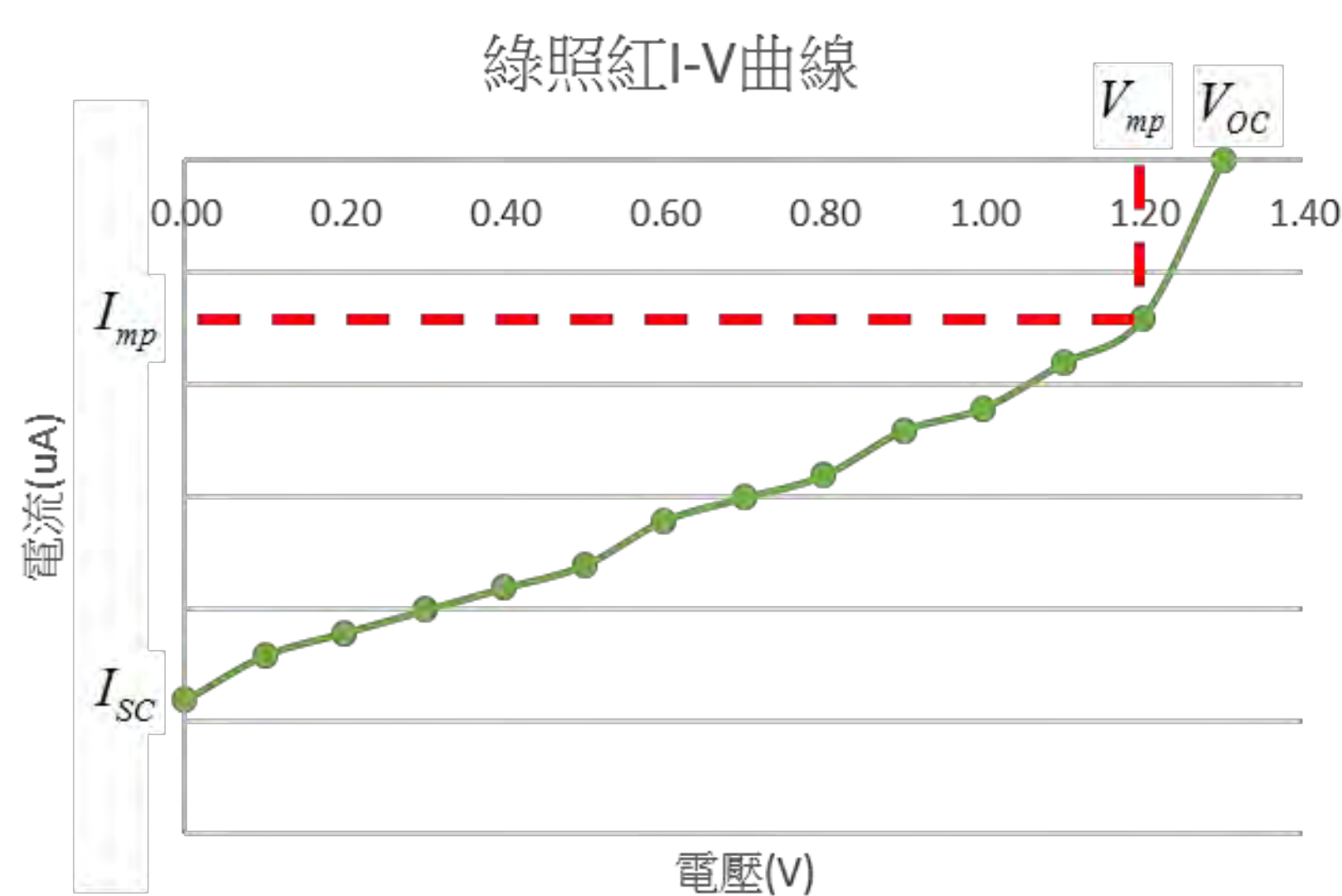
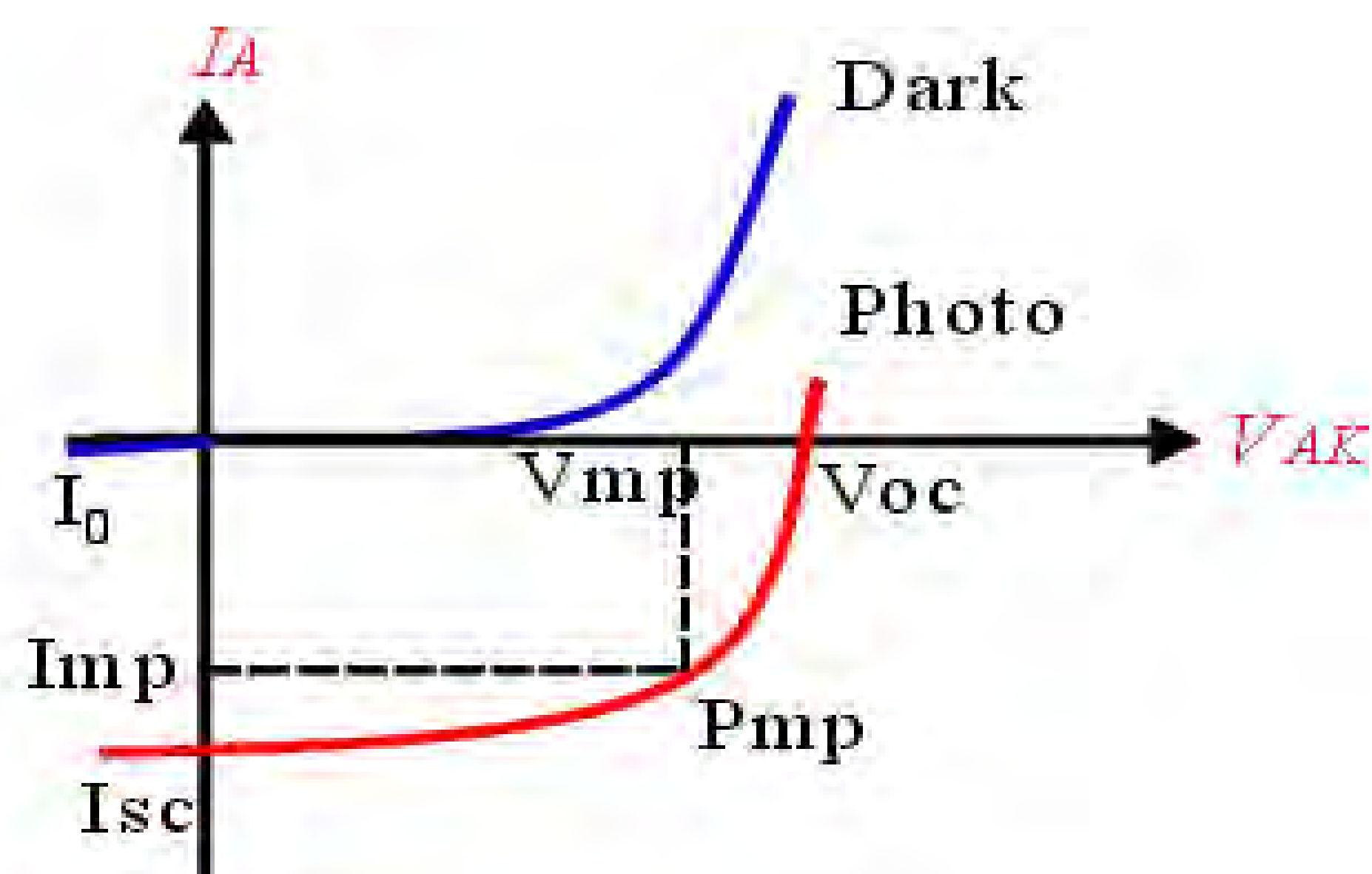
藍光雷射通電曲線

$$y = 0.122x - 0.101$$

截距為0.83(V)

### 太陽能電池(光電二極體)與LED(發光二極體)的差異

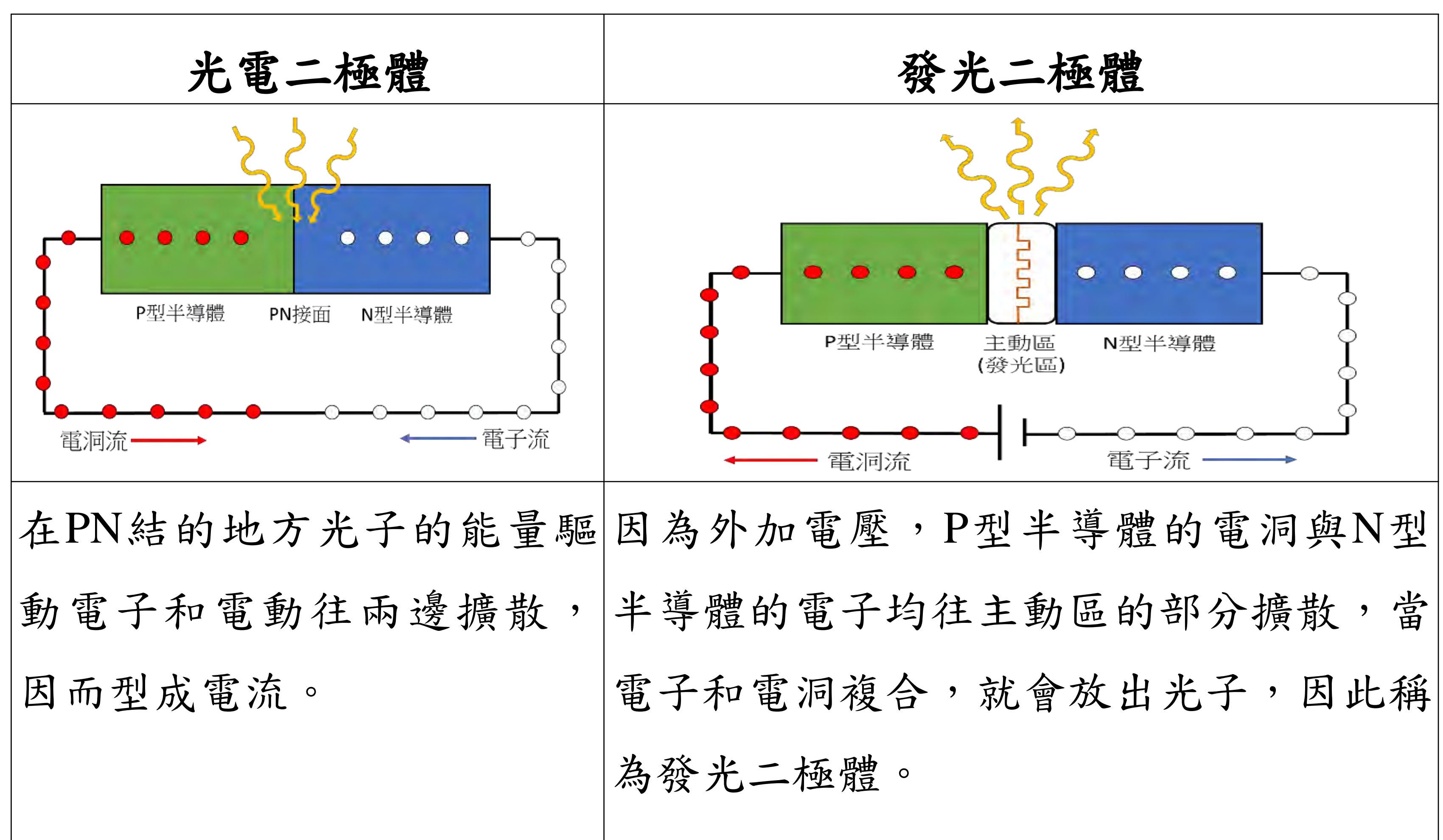
太陽能電池又名光電二極體，也是二極體的一種，太陽能電池在照射光線時，兩端電路會出現短路電流  $I_{sc}$ ，光線越強  $I_{sc}$  越大， $I_{sc}$  大小與光線成正比。電池兩端持續短路是可以允許的，並不會損壞太陽電池，這與一般電源系統禁止短路是不相同的。



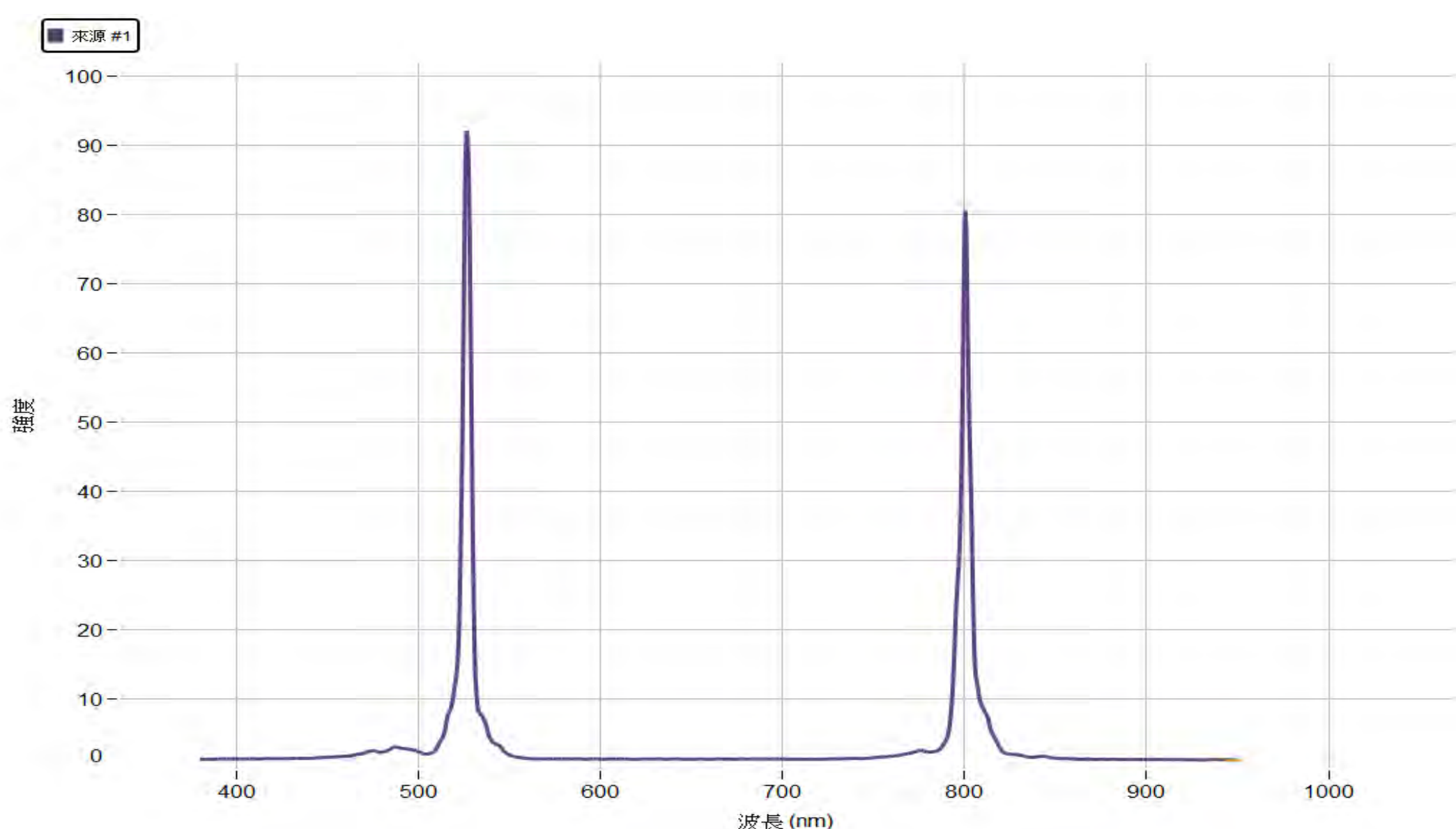


## 二極體的差異

一般太陽能電池的 $I_{SC}$ 介於-0.5~-3.5A之間，我們製作的LED陣列所產生的 $I_{SC}$ 卻只有微安培( $\mu A$ )的大小，有推測與LED本身的結構有關係。以下我們比較太陽能電池(光電二極體)，以及LED(發光二極體)的結構差異。

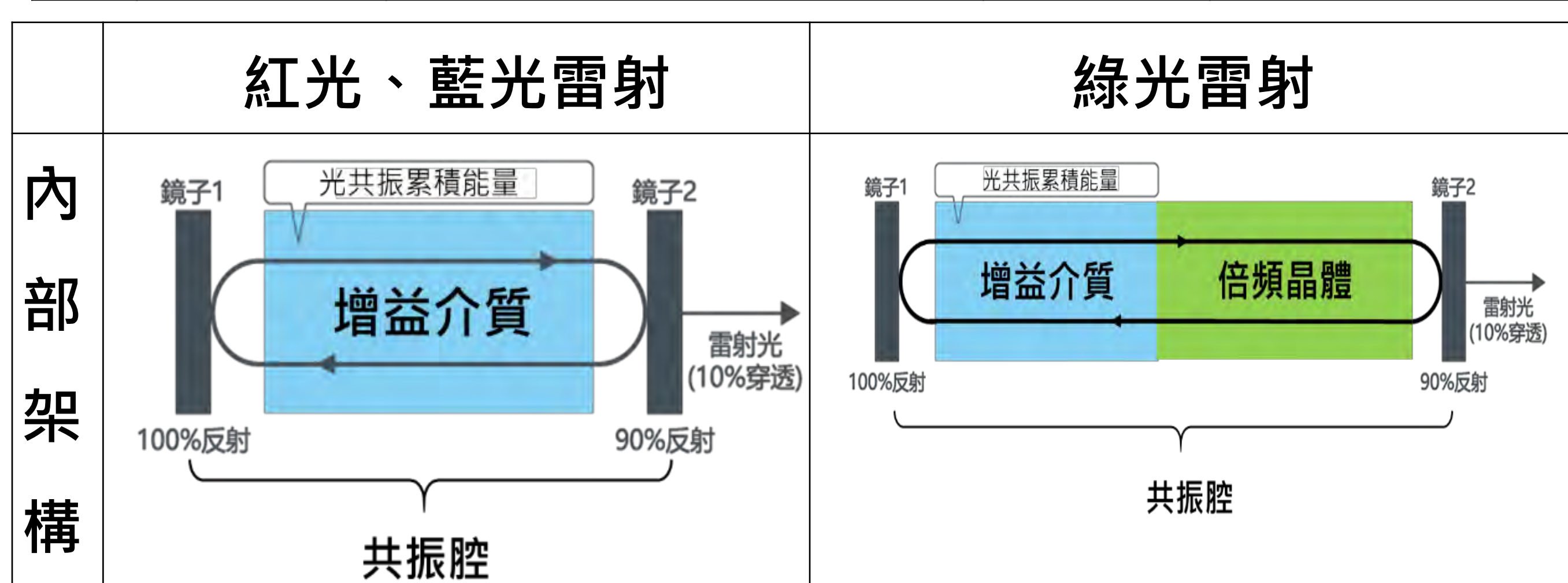


## 紅藍綠雷射筆的內部構造探討



	能量源	增益介質	共振腔	倍頻晶體
紅光	乾電池	砷化鋁鎵(AIGaAs) 二極體雷射	有	無
綠光	808nm 二極體雷射	摻釹釷酸鈮(Nd:YVO <sub>4</sub> ) (放出1064nm) 固態二極體	有	磷酸態化鉀(KTP) 放出(532nm)
藍光	乾電池	氮化鎵鎵(InGaN) 二極體雷射	有	無

	波長(nm)	頻率(Hz)	能量
紅光	780	$3.85 \times 10^{14}$	1.59eV
紫光	380	$7.89 \times 10^{14}$	3.26eV



## LED燈照雷射頭的特殊性質

因為氮化鎵鎵(InGaN)化合物的能隙範圍在0.7 eV到3.4 eV之間，幾乎涵蓋了太陽光譜全部的波長範圍，也因此，可見光LED在照射藍光雷射時，就像是把藍光雷射的增益介質氮化鎵鎵(InGaN)當做是光電二極體(太陽能電池)，因此能夠量得到電壓。

樣品	$\Delta y(m)$	理論閾值電壓	閾值電壓	誤差	構造
紅LED	$0.322 \pm 0.001$	$1.925 \pm 0.001$	1.76	8.6%	紅光LED
綠LED	$0.273 \pm 0.001$	$2.275 \pm 0.002$	2.20	3.3%	綠光LED
藍LED	$0.224 \pm 0.002$	$2.768 \pm 0.004$	2.42	12.6%	藍光LED
紅雷射	$0.330 \pm 0.001$	$1.879 \pm 0.001$	1.66	11.7%	紅光LED
綠雷射	$0.275 \pm 0.001$	$2.254 \pm 0.001$	1.71	24.1%	有倍頻晶體
藍雷射	$0.209 \pm 0.001$	$2.966 \pm 0.001$	0.83	72.0%	(InGaN)混合物

由光柵的干涉結果推測理論閾值電壓與實際的電壓對表及構造推測

$$\text{誤差} = \frac{\text{理論} - \text{實際}}{\text{理論}}$$

## • 結論

- LED互照的實驗中發現，相同的LED互照不如較短一級波長的LED照射的電壓值來得高，以史托克位移理論可以完美解釋本現象。
- 因為LED有量子井的結構，照光後需要克服量子井的能量障礙，所以其短路電流遠小於一般市售太陽能電池。但實驗後發現，其I-V曲線和太陽能電池一樣，當電壓到達後，電流會急遽下降。
- 由雷射筆的通電曲線，可以得知藍、綠2色的雷射筆與原色的LED有明顯的差異，主要是因為市售藍、綠光雷射筆與LED的半導體材料與結構有所不同。
- 由LED的與紅光雷射筆通電曲線配合光柵實驗，我們可以找到其理論對應的閾值電壓與實際通電曲線的結果相符，但是藍光與綠光雷射筆頭的I-V曲線得到的閾值電壓套入光電方程式不符合該色光的所對應的閾值電壓。
- 本科展發現的實驗過程，可以不破壞雷射筆的情況下，探究雷射筆的構造。
- 綠光雷射筆頭無法被光激發出電壓，原因為倍頻晶體阻礙了外部的光進入。
- 藍光雷射筆可被各波段的光照射後，激發出電壓，與藍光LED特性不同。