

第十三屆旺宏科學獎

創意說明書

參賽編號：**SA13-163**

作品名稱：「磷光」乍現--自製時間解析裝置及其應用

姓名：陳昱安

關鍵字：磷光、時間解析、生命期

作品名稱

「磷光」乍現--自製時間解析裝置及其應用

摘要

我們利用雷射射過僅留一小縫隙的風扇，產生一道具有週期性亮滅的光源，以此激發固定在玻片上的磷光物質，再將自製光敏感應器以適當的角度(約 90°)接受磷光，並以 BNC 接頭連接至示波器，成功完成自製時間解析裝置。並使光敏感應器串聯電阻及反向電壓抑制雜訊，可使 S/N 達 53，較市售光敏感應器的 S/N(51)好，再利用濾光片減少雷射散射的干擾，使整個裝置達到最佳化。最後以最佳化的裝置測量 Sample1~3 短時間及長時間的生命期，準確度極高，Sample3 的短時間生命期與螢光光譜儀的誤差只有 3.75 %。希望此裝置未來能應用於高中課程或是水質的測量。

壹、研究動機

晚上睡覺關燈時，看著天花板的夜光貼紙竟然能發出綠光！因此我們決定探索這種「光延滯」背後的秘密，赫然發現我們所說的「螢光」其實生命期很短約 10^{-8} sec，而真正能維持長久的是「磷光」！，其生命期較長約 10^{-4} ~10 sec。我們常說的夜明珠也是由磷光物質所組成的，這讓我們對磷光產生濃厚的興趣。

在一次教授的演講中，我們得知時間解析裝置原理及其應用，發現其常用來偵測螢光及磷光物質，但是其價格昂貴，我們希望可以用更簡單、更便宜的方法來測量磷光。在以前一次的化學課中提到過光電二極體，它可以感應光強度的變化，與市售的光敏感應器原理相同，但是由於市售光敏感應器價格昂貴，因此我們決定用光電二極體自己焊燒一個光敏感應器，後來經過了大學教授的建議，加入反向電壓改良，使雜訊減弱，並用雷射光加上風扇的搭配，形成具有週期性亮滅的光源，代替脈衝雷射，這些物品的組合就組合成了自製的時間解析裝置，得到了意想不到的結果！

我們選購了三種夜光粉，Sample1(綠色)的磷光粉亮度最大，而 Sample2(紅色)和 Sample3(白色)相對弱了很多，因此我們用自製的時間解析裝置測量三個樣品的生命期，再對照大學實驗室螢光光譜儀所測量的值，發現自製的時間解析裝置亦能得到準確的生命期數據，高中化學實驗中頗少此類的光化學實驗，這讓我們高中實驗課程中增添不一樣的趣味！

貳、研究目的

- 一、 製作簡易時間解析裝置
- 二、 最佳化時間解析裝置
- 三、 以自製光敏感應器測量磷光物質的生命期

參、實驗設備及器材

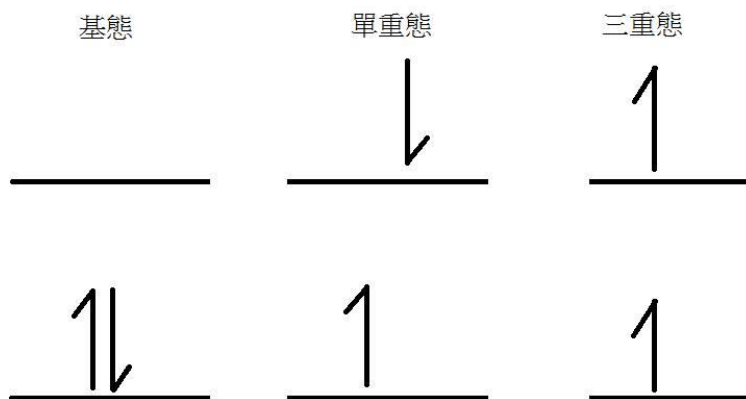
器材	100 MHz 示波器 Hantek DSO5102b、藍光雷射 450 nm, 50 mW、紫光雷射 405 nm, 50 mW、風扇(最高轉速 4800 轉)、光電二極體 s1133-01、市售磷光材料(Sample1 綠色、Sample2 粉紅色、Sample3 白色)、凸透鏡(焦距 12 cm)、市售光敏感應器(牌子 DET36A/M)、黃色濾光片(可過濾波長 485 nm 以下的光)、黑色膠帶、螢光光譜儀 cary eclipse(彰師大化學系提供)、BNC 接頭、膠水、鱷魚夾、直流電源供應器、玻片、電路板
----	---

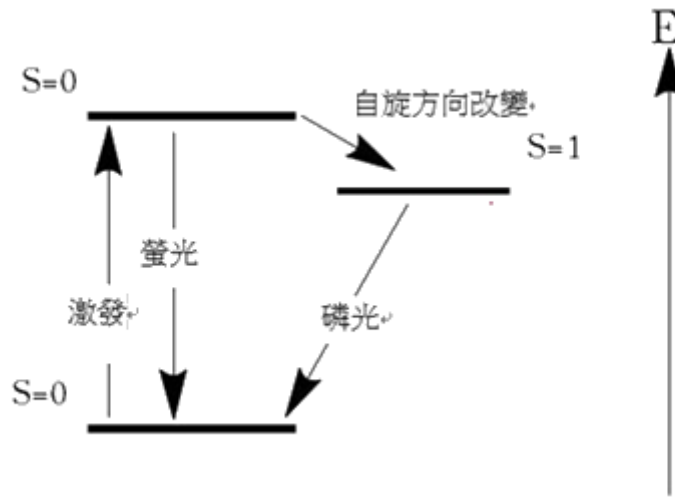
肆、研究原理

(一) 磷光原理

1. 磷光發光^{[1]、[2]}

當物質吸收光子後，會因電子自旋方式的不同，產生兩種激發態的形式。單重態會以螢光的形式回到基態，過程會符合包利不相容原理，故電子待在單重激發態的時間較短，約為 10 ns。三重態則是以磷光的形式回到基態，過程會違反包利不相容原理，在同一軌域中的電子對自旋方向要相反，造成無法順利回到基態，使電子停留在三重激發態的時間較長，可達數毫秒以上。





(圖一)基態、單重態、三重態關係示意圖

2. 磷光反應

我們知道磷光衰退為一級反應，故可得下列式子並做運算。我們在 Excel 將數據作圖，並得到其指數函數為 $y=ae^{-bx}$ ，當磷光強度變為原來的 $1/e$ 時，只要將 b 值做倒數，就可得其生命期(lifetime)。

$$-\frac{d[P]}{dt} = k[P] \Rightarrow \int_0^t \frac{d[P]}{[P]} = \int -k dt \Rightarrow \ln \frac{[P]}{[P]_0} = -kt \Rightarrow \frac{[P]}{[P]_0} = e^{-kt}$$

$$\Rightarrow \begin{matrix} [P] = [P]_0 e^{-kt} \\ y = ae^{-bx} \end{matrix} \quad \text{故當 } \frac{[P]}{[P]_0} = \frac{1}{e} \text{ 時, } t = \frac{1}{k}$$

此時稱為 lifetime τ

(圖二)生命期公式推導

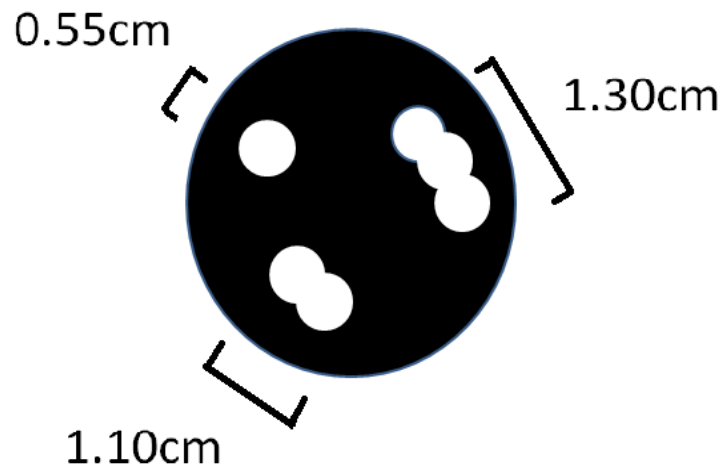
(二) 光電二極體^[3]

一個光電二極體的基礎結構通常是一個 PN 接面或者 PIN 結。當一個具有充足能量的光子衝擊到二極體上，它將激發一個電子，從而產生自由電子（同時有一個帶正電的電洞）。這樣的機制也被稱作是內光電效應。如果光子的吸收發生在結的空乏層，則該區域的內電場將會消除其間的屏障，使得電洞能夠向著陽極的方向運動，電子向著陰極的方向運動，於是光電流就產生了。實際的光電流是暗電流和光照產生電流的綜合，因此暗電流必須被最小化來提高器件對光的靈敏度。

伍、研究過程及方法

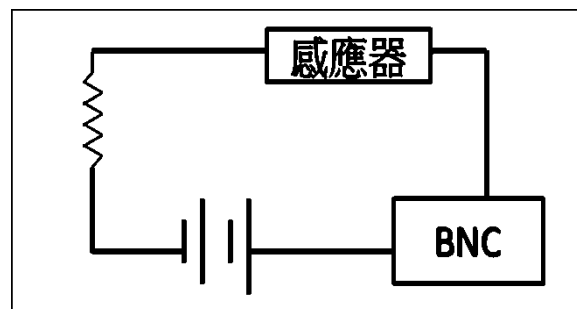
實驗一、製作簡易時間解析裝置

- (一) 風扇製作：將風扇以黑膠帶貼起，並在其中開一小洞讓雷射光源通過，由於孔徑的大小會影響雷射光通過的量，故我們製作了三種孔徑，分別是 1.30 cm、1.10 cm、0.55 cm。



(圖三)風扇示意圖

- (二) 光敏感應器示意圖：將光電二極體、電阻、電池座及 BNC 座燒在電路板上

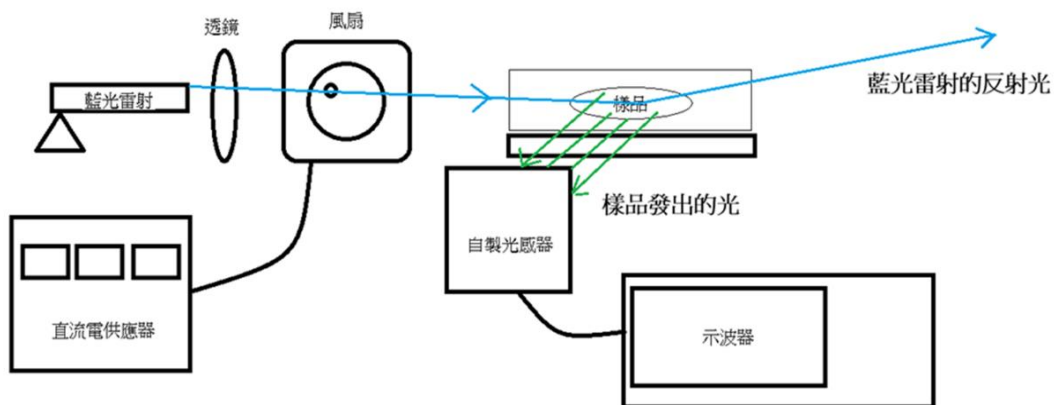


(圖四)光敏感應器示意圖

1. BNC 座：將 BNC 座焊燒在電路板上，再以其接線，連接至示波器上，當電路板形成通路時，訊號變可藉由 BNC 座及線傳至示波器，即可得到電壓(光強度)隨時間的變化圖。
2. 電阻及反向電壓：串聯一電阻及反向電壓(4 顆 3 號電池串聯, 6 V)可抑制雜訊，提高 S/N 比。

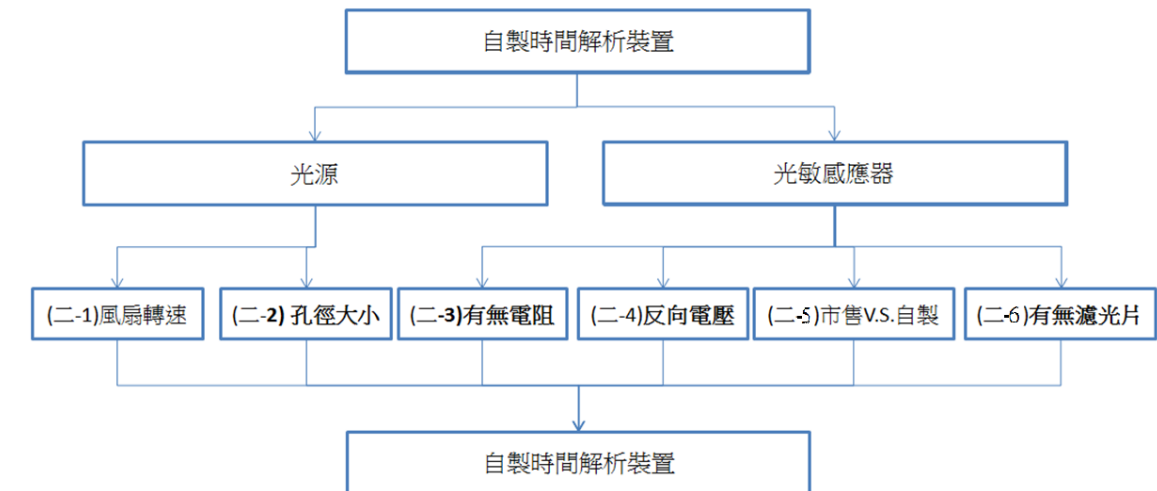
*反向電壓^[4]：在陽極側施加相對陰極負的電壓，也就是反向電壓。此情況下，因為 N 型區域被注入電洞，P 型區域被注入電子，兩個區域內的主要載流子都變為不足，因此結合部位的空乏層變得更寬，內部的靜電場也更強，擴散電位也跟著變大。這個擴散電位與外部施加的電壓互相抵銷，讓反向的電流更難以通過。因此這樣的改良可以使我們自製的光感器抑制訊號，有效的使雜訊干擾降低。

(三) 自製時間解析裝置：利用雷射射過僅留一小縫隙的風扇，固定電壓使風扇穩定運轉，產生一具有週期性亮滅的光源，以此激發固定在玻片上的發光物質，再將光敏感應器以適當的角度(約 90°)接受磷光，並以 BNC 插頭連接至示波器，完成自製時間解析裝置。



(圖五)自製時間解析裝置示意圖

實驗二、最佳化時間解析裝置



(圖六)時間解析裝置組成示意圖

(二-1)風扇轉速的影響：4800 轉、3600 轉、2400 轉

1. 以電壓控制風扇轉速使其產生不同轉速，並以 405 nm 雷射照射澱粉，截取示波器上的數據。
2. 條件：孔徑大小為 0.55 cm、自製光敏感應器有電阻、有反向電壓、有濾光片。

(二-2) 孔徑大小的影響：

1. 將風扇以黑色膠帶貼起，並在其上開不同大小(1.30 cm 、1.10 cm 、 0.55 cm)的洞，再以 405 nm 雷射照射澱粉並截取示波器上的數據。
2. 條件：風扇 4800 轉、自製光敏感應器有電阻、有反向電壓、有濾光片。

(二-3)光敏感應器有無電阻的影響：

1. 測量峰值：以 405 nm 雷射激發 Sample1，分別用有電阻及無電阻之光敏感應器接收訊號，並截取示波器上的數據，我們將峰值稱為 S 值(signal)。
2. 測量雜訊值：移除光源及樣品，測量有電阻及無電阻之光敏感應器在無外界光源干擾下的雜訊強度，我們將雜訊強度稱為 N 值(noise)。
3. 比較有電阻及無電阻之光敏感器的 S/N 值。
4. 條件：風扇 4800 轉、孔徑大小為 0.55 cm、自製光敏感應器有反向電壓、有濾光片。

(二-4)光敏感應器有無反向電壓：

1. 測量峰值：以 405 nm 雷射激發 Sample1，分別用有反向電壓及無反向電壓之光敏感應器接收訊號，並截取示波器上的數據，我們將峰值稱為 S 值(signal)。
2. 測量雜訊值：移除光源及樣品，測量有反向電壓及無反向電壓之光敏感應器在無外界光源干擾下的雜訊強度，我們將雜訊強度稱為 N 值(noise)。
3. 比較有反向電壓及無反向電壓之光敏感器的 S/N 值。
4. 條件：當風扇 4800 轉、孔徑大小為 0.55 cm、自製光敏感應器有電阻、有濾光片。

(二-5)市售光敏感應器與自製光敏感應器比較：

1. 測量峰值：以 405 nm 雷射激發 Sample1，分別用市售光敏感應器與自製光敏感應器接收訊號，並截取示波器上的數據，我們將峰值稱為 S 值(signal)。
2. 測量雜訊值：移除光源及樣品，測量市售光敏感應器與自製光敏感應器在無外界光源干擾下的雜訊強度，我們將雜訊強度稱為 N 值(noise)。
3. 比較市售光敏感應器與自製光敏感應器的 S/N 值。。
4. 條件：當風扇 4800 轉、孔徑大小為 0.55 cm、自製光敏感應器有電阻、有反向電壓、有濾光片。

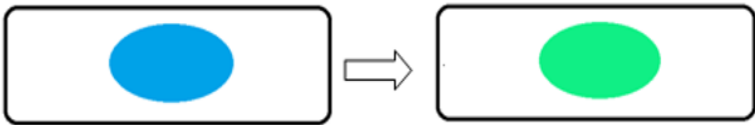
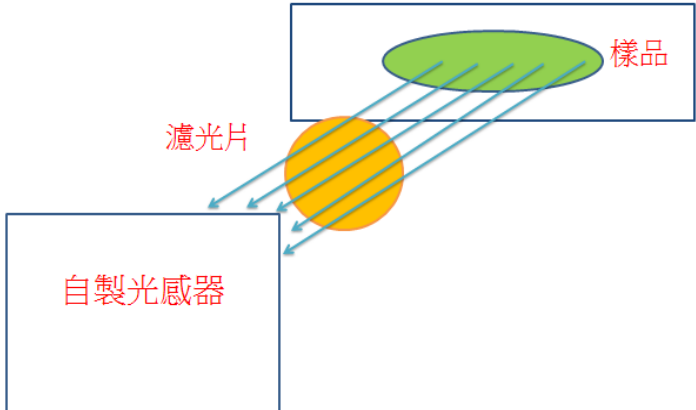
(二-6)光敏感應器前有無加入濾光片的比較：

1. 測量峰值：以 405 nm 雷射照射澱粉，分別用有加入濾光片與沒有加入濾光片的光敏感應器接收訊號，並截取示波器上的數據。
2. 條件：無風扇、孔徑大小為 0.55 cm、自製光敏感應器有電阻、有反向電壓。

(二-7)測量 Sample1、Sample2、Sample3 之亮度比較：

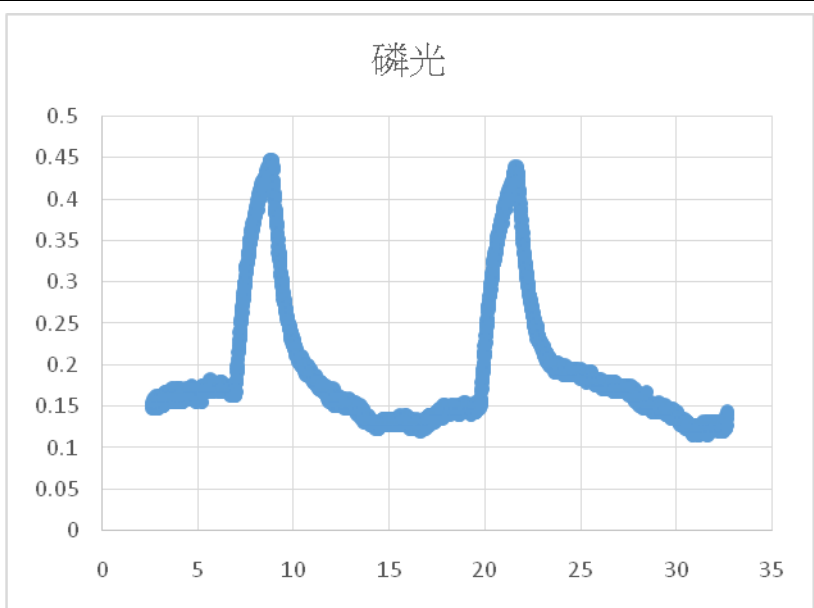
1. 以 405 nm 或 450 nm 雷射光直射 Sample1、Sample2、Sample3，並以自製時間解析裝置測量三者之峰值，比較三者之磷光強度。
2. 條件：當風扇 4800 轉、孔徑大小為 0.55 cm、自製光敏感應器有電阻、有反向電壓、有濾光片。

實驗三、以自製光敏感應器測量同磷光物質的生命期

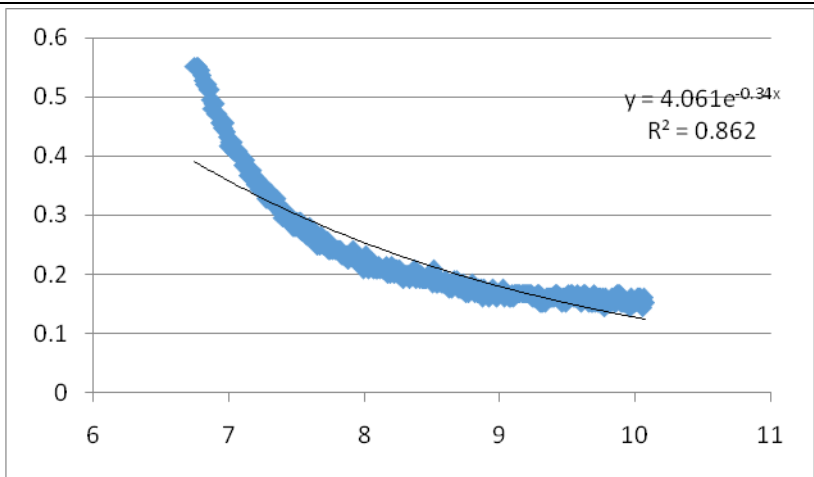
實驗步驟	示意圖
Step1：為了檢測固態磷光物質，我們以玻片上塗抹膠水，使膠水分布均勻，再將磷光粉倒在膠水上固定。	
Step2：將載有磷光物質的玻片放入自製時間解析裝置(條件：風扇 4800 轉、孔徑大小為 0.55 cm、自製光敏感器有電阻、有反向電壓、有濾光片時)，光由左邊入射，並在雷射與玻片座約 90 度角處擺上光敏感應器，接收訊號，分別測量三種磷光物質的生命期。	

Step3：經過磷光光譜儀的測試後，我們知道 Sample1 和 Sample2 的樣品中有長生命期與短生命期的磷光物質，因此採用不同的方法測試。

1. 短生命期：雷射光通過轉速 4800 轉的風扇產生週期性亮滅的光源，分別照在 Sample1、Sample2、Sample3 上，並在示波器上讀取數據。
2. 長生命期：移除風扇，使雷射光直接照射在 Sample1、Sample2 上，並馬上遮斷光源，在示波器上讀取數據。



Step4：截取數據，由波峰經過五分之一週期處開始取點，(因濾光片無法完全過濾雷射散射)，並在 Excel 作圖加入指數趨勢線。



Step5：我們可以從 Excel 中取得趨勢線的指數方程式， $y=ae^{-bx}$ 其中 b 值的倒數即為生命期，而 R^2 為相關係數。

$$y = 4.0615e^{-0.347x}$$

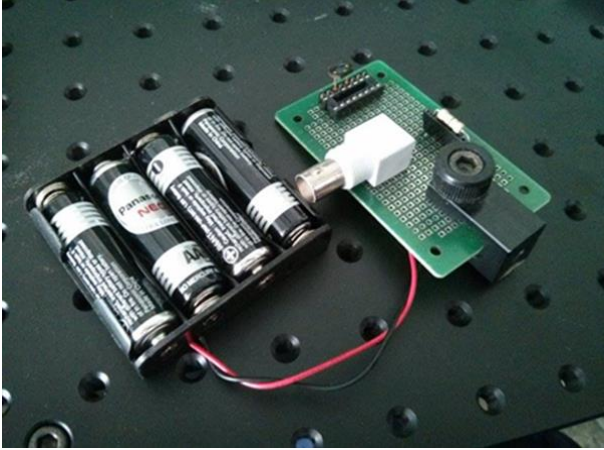
$$R^2 = 0.8625$$

Step6：重複 step1~step5 三次，將三次數據平均。並將分析完後的生命期與螢光光譜儀所測得的生命期做對照。

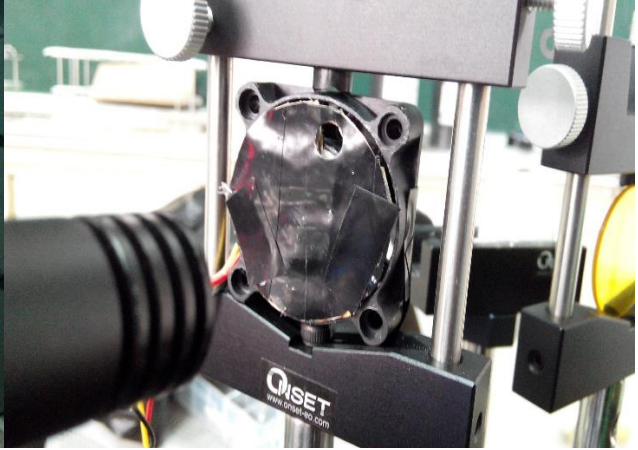
fast	生命期 (自製 一)	生命期 (自製 二)	生命期 (自製 三)	生命期 (自製平 均)	生命期 (磷光光譜 儀)
Sample1	2.562 sec	2.258 sec	1.603 sec	2.141 sec	1.54 sec
Sample2	3.311 msec	2.882 msec	3.185 msec	3.126 msec	2.86 msec
Sample3	9.259 msec	8.333 msec	10.417 msec	9.336 msec	9.7 msec

陸、研究結果及討論

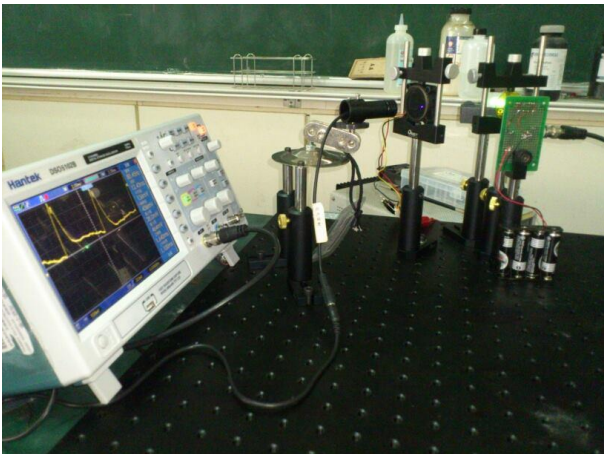
實驗一、製作簡易時間解析裝置



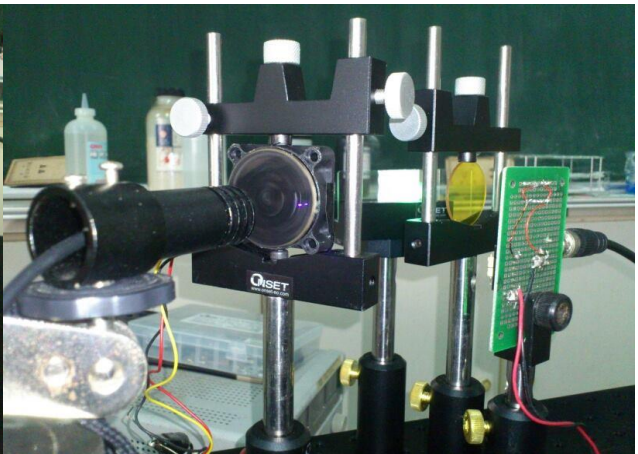
(圖七)自製光敏感應器實圖



(圖八)自製風扇



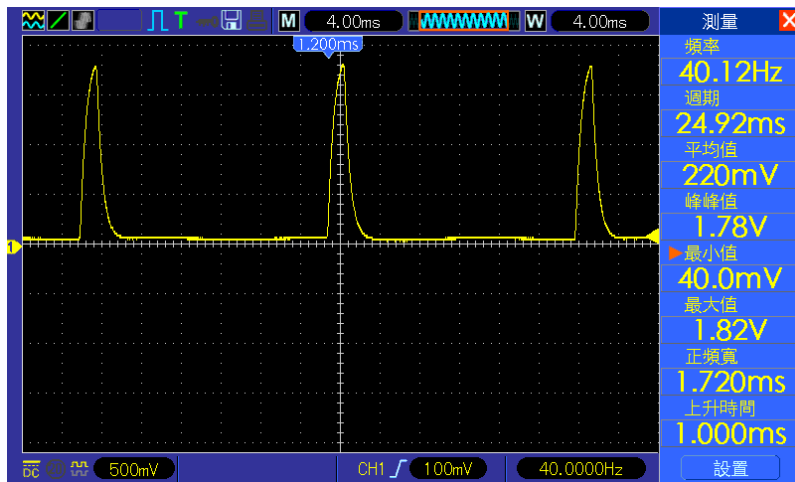
(圖九)自製時間解析裝置(全部)



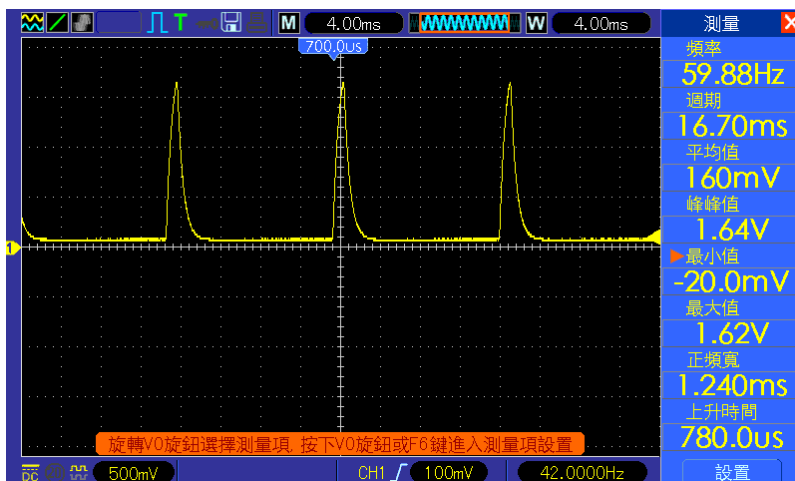
(圖十)自製時間解析裝置(部分放大)

實驗二、最佳化時間解析裝置

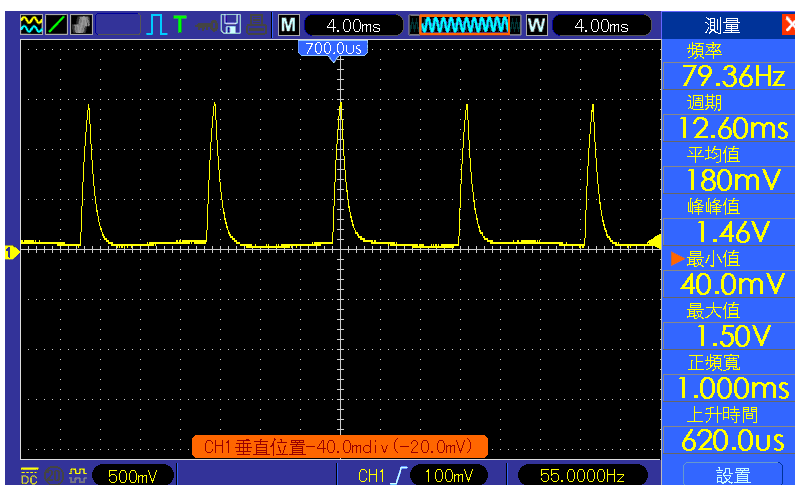
(二-1)風扇轉速的影響：4800 轉、3600 轉、2400 轉



(圖十一)風扇 2407 轉



(圖十二) 風扇 3593 轉



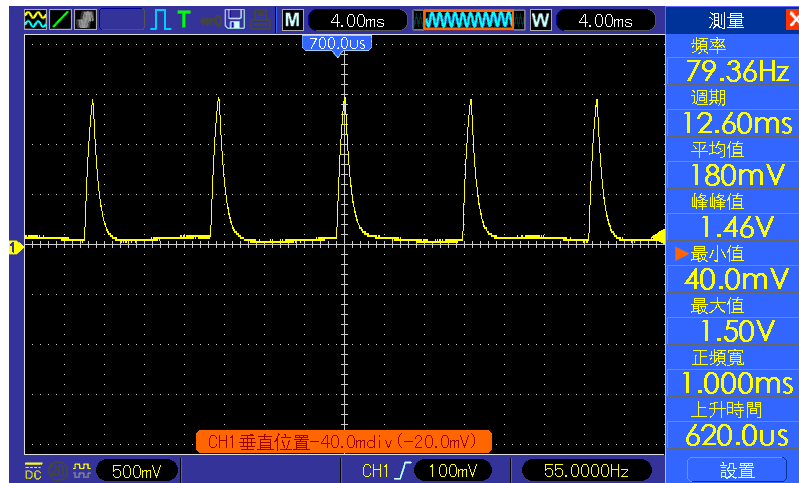
(圖十三)風扇 4762 轉

換算轉速	脈衝寬 (取半高寬)	最高峰峰值(p)
2407 轉	1.0502 msec	1.78 V
3593 轉	0.984 msec	1.64 V
4762 轉	0.8 msec	1.46 V

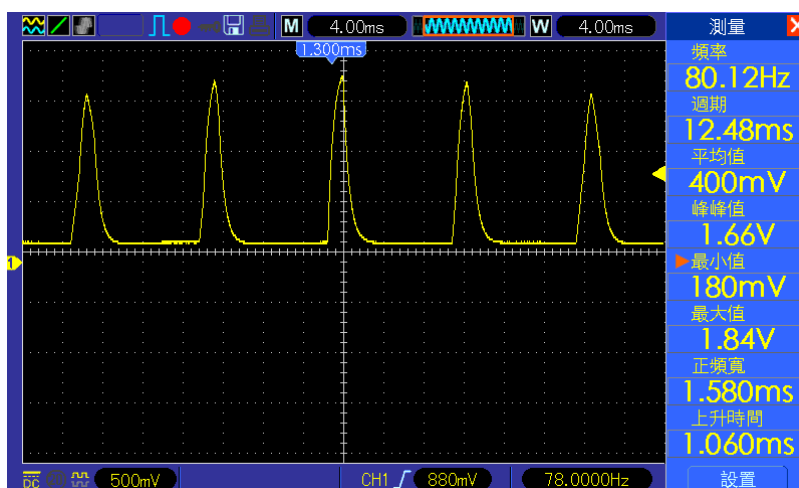
(表一)風扇轉速及其對應峰值

結果及討論：由表一可看出轉速越高，峰值越小，因風扇轉速會改變雷射穿透的時間，轉速愈高，進光量愈少，故磷光的亮度會減弱，但高轉速的脈衝寬較短，解析度較好，因此我們後續實驗皆用 4800 轉。

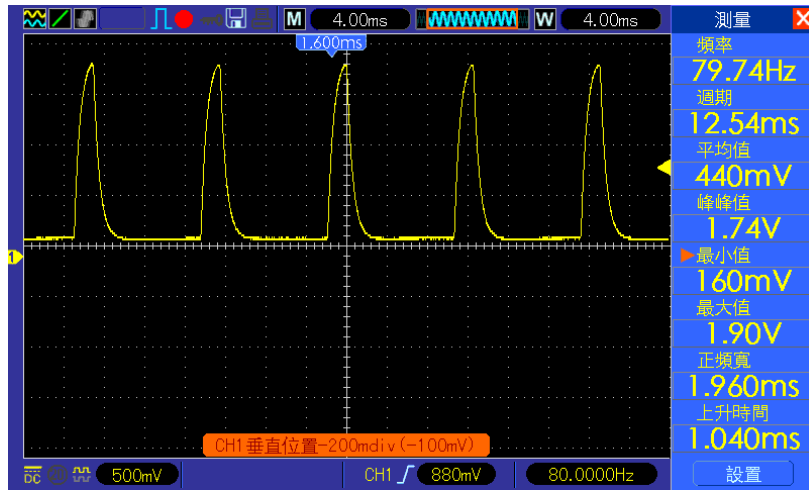
(二-2)孔徑大小的影響：0.55 cm、1.10 cm、1.30 cm



(圖十四)孔徑 0.55 cm



(圖十五)孔徑 1.10 cm



(圖十六)孔徑 1.30 cm

孔徑大小(cm)	脈衝寬 (取半高寬)	最高峰峰值(p)
0.55	0.8 msec	1.46 V
1.1	0.944 msec	1.66 V
1.3	1.2036 msec	1.74 V

(表二)孔徑大小及其峰值對應關係

結果與討論：由表二可得知，孔徑越大，峰值也會越大，但脈衝寬度亦較長，使得自製時間解析裝置解析度變差，所以在往後的實驗中，我們皆以孔徑大小 0.55 cm 做實驗。

(二-3)光敏感應器有無電阻 及(二-4)光敏感應器有無反向電壓

	signal	noise	S/N
有電阻有反向電壓	552 mV	10.4 mV	53.0769
有電阻無反向電壓	544 mV	16.0 mV	34
無電阻有反向電壓	536 mV	17.6 mV	30.4545
無電阻無反向電壓	544 mV	21.6 mV	25.1851

(表三)光敏感應器有無電阻及其訊號雜訊比

結果及討論：

1. 由表三可得知測量出的雷射光峰值大約相同，代表光敏感應器有無電阻或反向電壓對磷光強度是較無影響。
2. 同時串聯電阻及反向電壓可有效的抑制雜訊，從無電阻無反向電壓的雜訊 21.6 mV 降低至 10.4 mV，可減少一半以上的雜訊，訊號雜訊比 S/N 提升了一倍。

(二-5)市售光敏感應器與自製光敏感應器比較

	S/N
有電阻有反向電壓	53.0769
有電阻無反向電壓	34
無電阻有反向電壓	30.4545
無電阻無反向電壓	25.1851
市售光敏感應器	51

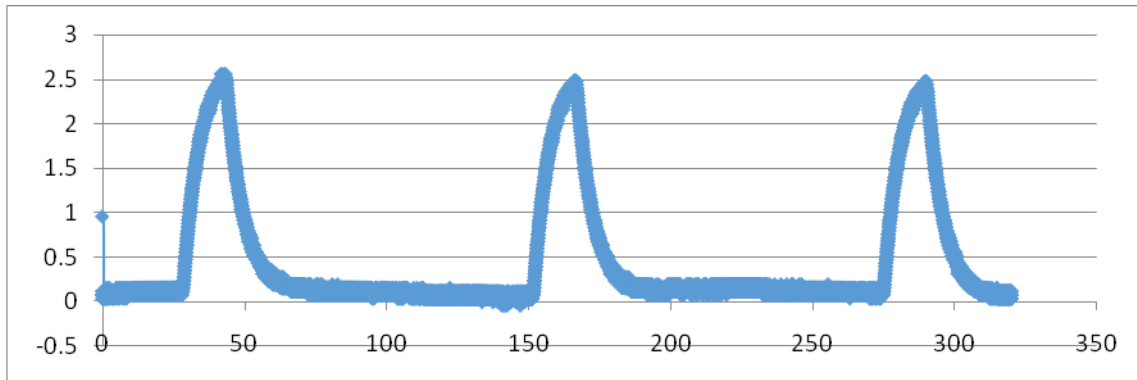
(表四)自製光敏感應器及市售光敏器峰值雜訊比

結果及討論：由表四得知，自製光敏感應器(S/N 約 53)較市售的光敏感應器(S/N 約 51)抑制雜訊的效果更好，所以我們在往後的實驗中皆使用自製光敏感應器進行實驗。

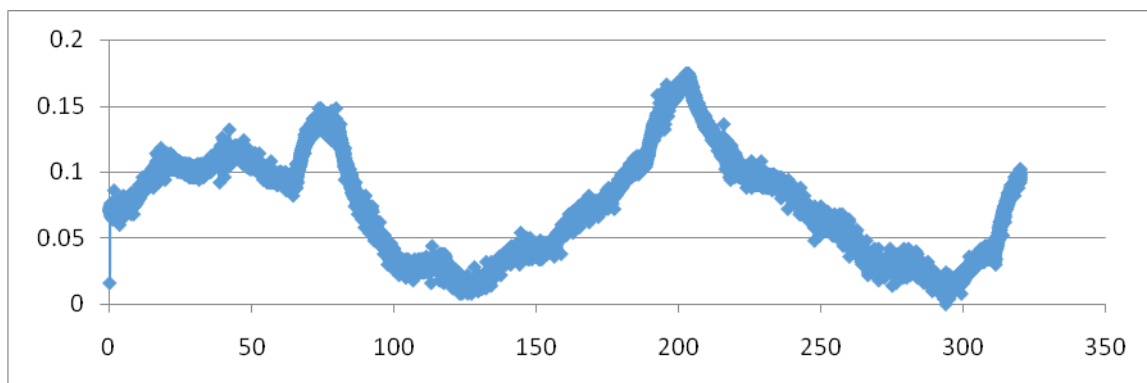
(二-6)光敏感應器前有無加入濾光片的比較：

	峰值
無加入濾光片	3.86 V
有加入濾光片	0.145 V

(表五)光敏感應器有無加濾光片及其峰值對應關係

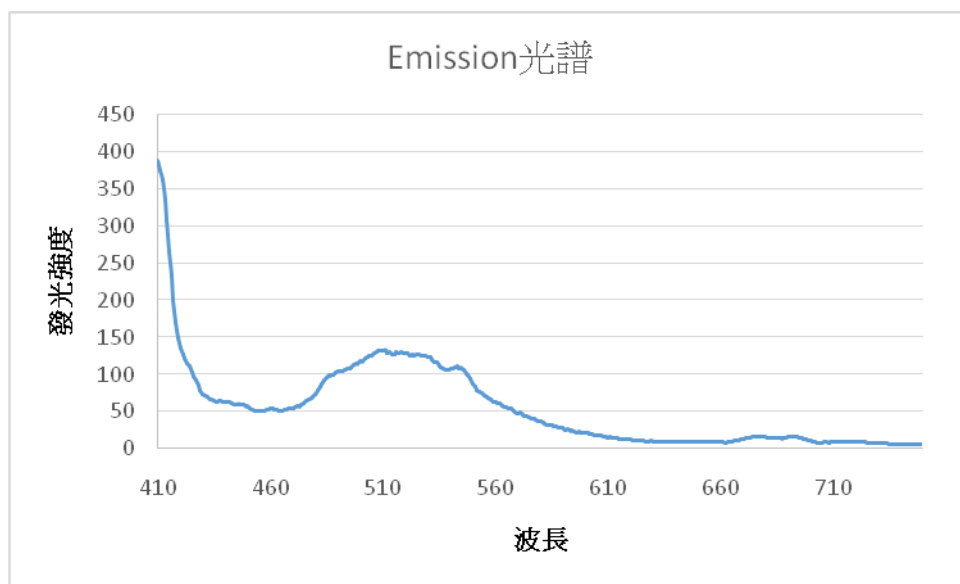


(圖十七)無加入濾光片時，雷射光散射峰值



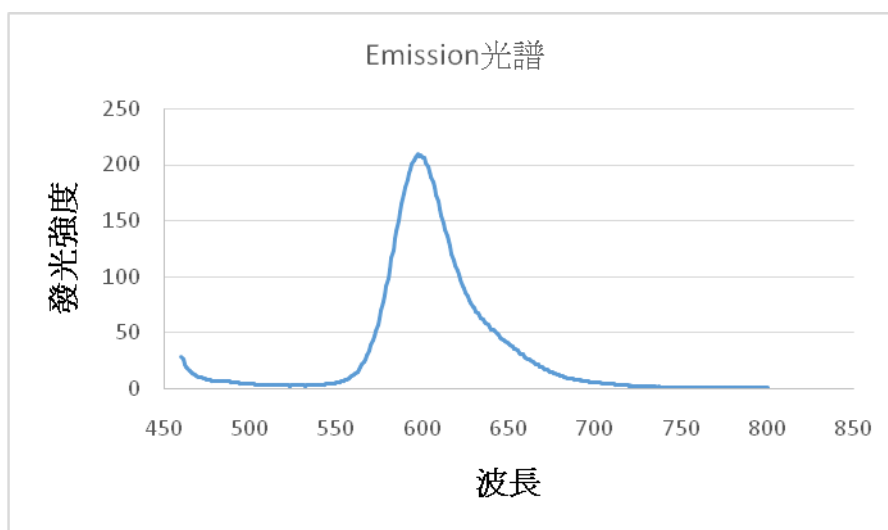
(圖十八)有加入濾光片時，雷射光散射峰值

(圖十九)到(圖二十一)為大學實驗室以螢光光譜儀分析 Sample1~3 之 Emission 光譜的結果



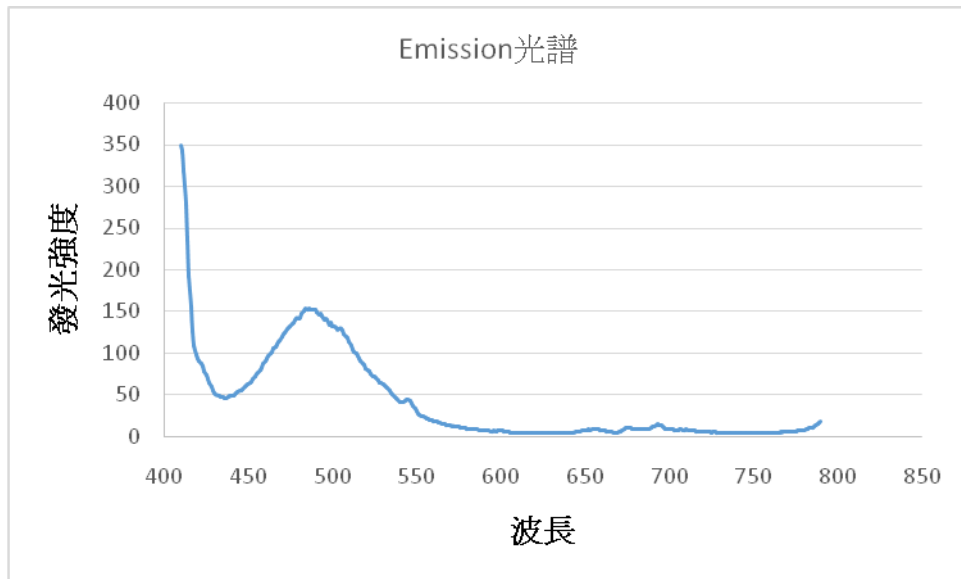
(圖十九)Sample1 的 Emission 光譜

(圖十九)為以 400 nm 波長的光激發 Sample 1，測定所發射的不同波長磷光的強度，得到此磷光發射光譜。而我們也可以看出發射光強度最好的波長在約在 510 nm 。



(圖二十)Sample2 的 Emission 光譜

(圖二十)為以 450 nm 波長的光激發 Sample 2，測定所發射的不同波長磷光的強度，得到此磷光發射光譜。而我們也可以看出發射光強度最好的波長在約在 597 nm 。



(圖二十一)Sample3 的 Emission 光譜

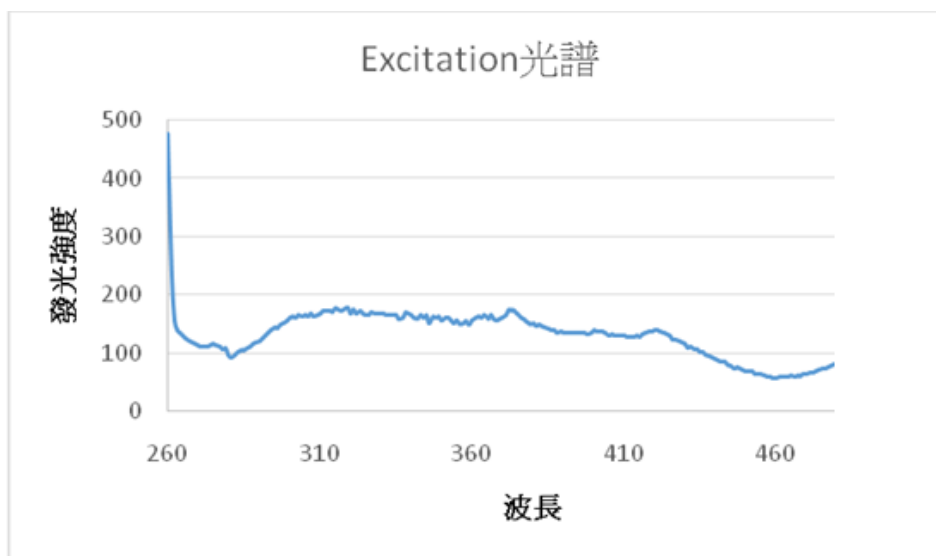
(圖二十一)為以 400 nm 波長的光激發 Sample 3，測定所發射的不同波長磷光的強度，得到此磷光發射光譜。而我們也可以看出發射光強度最好的波長在約在 490 nm。

結果及討論：

1. 此濾光片可吸收波長在 485 nm 以下的光，而 485 nm 以上的光是可穿透的。
2. 由圖十七至圖十九，Sample1 的放光約在 510 nm；Sample2 的放光約在 597 nm；Sample3 的放光約在 490 nm，皆在 485 nm 以上，故濾光片不會過濾掉三種物質所發射的磷光。而我們所使用之雷射波長為 405 nm 及 450 nm，因此濾光片可吸收掉大多數雷射光。
3. 用雷射照射澱粉，是為了確認粉末會散射雷射，而散射的雷射光是否能完全的被濾光片所濾掉。實驗結果顯示，並無法完全過濾掉雷射散射的光，雷射光的散射還是會造成影響，因此我們往後在截取數據計算生命期時，會避開脈衝寬部分的數據。

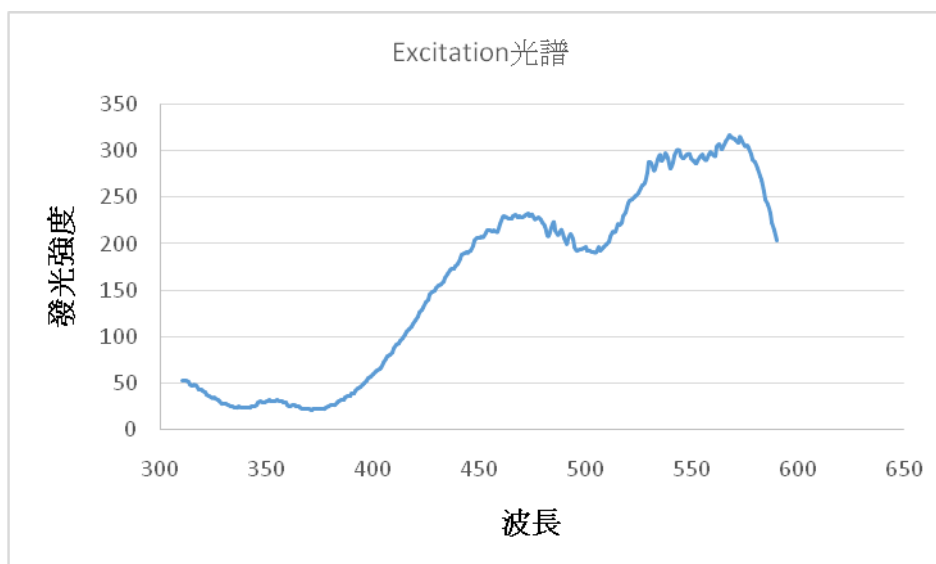
實驗三、以自製光敏感應器測量同磷光物質的生命期

(一) 大學實驗室以螢光光譜儀分析 Sample1~3 之結果：



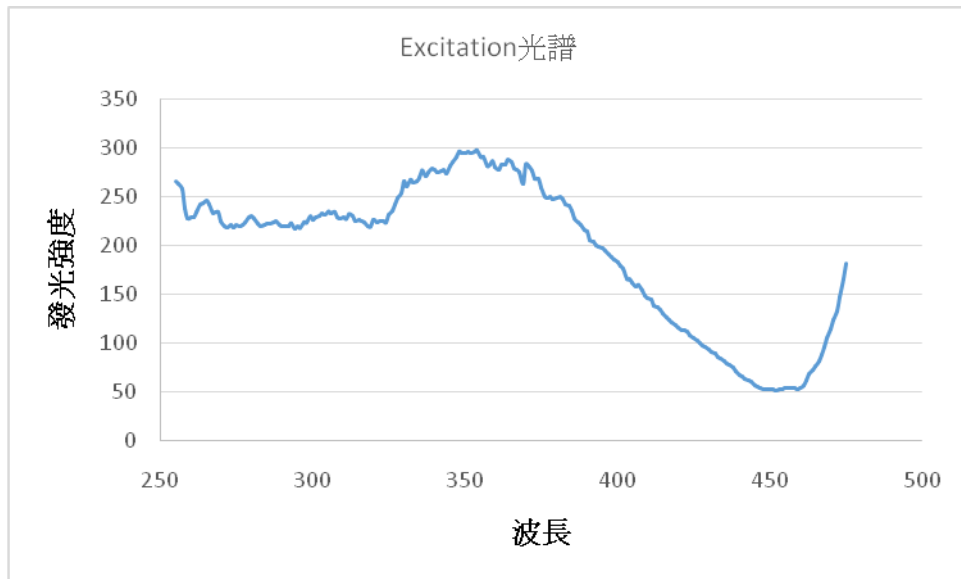
(圖二十二) Sample1 的 Excitation 光譜

(圖二十二)為以固定 510 nm 的發射波長，改變激發波長，得到此磷光強度與激發波長的激發光譜。



(圖二十三) Sample2 的 Excitation 光譜

(圖二十三)為以固定 600 nm 的發射波長，改變激發波長，得到此磷光強度與激發波長的激發光譜。



(圖二十四) Sample3 的 Excitation 光譜

(圖二十四)為以固定 480 nm 的發射波長，改變激發波長，得到此磷光強度與激發波長的激發光譜。

結果及討論：

1. 由圖二十二至圖二十四大學實驗室以螢光光譜儀測量 Sample1 至 Sample3 之 Excitation 光譜。
2. Sample1 以 405 nm 激發較以 450 nm 之光激發所得的磷光強度較強，因此進行 Sample1 量測時皆以 405 nm 之雷射光激發。
3. Sample2 以 450 nm 激發較以 405 nm 之光激發所得的磷光強度較強，因此進行 Sample2 量測時皆以 450 nm 之雷射光激發。
4. Sample3 以 405 nm 激發較以 450 nm 之光激發所得的磷光強度較強，因此進行 Sample3 量測時皆以 405 nm 之雷射光激發。

(二) 以螢光光譜儀所分析磷光物質的結果：以螢光光譜儀分析 Sample1~3 數據如下

	Fast lifetime (R ²)	Slow lifetime (R ²)
Sample1	1.54 sec (0.5817)	10.52 sec (0.9478)
Sample2	2.86 msec (0.7654)	8.3 sec (0.9278)
Sample3	9.7 msec (0.7479)	

(表七)螢光光譜儀測量 Sample1、Sample2、Sample3 之生命期

(三) 以自製時間解析裝置測量 Sample1、Sample2、Sample3 的短生命期放光，分析後的數據與磷光光譜儀數據比較：

fast	生命期 1 (自製一) (R ²)	生命期 2 (自製二) (R ²)	生命期 3 (自製三) (R ²)	生命期 (自製平均)	生命期 (磷光光譜儀) (R ²)
Sample1	2.562 sec (0.8744)	2.258 sec (0.8569)	1.603 sec (0.7869)	2.141 sec	1.54 sec (0.5817)
Sample2	1.311 msec (0.8594)	2.882 msec (0.8625)	3.185 msec (0.8544)	3.126 msec	2.86 msec (0.7654)
Sample3	9.259 msec (0.7843)	8.333 msec (0.8118)	10.417 msec (0.7789)	9.336 msec	9.7 msec (0.7479)

(表八)以自製時間解析裝置測量 Sample1、Sample2、Sample3 的短生命期

(四) 以自製時間解析裝置測量 Sample1、Sample2 的長生命期物質，分析後的數據與磷光光譜儀數據比較：

slow	生命期 1 (自製一)	生命期 2 (自製二)	生命期 3 (自製三)	生命期 (自製平均)	生命期 (磷光光譜儀)
Sample1	11.23 sec	11.89 sec	10.47 sec	11.19 sec	10.52 sec
Sample2	8 sec	9.71 sec	9.05 sec	8.92 sec	8.3 sec
Sample3					

(表九)以自製時間解析裝置測量 Sample1、Sample2 的長生命期

結果及討論：

1. 因為在做數據分析時會有誤差(捨棄雷射脈衝寬部分的數據)，因此我們做三次實驗，並將三次做出來的 Lifetime 取平均值，使其實驗誤差減小。
2. 由螢光光譜儀測量得知 Sample1、Sample2 皆有一短生命期的放光及一長生命期的放光，而 Sample3 只量測的到短生命期的放光。(表七)
3. 短生命期的磷光其生命期約 10^{-3} sec，因此我們讓雷射光通過轉速 4800 轉的風扇產生週期性亮滅的光源，分別照在 Sample1、Sample2、Sample3 上，可藉此方法得短時間磷光之生命期。以螢光光譜數據為標準，Sample2 及 Sample3 的誤差為 9.30 %、3.75 %，準確度極高。

柒、結論

1. 實驗一：利用雷射射過僅留一小縫隙的風扇，產生一具有週期性亮滅的光源，以此激發固定在玻片上的磷光物質，再將由電子材料行購買之平價材料製作的光敏感應器以適當的角度(約 90°)接受磷光，並以 BNC 插頭連接至示波器，成功完成自製時間解析裝置。
2. 實驗二：使風扇轉速加快，風扇上的小孔孔徑變小，可使脈衝寬度變窄，增加裝置的解析度，再串聯電阻及反向電壓抑制雜訊，可使 S/N 達 53，較市售光敏感應器的 S/N(51)好。最後利用濾光片減少雷射散射的干擾，使整個裝置達到最佳化。
3. 實驗三：使用雷射及風扇成功的測量 Sample1 至 Sample3 短時間的生命期，準確度極高，Sample3 的生命期與螢光光譜儀的誤差只有 3.75 %。使雷射光直接照射在 Sample 上，並馬上遮斷光源，可藉此方法得長時間磷光之生命期，準確度也很高，Sample1 的生命期與螢光光譜儀的誤差只有 6.37 %。
4. 總結及未來展望：本實驗利用平價材料及物理實驗室的雷射光、示波器，在高中實驗室可成功自製時間解析裝置，且用以測量磷光材料生命期，與大學實驗室中的螢光光譜儀測量結果相差不遠，未來若能將此裝置帶入高中化學或物理實驗課程，必能使高中學子們增長不少見識。亦可將此裝置應用於檢驗水中的溶氧或順磁性物質，為水質把關，也為地球盡一份心力。

捌、參考資料

- [1]磷光. (2014, February 21). Retrieved from 維基百科, 自由的百科全書: <http://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A3%B7%E5%85%89&oldid=30300830>
- [2]何孟寰, 黃孝文, & 陳金鑫. (2005). 有機電激磷光材料與 OLED 磷光元件之發展近況. *CHEMISTRY (THE CHINESE CHEM. SOC., TAIPEI)*, 63(3), 443-462.
- [3]光電二極體. (2014, April 23). Retrieved from 維基百科, 自由的百科全書: <http://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E7%94%B5%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1&oldid=31078022>
- [4]反向電壓 http://pub.tust.edu.tw/mechanic/mclab/public_html/_private/electronics/diode/junction.htm