

台灣二〇〇五年國際科學展覽會

科 別：物理

作品名稱：創新儀器測量光的繞射與干涉之強度分佈

得獎獎項：大會獎第三名

學 校：臺北市立麗山高級中學

作 者：李欣樺

評語與建議事項：

本作品主要自製實驗器材，測量光經單狹縫及雙狹縫的繞射具干涉之強度分佈，藉實驗上改進，成功地發展兩種方法測量光的繞射干涉圖案之能量分佈，得到較精確的結果，所設計裝置操作方便，可供學校做為教材使用，具有應用價值，頗為難得。



爸媽給我一個相當自主的空間去學習，而從小我就非常喜歡自然科學，閱讀各樣科普書籍，尤其物理方面的知識，每每讓我感到興奮、奧妙不已，想要更進一步了解。進入高中參加陳聲台老師的科展專題小組，才真正明白研究科學的正確方法，不要只是會考試，而是要真正動手做求得甚解。我希望能用這次比賽的機會，展示我三年的學習結果，將來上大學後繼續朝這個方向研究。

Novel apparatus to display diffraction patterns on an oscilloscope

Abstract

Light diffraction and interference are two of most basic experiments, but they're the most powerful evident of wave properties of light. Due to the lack of high-quality and fairly accurate equipment, these important experiments are limited to the simple demonstration of the phenomena. Especially, the spatial intensity variations of diffraction and interference patterns are, however, completely not drawn to scale.

In order to precisely measure the diffraction and interference patterns intensity, we consult lots of reference, search for suitable materials and reuse waste old and useless laser printers.

Finally, overcoming disadvantages of time consumption and poor spatial resolution, we develop two accurate, practical and delicate methods. We use optical power control circuit created on our own to steady the brightness emitting of laser diode. Then the high linear photoelectric detector is stored on XYZ axis micro movement control platform. Next high degree of reflection rotating polygon mirror employing optical lever is collocated with low vibration brushless motor. Thus, a self-scanning intensity pattern plotter is accomplished. At the same time, it overcome difficulties like time wasting and low reliability during doing these kind of optical experiments.

In this article these two dependable and worth popularizing measurements of light diffraction and interference is going to be introduced.

摘 要

光的繞射與干涉實驗是光學中最基本的實驗之一，也是證明光的波動性質之最主要的依據。在一般的高中物理實驗室中受限於器材的等級與精度，只能對光的繞射與干涉做近似定性的實驗，尤其是繞射、干涉圖形上的光能量分佈，完全無法以現有的器材做精準的測量。

在這一年的專題研究中，我們小組針對測量光的繞射、干涉能量分佈為目標，參閱許多相關文獻，四處尋找適用的材料及零件，發揮廢物利用的精神，克服萬難，發展出兩種精巧、實用又準確的測量方法，我們以自行發展的光功率控制電路使雷射二極體的光度穩定，並且以高線性度的光感測元件裝載在自行設計的 X.Y.Z 微動機台上，同時利用光槓桿原理所構成的高反射度的旋轉六面鏡，配合低震動的無刷馬達，完成了一套能自動掃瞄繞射能量分佈曲線的測試儀，經實際使用相當地穩定可靠，可以快速而精確地獲得大量的實驗數據，比對這些數據不僅能驗證繞射理論，並能更深入地延伸理論的探討。

創新儀器測量光的繞射與干涉之強度分佈

壹、研究動機

在學校實驗室做光的繞射、干涉實驗時，每當視線經由狹縫對準光源可以在狹縫間看到許多互相平行明暗相間的線條，但是要從光源上方的標尺之間讀出正確的條紋數目是相當困難的，不但消耗眼力，而且誤差很大。課本上對這些條紋的位置及能量分佈都印有標準的圖形，要怎樣去驗證他們呢？以實驗室裡現有的傳統器材是無法精準地測出這些結果的；在以往發表過的科展優勝作品專集裡有些作品就因實際測量極為困難之故，將整個繞射實驗改成電腦模擬者。回顧前人文獻，我們想要嘗試新的方法來解決實驗上的難題，希望藉著實驗設計的改進能精確地測出繞射、干涉的條紋位置及其能量分佈。

貳、研究目的

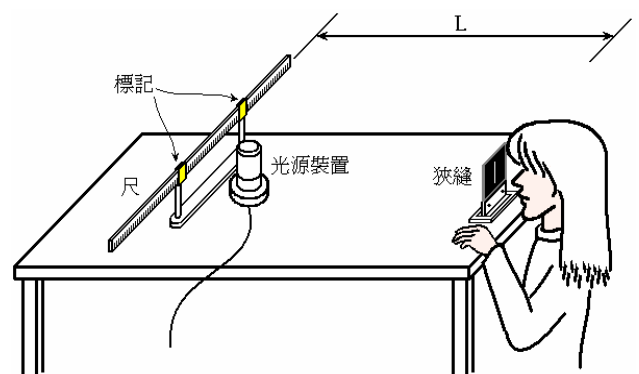
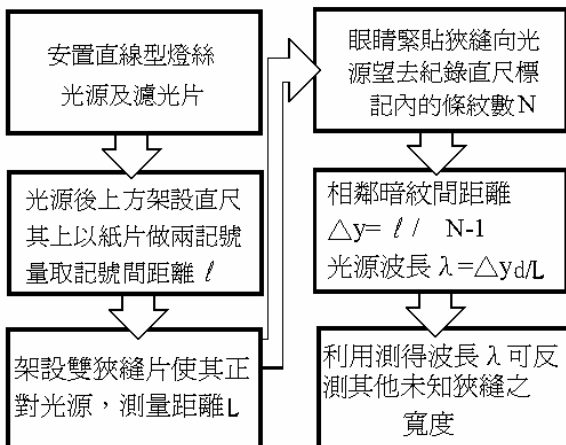
- 一.理論方面，由高中物理光學出發，向上探討繞射、干涉能量分佈函數。
- 二.實驗方面，針對傳統繞射、干涉實驗的缺點及困難，逐項改進力求突破。
- 三.製作方面，完成一套操作方便，精確實用的繞射、干涉能量分佈之測量儀器。

參、研究設備器材

- 一.自製器材
 - (一).雷射功率控制(A.P.C)電路。
 - (二).光照度計及其線性探頭。
 - (三).掃描式多面鏡繞射圖案瞄繪儀。
- 二.廠製器材
 - (一).數位示波器。
 - (二).光功率計(商借)。

肆、研究過程

- 一.回顧傳統繞射干涉實驗
 - (一).透過狹縫對準光源眼睛直接觀察干涉條紋



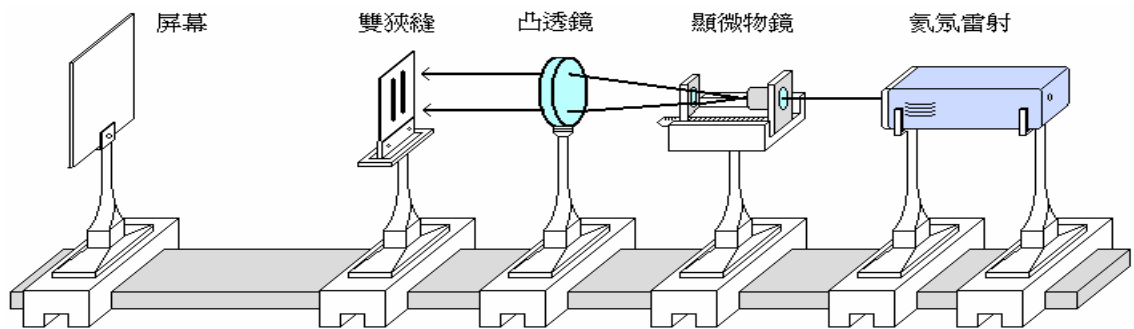
1.優點:

- (1) 裝置簡單，操作方便。
- (2) 調整容易，隨時可做。

2.缺點:

- (1) 條紋影像模糊，數據誤差相當大。
- (2) 直線燈絲不易購得，濾光片波長無從得知。
- (3) 眼睛酸疼，不耐長時間實驗。

(三).以雷射為光源



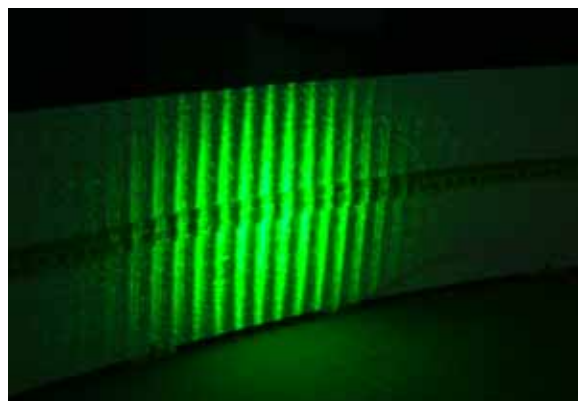
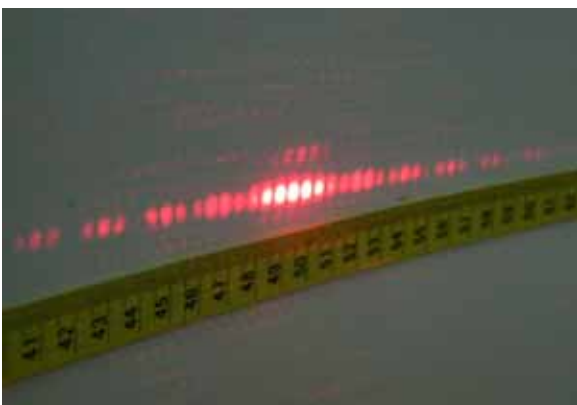
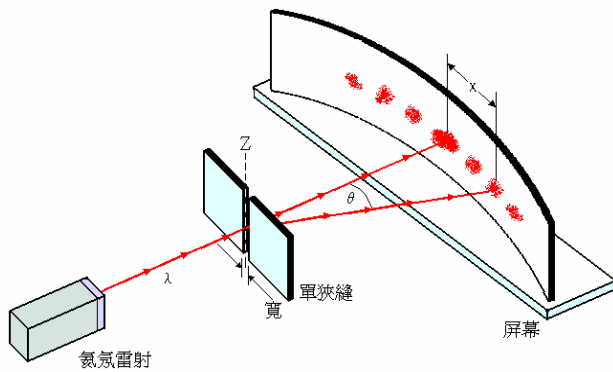
1.實驗裝置如上圖，實驗步驟(略)

2.優點: 經適當調整，繞射干涉條紋的位置與數目均較前述實驗清晰許多。

3.缺點:

- (1) 裝置繁複，調整較費時，器材佔用空間大。
- (2) 屏幕若移遠，條紋較易分辨，但光度減弱，反而造成暗紋邊界更加模糊。
- (3) 屏幕上條紋間距只能用米尺測量，精確度僅有毫米等級。
- (4) 亮紋的光強度只能以肉眼比較，無法確知其相對強度變化量。

4.我們曾做過的改進(圓弧屏幕及所附尺規於此僅以圖型及照片呈現):



二.文獻回顧與探討

(一).雙狹縫干涉

設右圖入射光波經雙狹縫至 P 點時的電場強度分別為

$$E_1 = E_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

ω 為角頻率， ϕ 為二波相差， P 點合成波電場為

$$E = E_1 + E_2 = E_\theta \sin(\omega t + \beta) \quad (3)$$

$$\text{式中 } \beta = \frac{1}{2}\phi = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (4)$$

$$\text{及 } E_\theta = 2E_0 \cos \beta = E_m \cos \beta \quad (5)$$

上式中 θ 為 P 點至雙狹縫中點及狹縫中垂線交角，而光照強度 I (瓦特/米²) 是與電場振幅平方成正比的，

故 P 點合成波強度 I_θ 與一單獨波作用時之強度 I_0 比為

$$\frac{I_\theta}{I_0} = \left(\frac{E_\theta}{E_0} \right)^2 \quad (6)$$

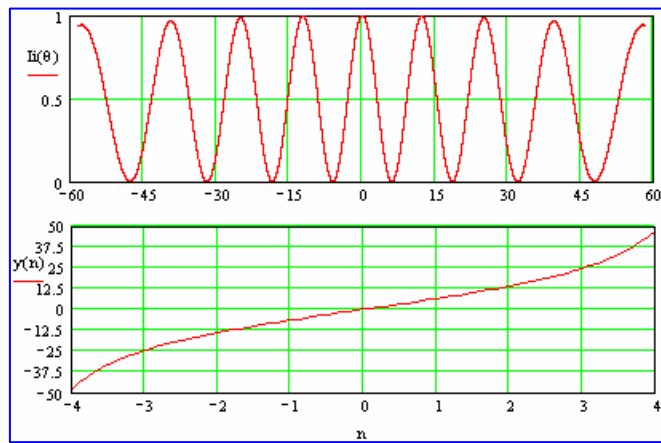
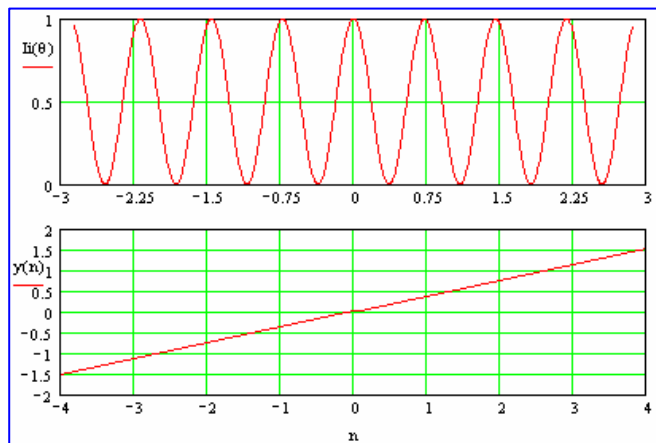
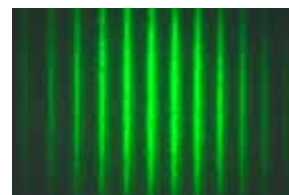
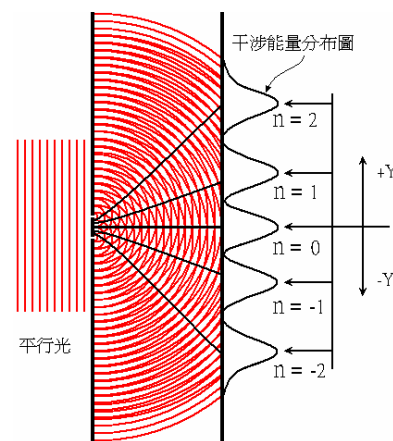
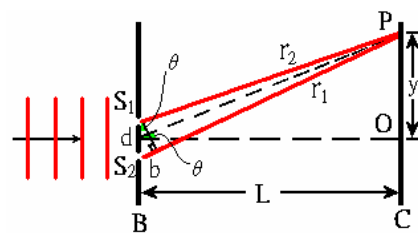
$$\text{故 } I_\theta = 4I_0 \cos^2 \beta = I_m \cos^2 \beta \quad (7)$$

干涉強度極大的位置發生在 $\beta = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$

$$\text{即 } d \sin \theta = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

而干涉強度極小之位置為

$$d \sin \theta = \left[n - \left(\frac{1}{2} \right) \right] \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$



討論:

1. 我們寫程式分析上列公式，上圖左為在狹縫寬度極小 ($b = 0.1\lambda$)，及狹縫間隔較波長甚大 ($d = 80\lambda$) 的條件下，雙狹縫干涉條紋呈現明暗交替、等間隔排列，每一亮紋的光能量的照度幾乎完全相等，與物理課本所述相同。
2. 上圖右為在狹縫寬度不變而狹縫間隔縮小為數個波長 ($d \approx 5\lambda$) 時，干涉條紋光能量照度雖維持不變，但已不再是等間隔排列，條紋間隔隨著干涉角度加大而呈非線性的增加。
3. 如果使用平直的屏幕，我們可推導得干涉第 n 亮紋與中央亮紋的距離 $y_{(n)}$ 為:

$$y_{(n)} = L \cdot \frac{n\lambda}{d\sqrt{1 - \frac{n^2\lambda^2}{d^2}}} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

上式中 $y_{(n)}$ 與 n 並不成正比，實驗時以米尺測量 $y_{(n)}$ 及 L ，

若狹縫寬度已知，即可代入上式求得入射光波長。

4. 以極座標呈現干涉能量對角度的分佈更能看出大角度的亮紋寬度變大，且其中心位置也非線性地向兩側增加，若以狹縫處為圓心製作一個圓弧形屏幕，並在其上刻印角度標記，實驗時可立即讀出干涉條紋的方位角，非常方便。

(二). 單狹縫繞射

如右圖我們討論 **Fraunhofer** 遠場繞射，若將狹縫分為寬度 dx 之無限細縫，每個細縫發出的子波抵達屏幕 p 點時將互相干涉， ϕ 為出自狹縫頂端和底端的光線抵 p 點時之相角差， p 點總電場振幅 E_θ 可以用相量圖表示為：

$E_\theta = 2R \sin(\phi/2)$ ， θ 為 p 點繞射角， $\phi = E_m/R$ ， E_m 為圖

中的合成波弧長， $E_\theta = \frac{E_m}{\phi/2} \sin \frac{\phi}{2}$ ，若令 $\alpha = \frac{\phi}{2}$ ，狹縫頂

端和底端的光線抵 p 點時之光程差為 $b \cdot \sin \theta$ ，

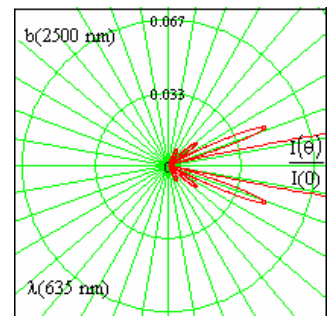
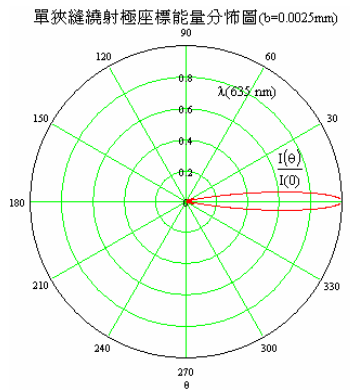
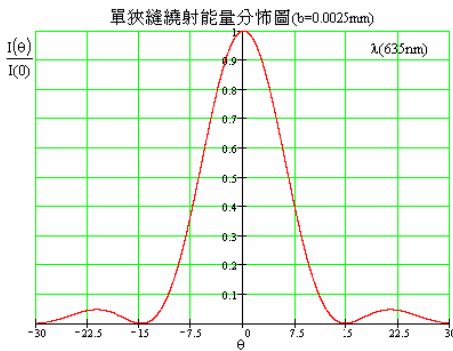
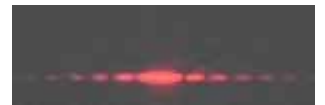
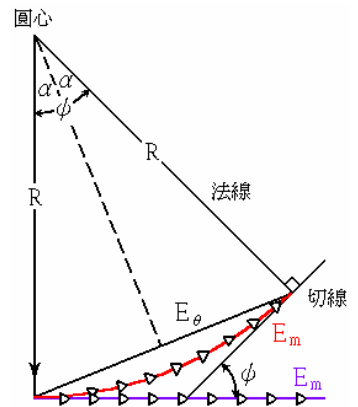
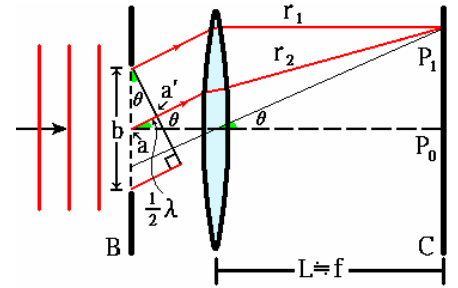
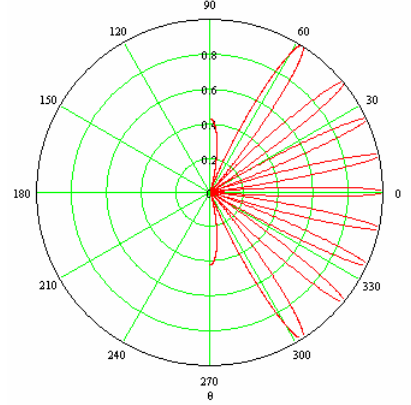
$$\text{則有} \quad E_\theta = E_m \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (11)$$

$$\text{其中} \quad \alpha = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \quad (12)$$

P 點合成波照度 I_θ 與狹縫正前方屏幕之照度 I_0 之關係為

$$I_\theta = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (13)$$

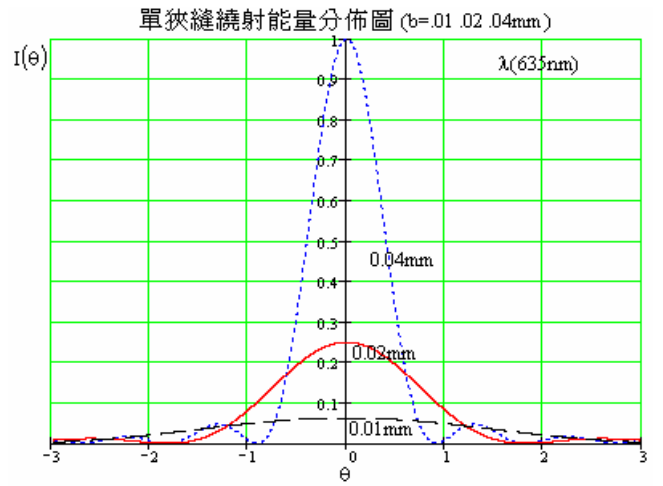
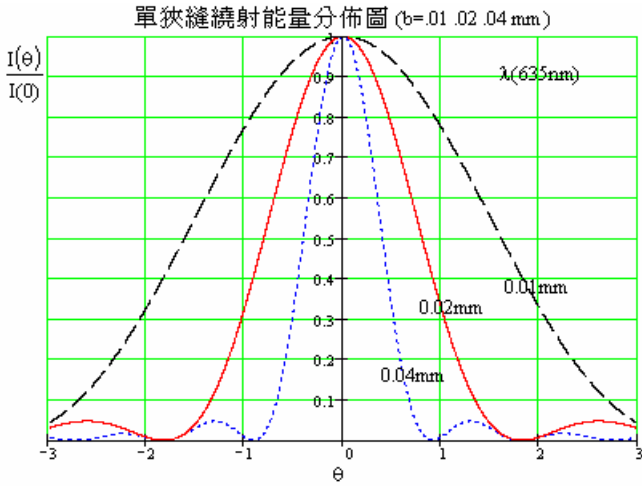
雙狹縫干涉極座標能量分佈圖 ($d=0.003\text{mm}$)



討論

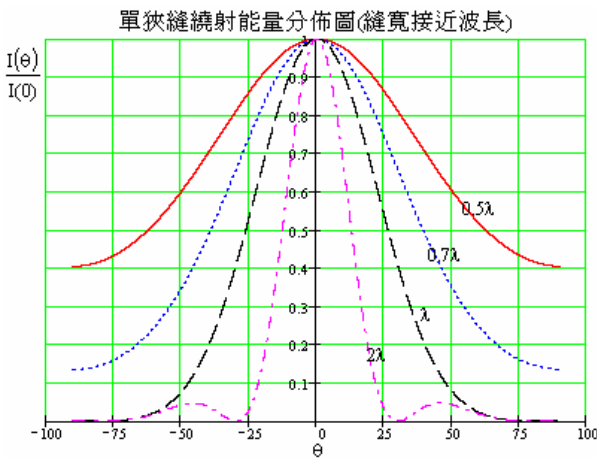
1. 依(13)式作圖，單狹縫繞射中央亮紋寬度是次級亮紋的兩倍，而能量卻多達 21.3 倍。
2. 以極座標觀察單狹縫繞射能量幾乎全集中在中央小角度範圍內，上右圖為將極座標放大

15 倍後可以清楚看到次級、三級...等極大出現，能量分佈卻隨 θ 增加而越來越小。

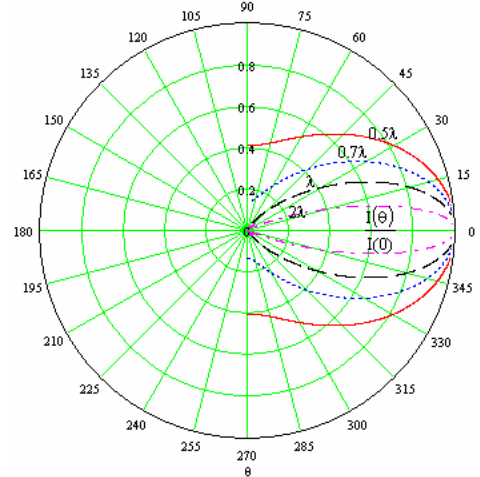


3. 上左圖顯示繞射能量隨著狹縫寬度減少而漸向兩端擴散，中央主極大及各級次極大寬度都變寬，縱座標是以 $I(\theta)/I(0)$ 相對強度求值，呈現出 $[(\sin \alpha)/\alpha]^2$ 的分佈特性。

4. 上右圖的縱座標是以能量最高者的主極大為 1，程式執行的結果可看出中央主極大能量是與狹縫寬度的平方成正比的。



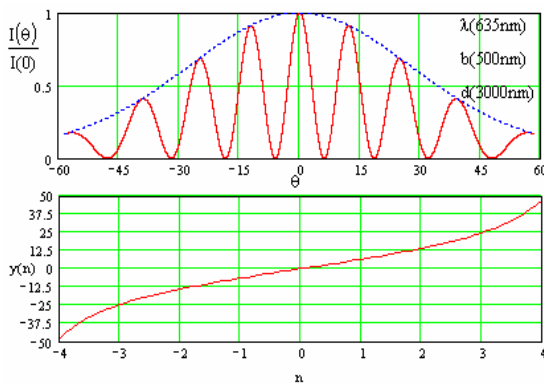
單狹縫繞射極座標能量分佈圖(縫寬接近波長)



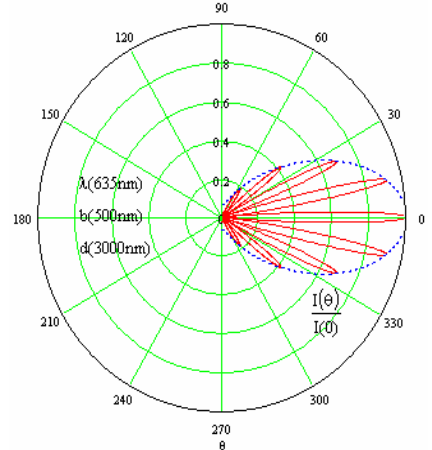
5. 狹縫寬度若持續減小會有甚麼結果呢，上面兩圖顯示當狹縫寬度等於入射光波長時，左右僅產生最後一次繞射極小，若狹縫寬度小於波長，繞射光向兩旁擴散不再產生極小。

6. 前述的雙狹縫干涉曾假設狹縫為無限窄 $b \ll \lambda$ ，若此條件不成立，干涉條紋將受到繞射圖案條紋之強度所約束，縫漸加寬時，干涉條紋強度被繞射因數 $(\sin \alpha/\alpha)^2$ 所調幅，即為

$$I_{\theta} = I_m (\cos \beta)^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (14)$$

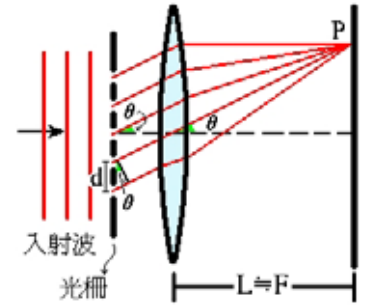


雙狹縫干涉極座標能量分佈圖 (d=0.003mm)



(三).N 狹縫干涉

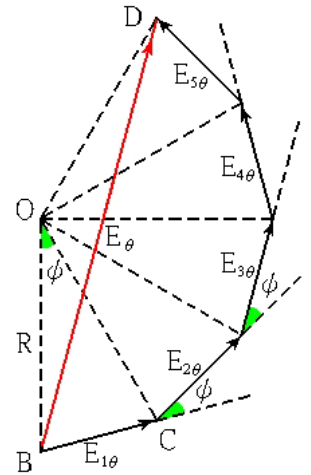
右圖為一 N 狹縫光柵干涉實驗裝置，每條狹縫寬度皆為 b ，相鄰狹縫上對應點之間的距離為 d ，每一對應點發出的沿 θ 角方向的繞射光之間有光程差為 $d \cdot \sin \theta$ ，而相位差為 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \theta$ 屏幕上 P_θ 點的光振動，等於每條狹縫沿 θ 角方向的繞射光線在該點所引起的光振動的合成，這些光振動均有相同的電場振幅 $E_{i\theta}$ ，它們由下式決定，即



$$E_{i\theta} = E_0 \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (15)$$

其中 $\alpha = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \quad (16)$

我們利用右邊的向量圖計算在屏幕上 P_θ 點的合成光電場的總振幅 E_θ ，圖中電場振幅構成 $E_{i\theta}$ 以 R 為半徑的圓的等長弦



$$R = \frac{E_{i\theta}/2}{\sin(\phi/2)} \quad (17)$$

令 $\beta = \phi/2$ ，由等腰三角形 OBD 以及(15)和(17)式，可得

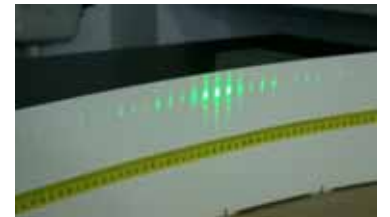
$$E_\theta = E_{i\theta} \frac{\sin N\beta}{\sin \beta} = E_0 \frac{\sin \alpha}{\alpha} \frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \quad (18)$$

利用上式，可以得到多縫繞射的光能量分佈公式為

$$I_\theta = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2 \quad (19)$$

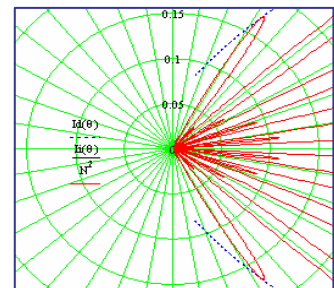
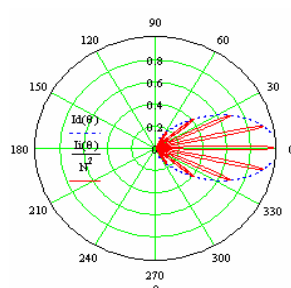
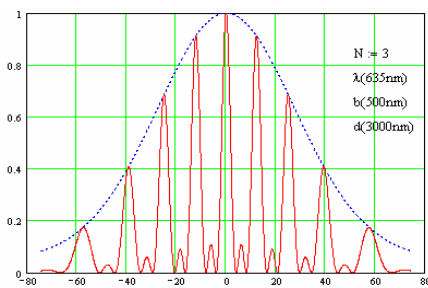
其中 $\alpha = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \quad (20)$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (21)$$



討論

- 1.式(19)中 $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2$ 是單縫繞射因子，而 $\left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta}\right)^2$ 是多縫干涉因子，兩者共同影響能量分佈。
- 2.其實式(19)可以是光經狹縫產生繞射及干涉能量分佈的普適公式，我們於(19)式中若令 $N = 1$ ，多縫干涉因子即變為 1，而(19)式就變成與(13)式全等，此即回至單狹縫繞射。而若令 $N = 2$ ，多縫干涉因子 $(\sin N\beta / \sin \beta)^2$ 將可化簡成 $\cos^2 \beta$ ，這麼一來(19)式又變成與前面第(7)式完全同義，變成雙狹縫干涉了。
- 3.式(19)若令 $N = 3$ ，其干涉的圖形有了明顯的變化，下面左圖中我們可以發現每一級干涉極大之間，都有微小的能量隆起，極座標放大圖中也顯示了此一特質。



4. N 條狹縫干涉時，主極強亮紋的位置取決於

$$d \sin \theta = \kappa \lambda, \quad \kappa = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (22)$$

這時有 $\beta = \kappa \pi$ ， N 條狹縫之間發生相長干涉，各主亮紋位置與雙狹縫干涉時重疊，且儘管 $\sin N\beta = 0$ 和 $\sin \beta = 0$ ，但它們的比值 $\sin N\beta / \sin \beta = N$ 。

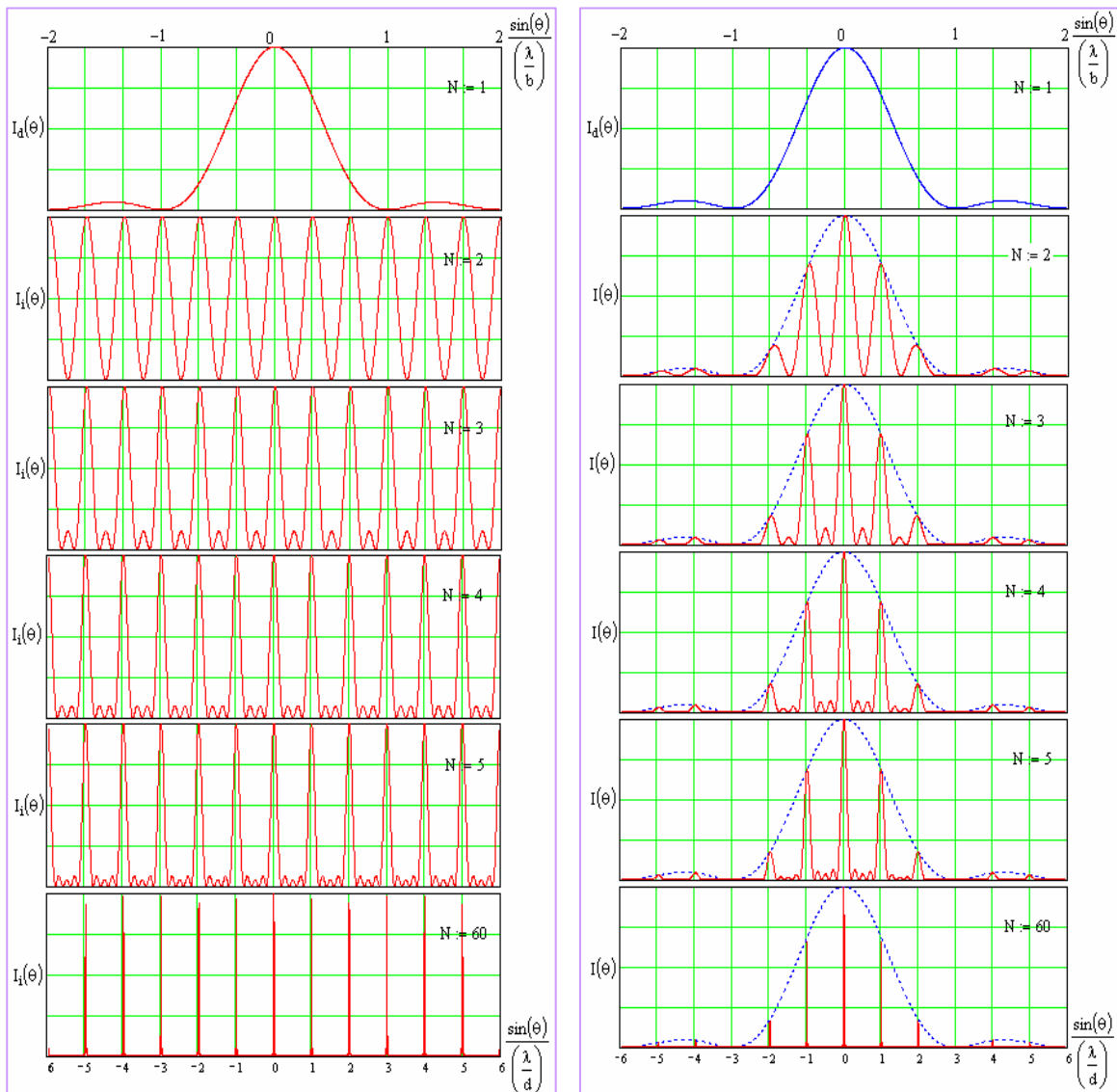
5. N 條狹縫干涉時，暗紋的位置取決於

$$d \sin \theta = (m\lambda) / N, \quad m \neq 0, \pm N, \pm 2N, \dots \quad (23)$$

這時 $N\beta$ 等於 π 的整數倍，而 β 卻不是 π 的整數倍。於是， $\sin N\beta = 0$ ， $\sin \beta \neq 0$ ，根據式(19)，這時 N 條狹縫之間發生相消干涉。由於 m 是滿足上式條件的整數，因此在相鄰的主極強之間有 $N - 1$ 條暗紋，且共有 $N - 2$ 個次極強。

6. 主極強的光強是單狹縫在該方向光強的 N^2 倍。因此縫數越多，主極強的光強越強。

7. 下左圖顯示，主極強的位置與縫數 N 無關，但是 N 越大，主極強亮紋越細銳，也就是光能量越集中。由下右圖可以看出多狹縫干涉的光強度分佈受單狹縫繞射光強度分佈調幅的結果，所有的干涉條紋都在單狹縫繞射曲線的包跡趨勢內。



三.實驗設計

(一).實驗的設計和改進雖然是針對傳統繞射、干涉實驗的缺點及困難，逐項改進力求突破，但因為整個實驗過程歷時兩年，其中遭遇多次失敗和挫折，最後呈現的實驗設計有許多是和最初的想法及預定作法不同的，在完成全套的自製器材後，我們儘量去蕪存菁地將摸索的經驗和值得參考之處整理出來。

我們的主要目標是希望能精確測量光線經狹縫繞射、干涉後在屏幕上的能量(光照度)分佈，同時希望能縮減整體實驗器材的體積，簡化操作和調整的步驟，實驗數據能數位化直接讀取，更希望能在實驗中即時監看繞射、干涉能量分佈曲線的模樣。

我們將整個實驗器材設計分為五個部分來討論:即光源(雷射)發射部分、光感測器及線性接收與放大電路、透鏡及狹縫等光學元件、機械傳動及微調定位裝置、反射掃描及影像擷取。

(二).設計及改進過程

1.光源(雷射)發射部分

(1) 原初我們在實驗室用的氬氙雷射因體積太大，早就是我們減肥計劃裡的首要目標、它還有三個致命的缺點，即開機後預熱時間過長、無法自由調整亮度及發射功率穩定度太差，我們用光功率計測量過，在短短三分鐘內其發射功率漂移即達 7%，肉眼雖看不出差異，但是用高靈敏度感測器測量繞射第二或第三亮紋之微弱信號時，此漂移將嚴重影響實驗的精準度。



(2) 一般市售的雷射筆雖然價廉體積小且不需預熱時間，但經實測其功率穩定度比較氬氙雷射還差，而且不易駕設固定。

(3) 我們四處向製造廠商洽商，購得右圖的小型雷射，只須外加三伏特直流電源即可工作，外型均勻且易於固定，可惜光功率漂移是所有雷射中最大的。



(4) 下兩圖為我們向大學實驗室借得的半導體雷射及其電源供應等附件，它們的各項特性都優於以上幾種雷射，但功率都太大了，全都在 20mw 以上，長期實驗情況下恐將對眼睛構成嚴重傷害，因此老師不准我們使用。



(5) 透過網路收尋，在桃園某工廠我們買到了實驗室等級的雷射，功率為 3mw，下頁圖中可以見到其照片及出廠時的實測數據，在一小時的連續通電下，功率持守在 3.16mw，漂移僅有 0.01mw，在我們前半段的實驗中全是使用這座雷射。



(6) 多次修改設計後，我們面臨必須縮小雷射的體積，好與其他零件共容於一個基座上，而且我們希望雷射的輸出功率要能自由調整，因為測量極細小狹縫時，繞射的次極亮紋能量極微弱，必需增強雷射功率輸出以使感測器能正確反應繞射條紋的強弱變化；但是測量光柵時，每個亮紋都是極高的能量集中點，往往使得感測器超過負荷而呈現非線性反應，這時又必須降低雷射輸出功率以免損壞感測系統、同時得到正確的能量分佈曲線。



(7) 要達成以上目標，我們必須從零件著手，尋找適用的雷射頭開始。我們拆開一些舊的光碟機並卸下其雷射頭，用電錶測量雷射二極體各個接腳間的直流特性，同時查書以認識並熟悉這種零件的用法。因拆下來的雷射二極體接腳都太短，無法在麵包板上做實驗，所以還是找到外商代理的公司購得全新的雷射二極體。

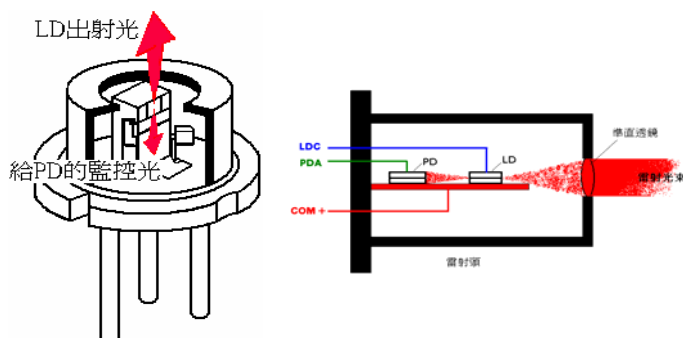


(8) 雷射二極體(LD)有三支腳，下左圖的中央接腳為公共線，右腳為半導體(LD)的陰極，左腳則為檢光二極體(PD)的陽極，下右照片為其與一般發光二極體(LED)的比較。



(9) 當 LD 工作時其光線大部分向著外側正前方射出，但是有少許光線會反向照射藏於其內的檢光二極體(PD)，當 LD 發射的光功率有變動時，PD 會同步感受此一變動而產生反應的光電流，一般高穩定度的半導體雷射就是充分利用 PD 的光電流之變化作為控制 LD 功率輸出的負回授信號，使 LD 輸出功率穩定。

(10) LD的導通特性在下頁，由它的P-I曲線可以看出在順向偏壓超過崩潰膝點後，LD 輸出功率 P 將隨順向電流的增加而上升。



(11) 雷射二極體的實驗

a. 實驗目的：

調變 LD 的驅動電流，測量雷射的 P-I 特性圖。

b. 實驗材料：

雷射二極體 LD63505、平行透鏡、電容、電阻、麵包板、數字電表、光功率計、電源供應器。

c. 實驗裝置：

按右圖將各元件插在麵包板上，接妥電源。

d. 實驗步驟：

(a) 慢慢調高電源的輸出電壓，直到安培計讀數為 30mA 為止，記錄此 LD 的電流值。

(b) 測量 R3 的壓降值，此值再除以 R3 電阻值即可得到流經檢光二極體的電流大小。

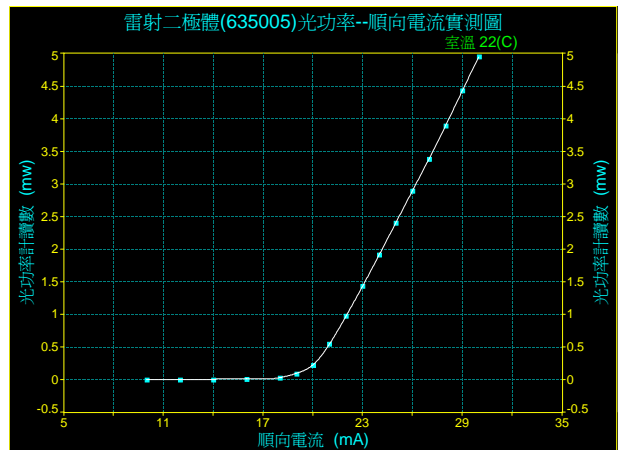
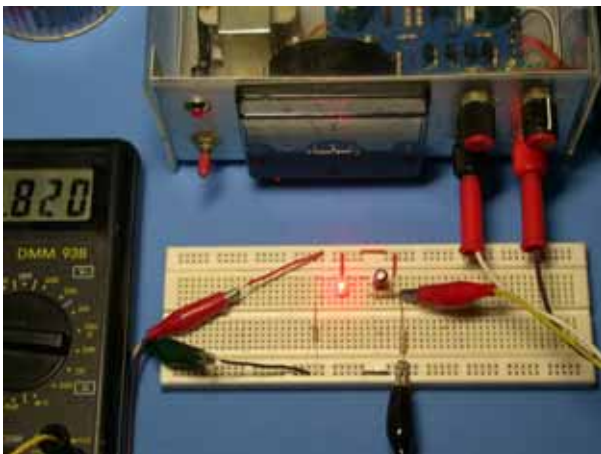
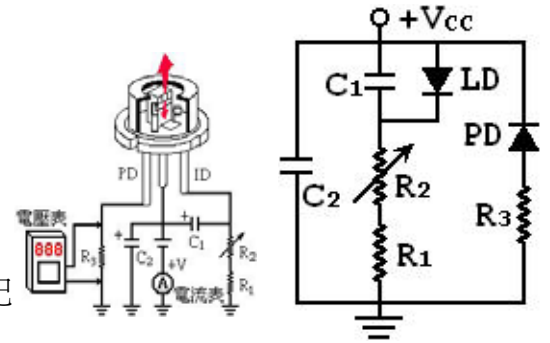
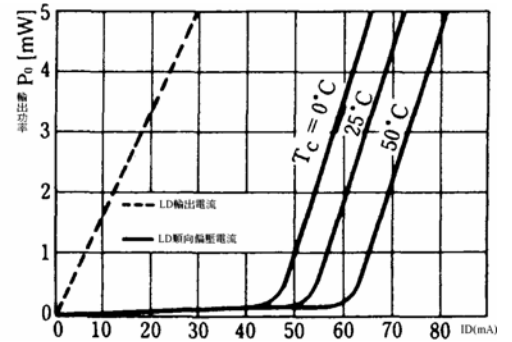
(c) 將 LD 的平行光束照在光功率計的接收頭，記錄此時的電源電壓，安培計電流值，R3 壓降值以及光功率值，LD 與光功率計的探測頭垂直，並保持 5(cm)距離。

(d) 改變 R2 的電阻值，使安培計的電流下降 1mA。記錄電流值，R3 壓降值以及對應的光功率值。

(e) 重複上項步驟，電流每下降 1mA 記錄一次，直到電流不再下降為止。

(f) 改變 R2 的電阻值(反向旋轉)，電流每上升 1mA 記錄一次，直到電流 30mA 為止。

(g) 來回測量各三次，以所得數據求平均值，畫出雷射的 P-I 關係圖。

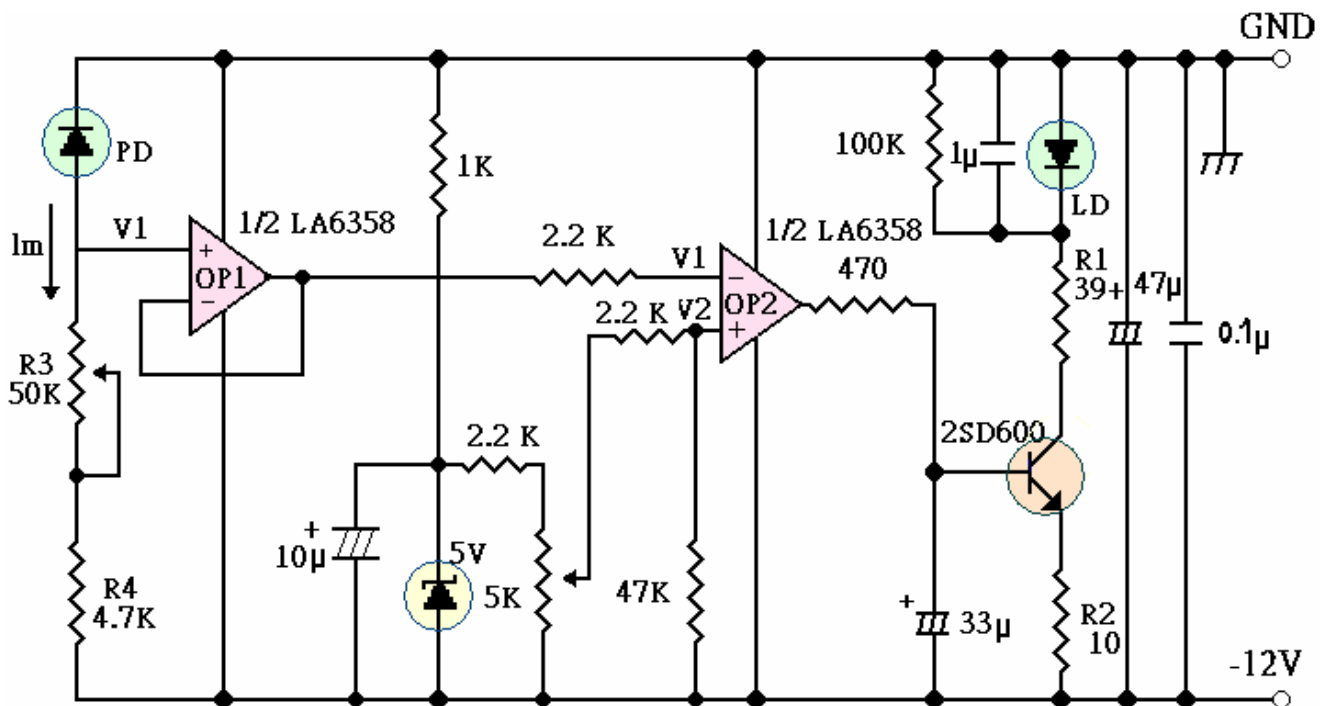
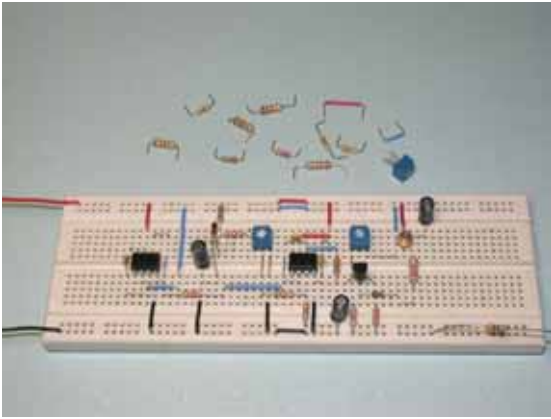


e. 實驗結果：

- 由LD的P-I曲線顯示其輸出功率與順向電流的關係可分為三個段落，即截止區、臨限區及線性區，若能改變LD在線性區的工作點即能調整其輸出功率。
- LD的順向電流達到約 15mA 時即可看到 LD 亮起，此後亮度增加迅速，當電流增加至 20mA 時已不能直接目視，須配戴護目鏡才可繼續操作實驗。
- 即使是同一型號的 LD，每個 LD 的 P-I 特性都不盡相同，須實測後再挑選使用。
- 我們買到的 LD 功率為 4mw，其順向導通偏壓都大約為 2.2 伏特，變化極小。
- LD 的 P-I 特性受溫度的影響很大，我們雖將實驗室空調定溫於 22°C，但是無法

保證在 LD 附近因通電生的熱是否能迅速與環境達到熱平衡。

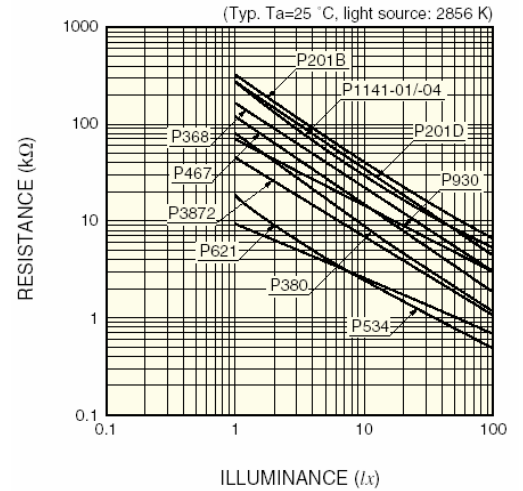
(f)為了解決LD功率受溫度影響的因素，我們採取兩個對策，其一為在LD上裝散熱片，維持LD與環境間的熱梯度不變；二為利用PD的電流為負回授信號，將其送入功率控制(A.P.C)電路中，下圖為在麵包板上實驗功率控制電路的過程，以及最後完成的功率控制電路全圖，A.P.C電路經實測，即使將LD功率調至最大(4mw)，在長時間使用下LD輸出功率都極為穩定，漂移均不高於 1%。



2.光感測器及線性接收與放大電路。

- (1) 在光學系統中，最常被使用的感測器為分別為光敏電阻(CDS)、光電晶體(PT)、及光二極體(PD)，它們各具特性及適用的領域，我們該選用何者呢？
- (2) 光敏電阻因價格廉宜，受光基底面積又可以無限擴充，靈敏度高，廣泛使用在各類自動控制產品中，下圖為其外形及特性圖。各類 CDS 有一個共同缺點即其電阻變化與光照強度之間呈現非線性關係，這個致命傷限制了 CDS 在高精確度感測器方面的用途。熱雜訊較高也是它的主要缺點之一，而且指向性太低、接收範圍太廣，難以用在高精確度要求的光學實驗中，我們初期的實驗，曾使用過幾種 CDS 來感測屏幕上繞

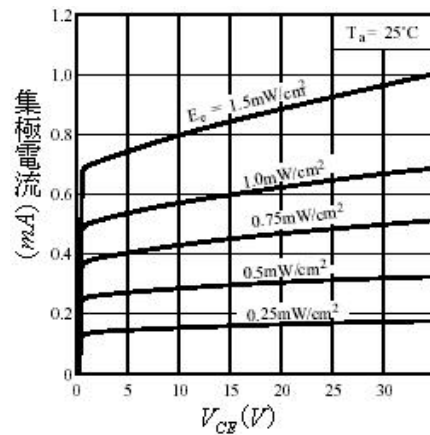
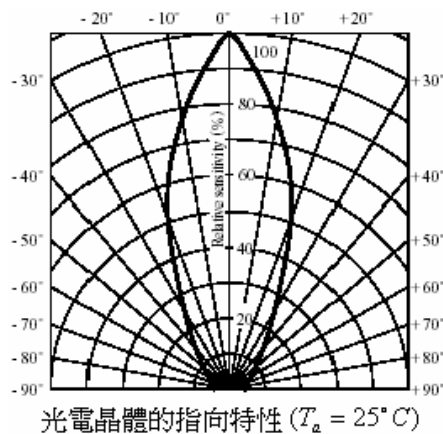
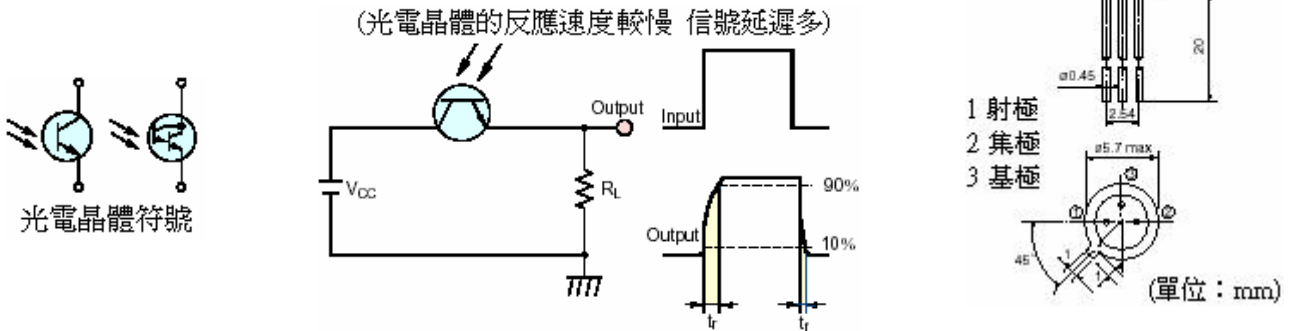
射紋路的能量分佈，後來即因以上各項缺點而放棄。



(3) 光電晶體(PT):

光電晶體的符號及外型如附圖，其特點為:

- a. 極高的光感靈敏度。
- b. 極高的電流放大率。
- c. 中度的指向特性。
- d. 反應速度較慢，快速信號將受延遲。
- e. 光電流和集極射極間的電壓呈非線性關係。
- f. 無光照射時之隱藏電流 I_{CEO} 偏高，雜訊大。



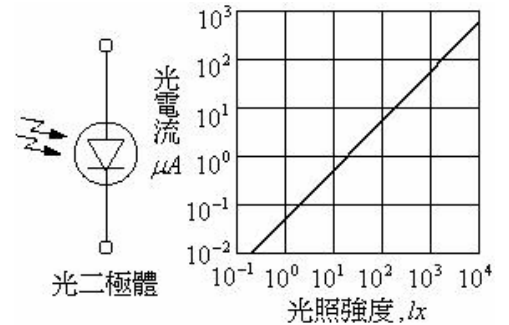
光電流和集極射極間的電壓之線性關係不佳，及無光照射時之暗電流偏高固然是我們很頭痛的問題，但在已經裝置於機組上卻又不得不拆除它的真正原因，是我們設計的掃描式繞射圖案產生器須用到高速旋轉的反射鏡，繞射圖案通過狹縫射向光電晶體的

時間間隔極短，如同脈衝一般，光電晶體因延遲反應使繞射圖案略為扭曲變形了。

(4) 光二極體(PD)

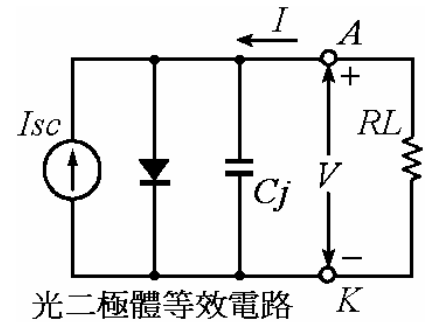
光二極體的外型及特性如附圖，其特點為：

- 入射光量和輸出電流有良好的直線性。
- 反應速度快，遠優於光電晶體。
- 極高的指向特性。
- 周圍溫度變化時，輸出變動小。
- 無光照射時之暗電流很小。
- 光感測靈敏度不高，遠低於其於光感測器。



討論：

(a)上面各特點中，直線性當然是我們必要的考量，但基於對光電晶體延遲反應的經驗，所以使用反應速度快的光二極體卻成爲更重要的選擇，右圖顯示(PD)的等效電路，其中的極間電容 C_j 特別低是(PD)速度快的主要關鍵。

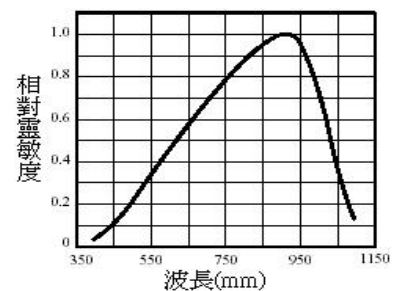
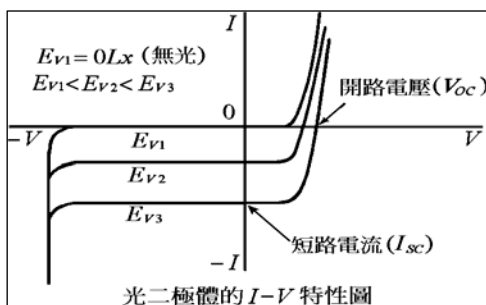
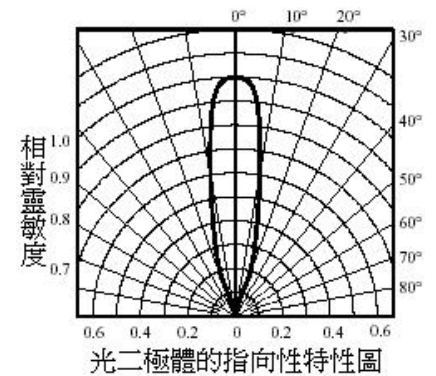


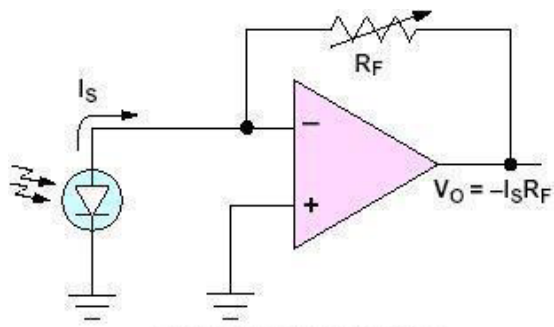
(b)光二極體極高的指向特性也是我們考慮用它的主要原因，在感測光能分佈時，它能排除斜向入射的雜光，只對正前方欲探測點有反應，這樣可大爲提高信號對雜訊比(S/N)。

(c)由於我們使用波長爲 635(nm)的 LD，所以應該選用波長於此範圍內有較高相對靈敏度的 PD，由附圖可以看到兩者的關係。

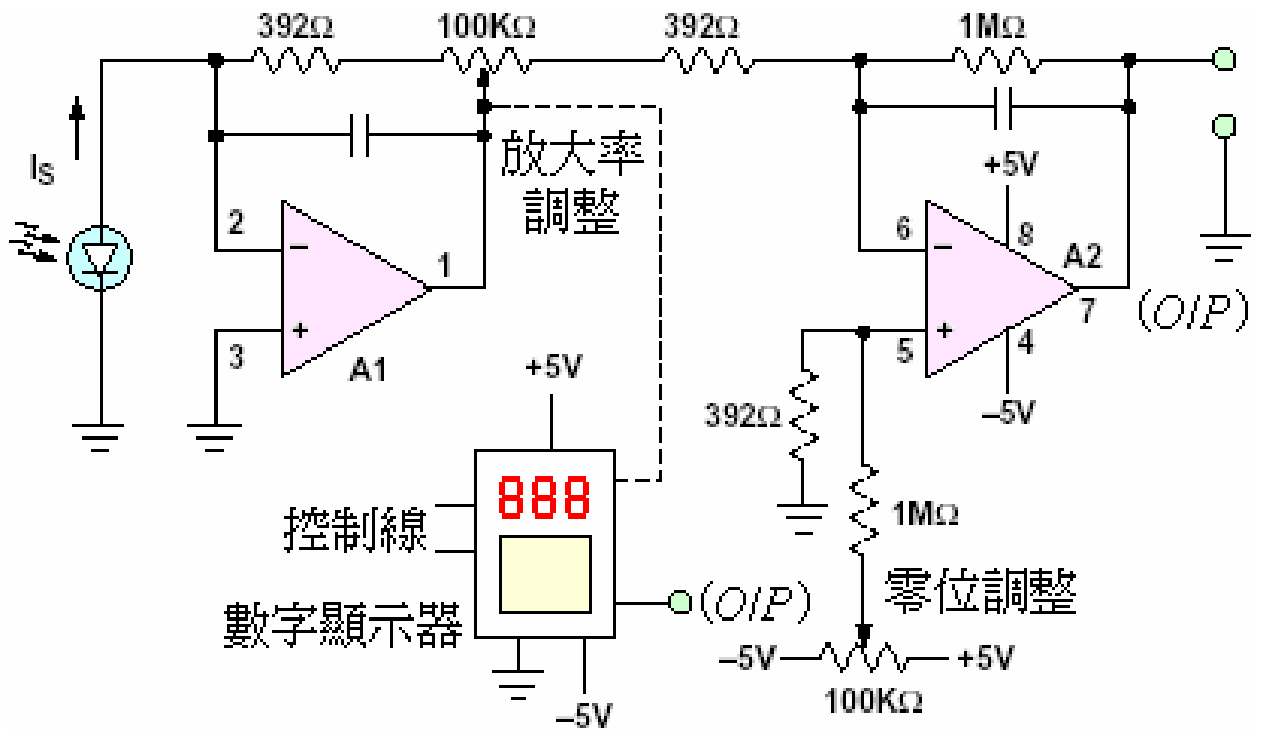
(d)光感測靈敏度不高是 PD 的主要缺點，所以必須爲它加上一個放大器以彌補靈敏度之不足，但是放大器的選擇必須是低雜音、高速度、高線性者，否則反而掩蓋了 PD 的各項優點。

(e)與 PD 配合的放大器常用的是運算放大器(OP)，其基本電路見於下頁附圖，除了選用高品質 OP 以外，在麵包板上預做實驗更是必要的，因爲每個品牌的PD靈敏度多不相同，於此應調整 R_f ，使OP放大率達到所需，再組裝到電路板及機殼內。





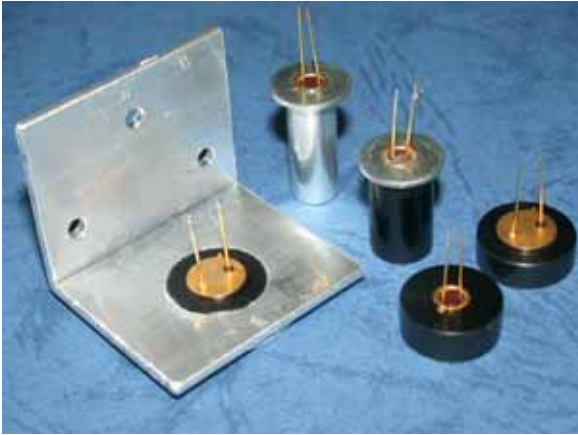
PD加OP的基本放大電路



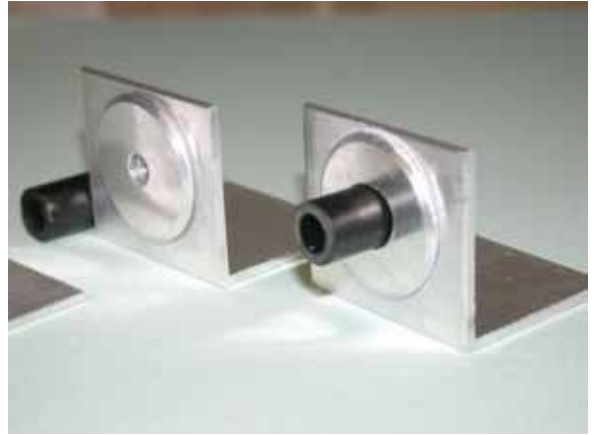
BPW-21 及 BPW-24 是特性極為優異的光二極體



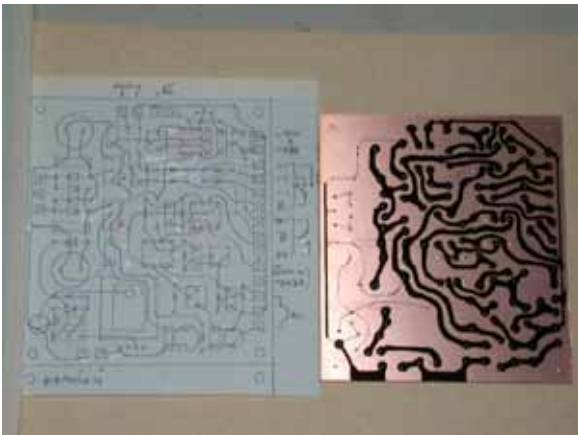
在鋁板切割 PD 的固定框，也兼具 PD 的散熱功用



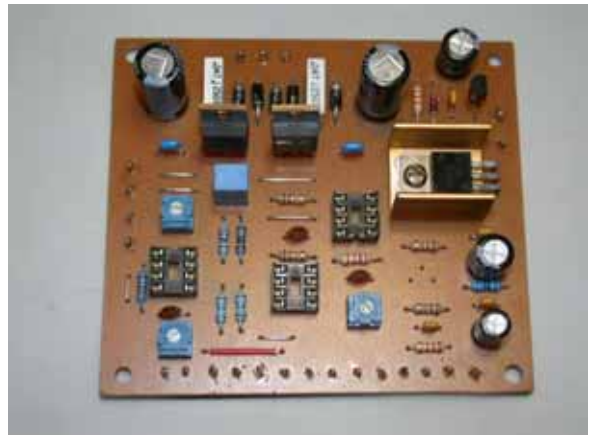
設計 L 形鋁固定座，可以承裝不同型式的光二極體



L 形鋁固定座前方的套筒可以增加 PD 的指向性及 S/N 比



麵包板上實驗的電路移植到電路 PC 板上，整齊美觀多了



將光二極體放大電路，顯示器信號及電源電路裝在一起



須先完成機殼外圍的開關、插頭及顯示器部分再做內部



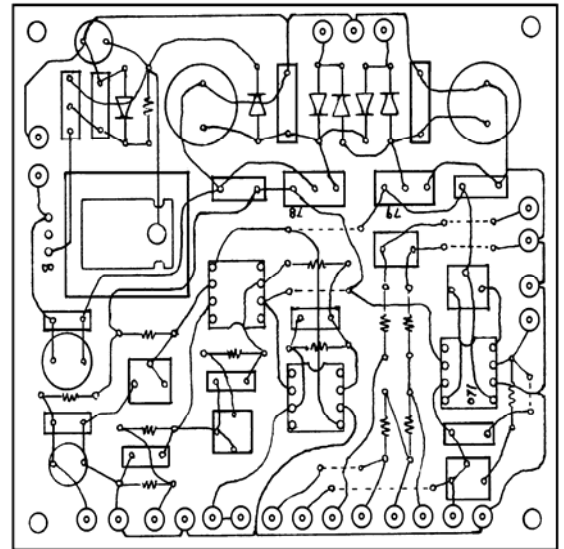
PC 板焊妥，待置入機箱後自製的照度計即將完成

(f) 先在麵包板上做實驗，可以隨時修改電路、更換零件，非常方便，但電路一經確定且調整完成後，就有必要的將其移植到印刷電路(PC)板上且裝入機殼中，在機殼面板上裝有顯示器模組及輸出、入插座，好與光二級體及示波器聯結，同時電源變壓器及穩壓電路亦裝在機內，使用時只要打開電源，將來自光二級體一端的電纜線插頭插入

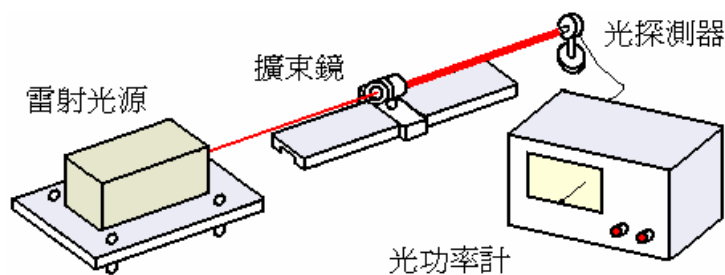
本機即可讀取 PD 所感測到的光照強度(單位 lx)。

(g) 自製的照度計應如何校正呢?我們如下圖將桃園買到的實驗室等級的雷射架設妥當,使其光束通過 10 倍的擴束鏡並對準 TQ-8210 光功率計的探測頭,調整光功率計的波長範圍使其與雷射重合,讀取光功率計上的數值 (mw),將此讀數乘以探頭受光面積($1 \times 1cm^2$)再乘 10 倍即為照度值 (lx)。將探測頭及照度計換成自製的,調整機內可變電阻,使其讀數為 TQ-8210 測量值的 10 倍。

(h) 調整 A.P.C 電路,改變 LD 的輸出功率,使自製儀器的測讀值分別於 0.01(mw)、0.1(mw)、1(mw)、10(mw)各檔位上都是為 TQ-8210 測量值的 10 倍即成,正負誤差皆保持在 1% 以下。



自製照度計的印刷電路 PC 板零件配置圖



以僑借的 ADVANTEST TQ8210 校正自製的光照度計

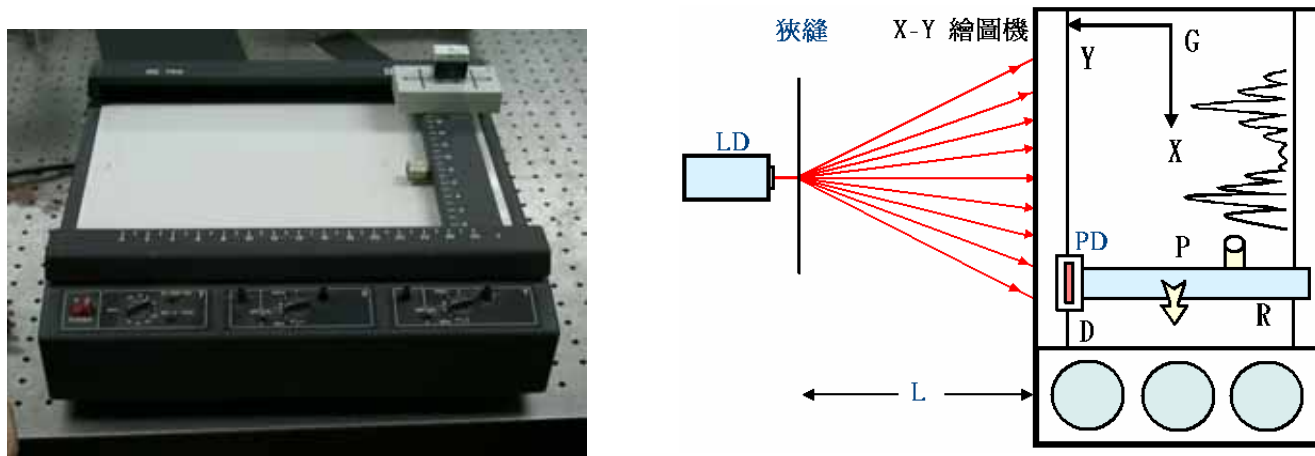


TQ-8210 配備一具平面型之光探測頭,受光面積為 $1cm^2$

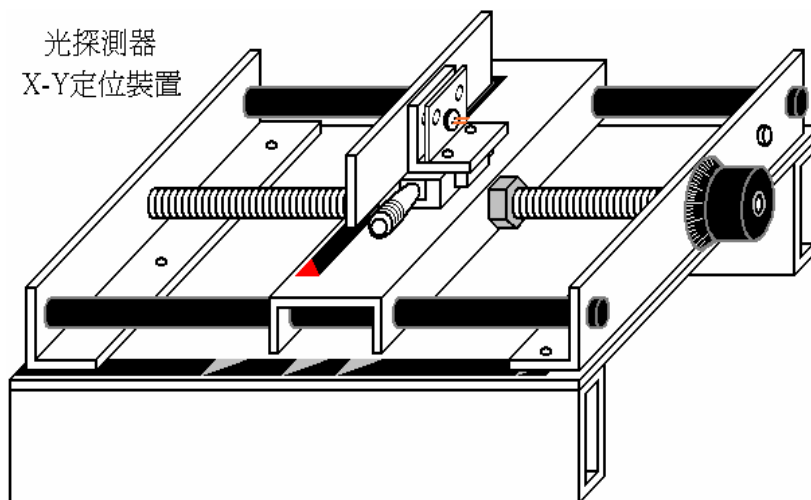
3. 機械傳動及微調定位裝置。

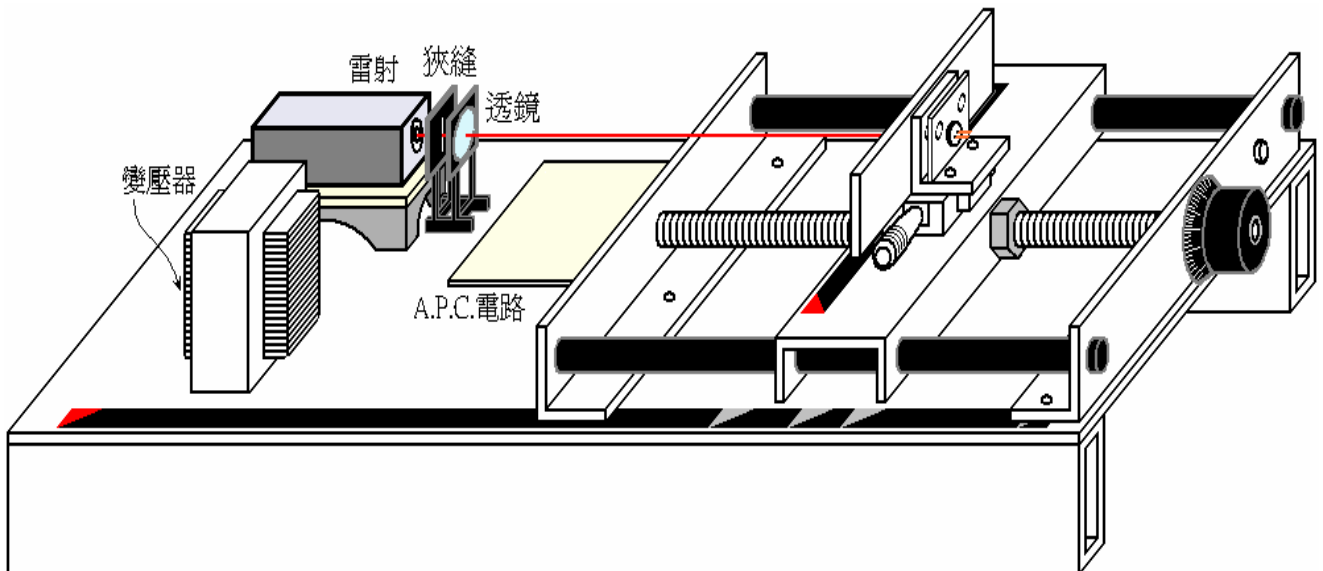
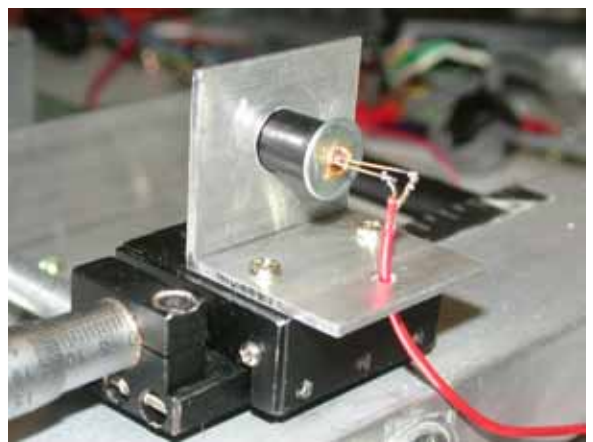
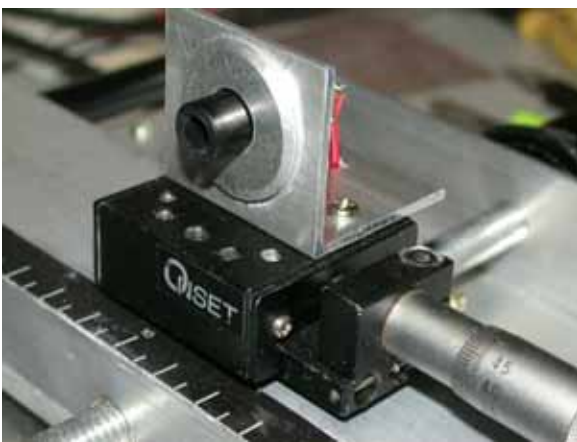
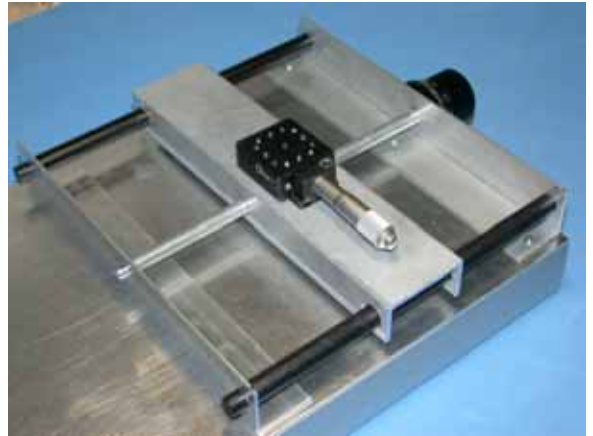
- (1) 有了功率穩定的雷射源及準確的照度計,我們可以開始做繞射實驗了,最初我們是以手持光二級體探測頭的方式沿著圓弧屏幕移動測量繞射強度分佈,由於手持不穩加上無法保證準直性,必須設法改進。
- (2) 有一次到大學實驗室參觀時,發現有一台以 X-Y 繪圖機帶動光二級體探測頭的繞射測量裝置,PD 固定在 X 軸馬達上作直線移動,所測量的繞射能量信號直接送到 Y 軸進行繪圖,當 X 軸移動行程結束,整個繞射強度分佈曲線都繪製出來,下圖及照片正是該機構

的特寫，這種機械結構真的給了我們很好的啓示和靈感。



- (3) 上圖原機定價十五萬元，我們改變了設計，以軸承配合攻牙鋁條、塑膠導軌及分釐卡頭做出一個能精細調整光二級體 X-Y 位置的機組，其中 X 軸長螺絲的牙距為 1mm，右端套上一個劃分 100 刻度的旋鈕，每轉動一刻度滑台將進退 0.01mm，而 Y 軸則以分釐卡頭做出的微調載物台，每轉動一刻度滑台將沿 Y 方向進退 0.01mm。
- (4) 我們將光二級體卡入 L 形固定座，再將此探測模組鎖在微調載物台上，實驗時，當雷射調整好高度(Z 座標)，由 X 傳動軸調整 PD 與透鏡的距離至照度計讀數最大而由 Y 軸調整讀取繞射條紋的位置，精密度可達 0.01mm，可估計至 0.001mm。

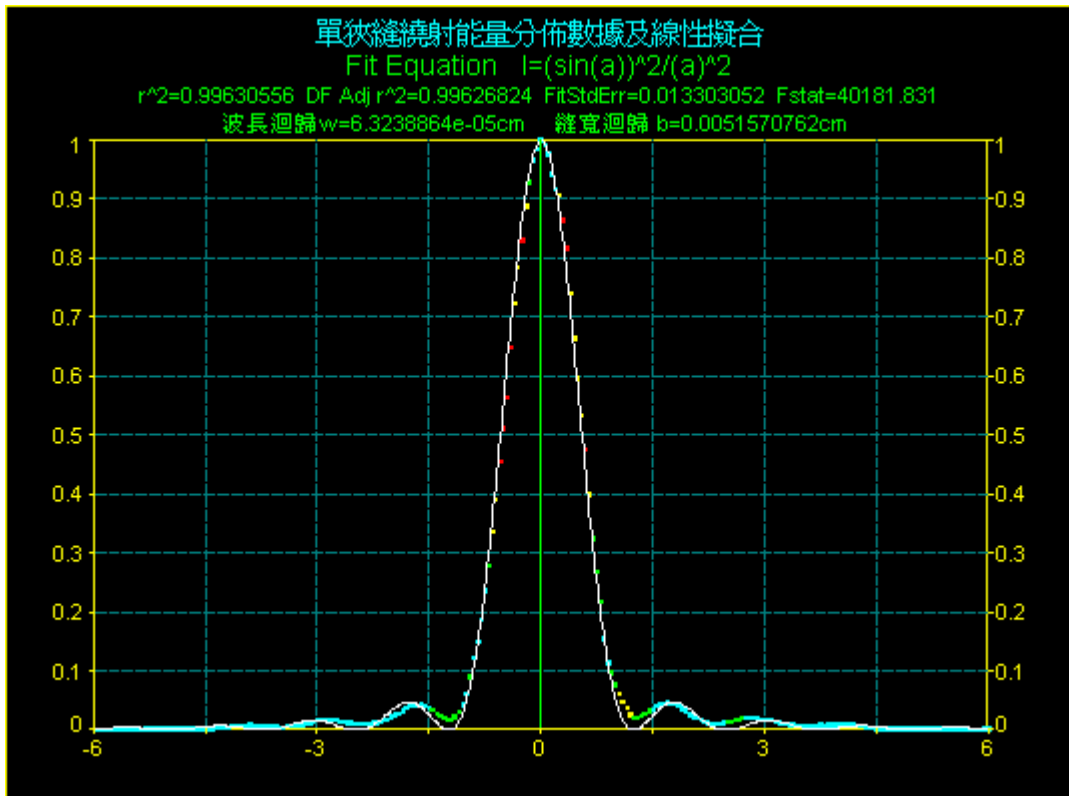




(5) 實際測量單狹縫繞射能量分佈:

- (a) 依上圖配置好相關組件，調整雷射底部螺絲以取得與 PD 有相同的 Z 座標，交互調整 X 及 Y 傳動軸直到照度計讀數最大，通常我們會調整 A.P.C 功率控制電路至 LD 有適中的亮度(視狹縫種類及縫寬決定)使中央亮紋的照度值讀數為 100，沿著 Y 方

向移動 PD 每間隔 0.01mm 即讀取照度一次並記錄之，實驗所得圖形在下頁。

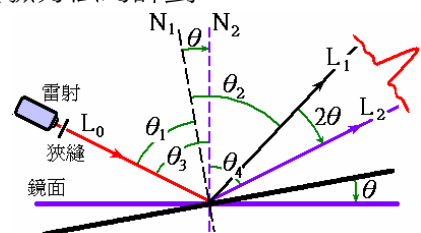


r ²	Coef Det	DF	Adj r ²	Fit Std Err	F-value
0.996305555	0.996268238	0.013303052	40181.830767		
Parm	Value	Std Error	t-value	95% Confidence Limits	
a	6.32389e-05	0.03525773	0.00179361	-0.06932244	0.06944892
b	0.00515707	2.87649278	0.00179283	-5.65565561	5.66596976

- (b) 我們使用的 LD 波長為 6350nm，單狹縫寬度為 0.05mm，將實驗數據對理論曲線作線性擬合，所得結果列於上圖，夢想中的繞射圖案真的出現了，而且實驗數據與理論曲線的擬合程度相當好，波長與狹縫的迴歸值誤差都很低。
- (c) 實驗曲線左右略微不對稱及暗紋位置上仍有少許能量分佈是仍須改進之處，可能的原因是機組的準直性(XYZ)尚未完全校準，及實驗環境雜光的干擾。
- (d) 第一次得到實驗結果時大家興奮了好久，忘卻熬夜記錄數據的辛苦，立即接著做雙狹縫的測量，與預期相同地我們又得到了相當漂亮且正確的干涉圖形。
- (e) 為了產生連續完整的實驗圖形，PD 每移動 0.01mm 即須讀取照度一次，如此每換一種狹縫所要測量的點都超過千次以上，一整個晚上不睡頂多也只能測完一組數據，耗時費力的厭倦感驅使我們興起進一步改良實驗方法的計劃。

4. 旋轉反射鏡及其轉動馬達

- (1) X-Y 繪圖機繞射測量裝置需要馬達帶動 PD 沿 y 軸作線性的移動，機械設計較複雜，我們想如果令 PD 固定不動，使繞射圖案經由旋轉的平面鏡照射到 PD 上，



PD 就可以獲得一組串列掃描的圖案信號。

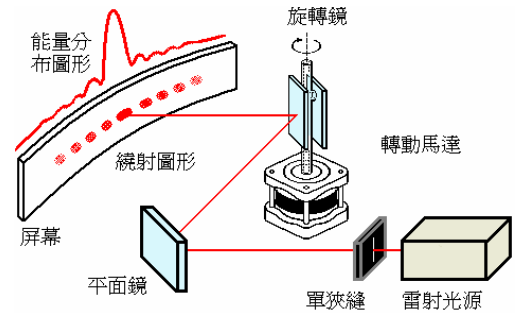
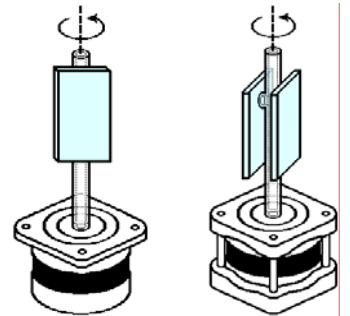
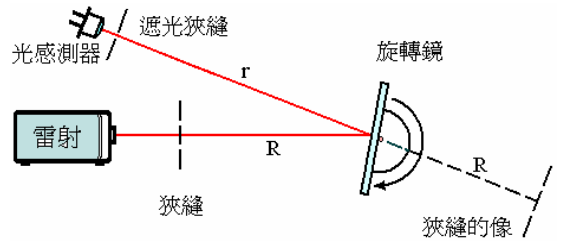
(2) 如右圖平面鏡固定於馬達軸桿隨馬達旋轉，PD 感測之圖案信號經放大後連接至示波器，調整示波器時基使畫面出現干涉圖案，記錄圖案上相鄰兩個極大之時間差 Δt ，另以脈衝式轉速計測量馬達轉動頻率 f ，以米尺測量圖中的距離 r 及 R ，干涉相鄰極大之距離即可由下式求得：

$$y = 2(2\pi r f) \Delta t \quad (24)$$

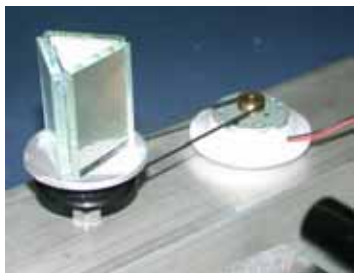
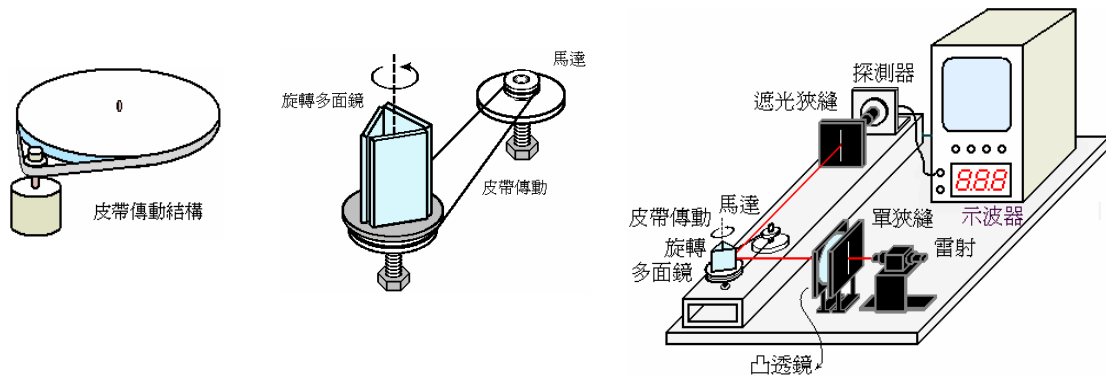
其中乘入了常數 2，是因為反射光掃描的角速度是馬達轉動的 2 倍，而入射光波長可求得為

$$\lambda = y \cdot d / (R + r) \quad (25) \quad , d \text{ 為狹縫寬度。}$$

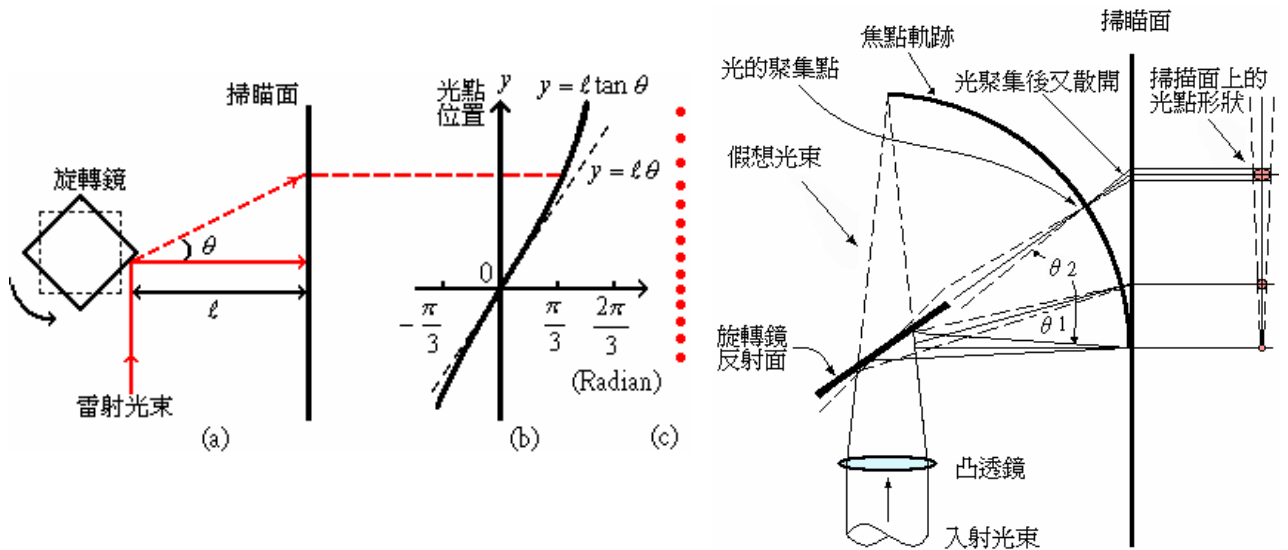
(3) 示波器於 100HZ 以下運作時銀幕較為模糊不穩，我們曾將反射鏡面增為兩個，企圖提高掃描頻率，最後甚至增加到 3 個對稱鏡面，而畫面仍然閃爍不穩。



(4) 多次實驗後我們發現波形不穩的主要原因是來自馬達轉動時的抖動，這個問題很棘手。除了需加強馬達電源的穩定度外，我們參考了舊式唱盤的皮帶驅動方式，改用膠帶及軸承來帶動三面鏡的旋轉，確實能有效隔離馬達抖動，波形穩定度改善了許多。



- (3) $f\theta$ 這種特殊透鏡雖被大量用在雷射印表機及影印機中，但一般書上很難找到其相關資料，我們不斷上網及持續到圖書管查詢資料才逐漸認識它的特性及優點。
- (4) 下圖(a)的掃描面可比擬感光鼓位置，其與掃描鏡面相距 ℓ ，在掃描面中央處因 θ 甚小，圖案光點離中央點距離近似 $y = \ell\theta$ ，但在感光鼓兩端距離較遠處卻有 $y = \ell \cdot \tan\theta$ ，由(b)圖中可看出其成像光點呈現非線性分佈。
- (5) 雖然雷射印表機系統中都加入了透鏡以減小感光鼓至掃描鏡距離，但由下圖(c)可看出在大角度掃描時透鏡成像的焦點軌跡偏離感光鼓兩端嚴重，這使得感光鼓上的像點擴大而呈現圖案失真現象，所以不能用一般透鏡，須使用特殊的 $f\theta$ 透鏡組。



$f\theta$ 透鏡焦距測量及線性掃描範圍的實驗過程

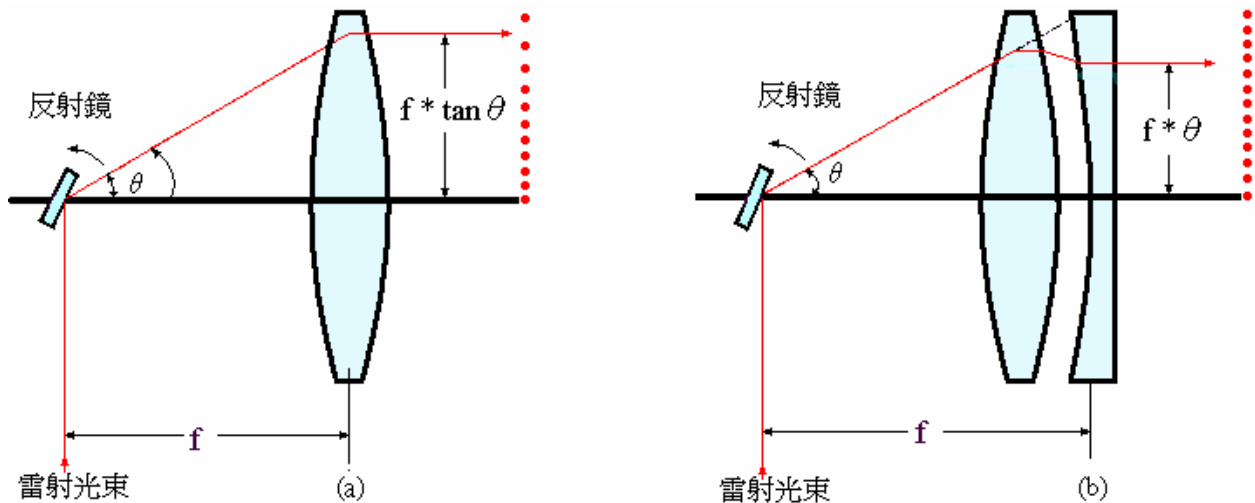


每一款雷射印表機內都有不同型式的 $f\theta$ 透鏡組合



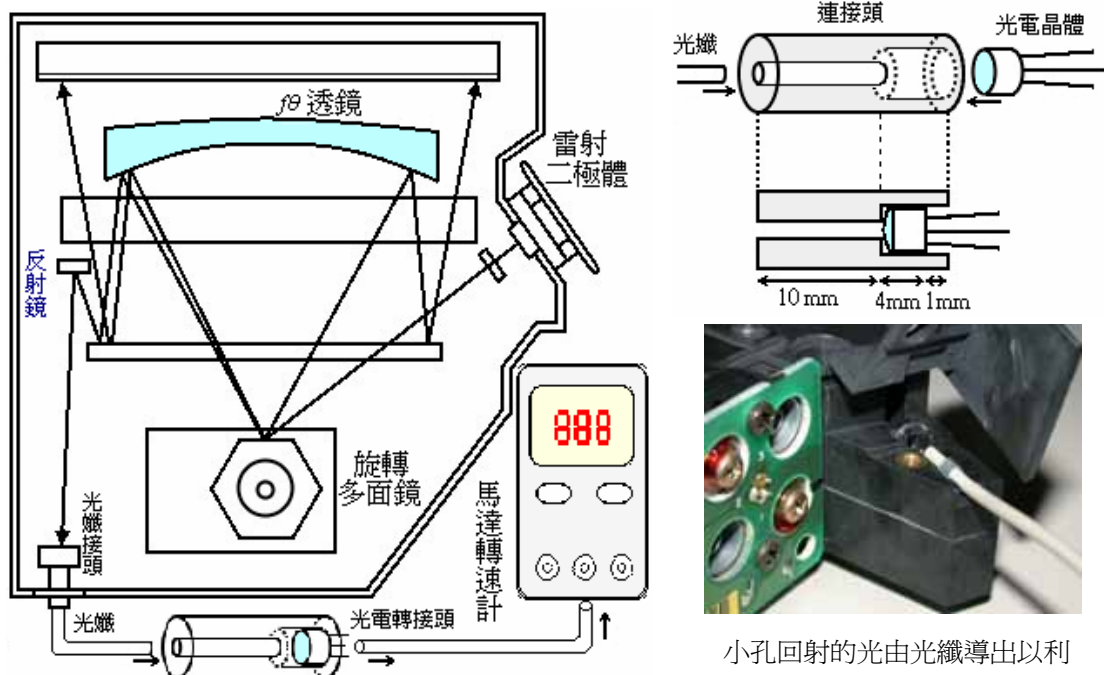
(6) 由下面(a)圖可知將反射掃描鏡置於透鏡焦點時折射光平行於主軸，使用一般透鏡成像時 $y=f*\tan \theta$ ， y 與 θ 呈非線性關係；比較(b)圖，以兩個以上透鏡組合而成的 $f\theta$ 透鏡則有 $y=f*\theta$ 的線性關係，所有射至感光鼓的平行光點都可以是等距離的，如此投射至感光鼓(銀幕)的圖案將不至於失真。

(7) 我們將印表機的雷射模組打開，拆卸其中 $f\theta$ 透鏡來做實驗，測量其焦距並且測量其線性掃描的範圍，做為安排自製繞射干涉實驗機組中的銀幕、感光探頭、旋轉反射鏡以及 $f\theta$ 透鏡間相對距離的預估。



(8) 驅動旋轉多面鏡的馬達不僅抖動要低，轉速更需穩定，同時轉速必須能隨時監測，如此便能以(24)、(25)兩式計算繞射或干涉暗紋間隔及入射光波長。

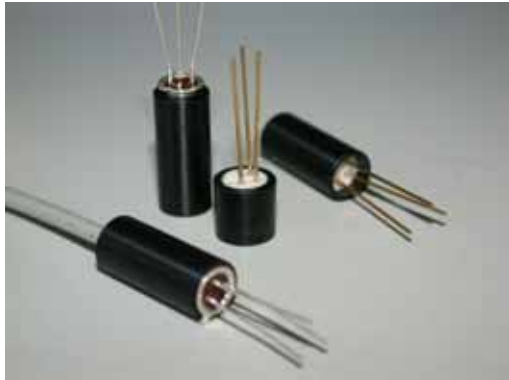
(9) 在各廠牌印表機雷射模組盒內通常都有預置一小形反射鏡及一導光小孔，旋轉鏡除了向前射出由 $f\theta$ 透鏡對感光鼓掃描的光線以外還會有向後反射的光線由小孔穿出，通常是當成控制信號，我們利用此小孔回射的光由光纖導出，接到自行設計的光電晶體轉接頭，將光的信號轉成電的脈衝，再以電纜接至馬達轉速計以測量掃描頻率。



小孔回射的光由光纖導出以利



左上圖為鑽孔後的光電轉接頭



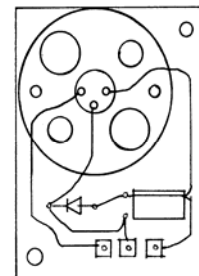
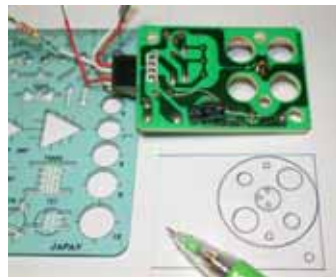
左下圖為光纖與光電晶體完成接合情形



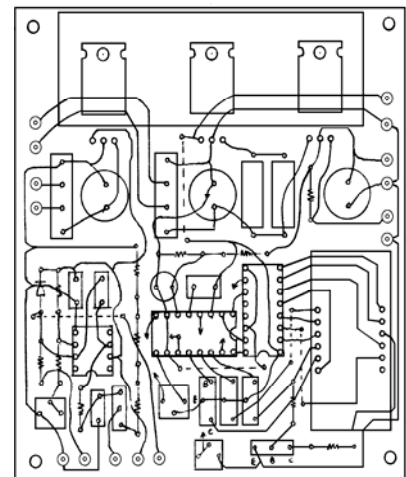
右圖上方為HP印表機中裝置LD電路的基板

6.雷射模組及機械微調定位裝置

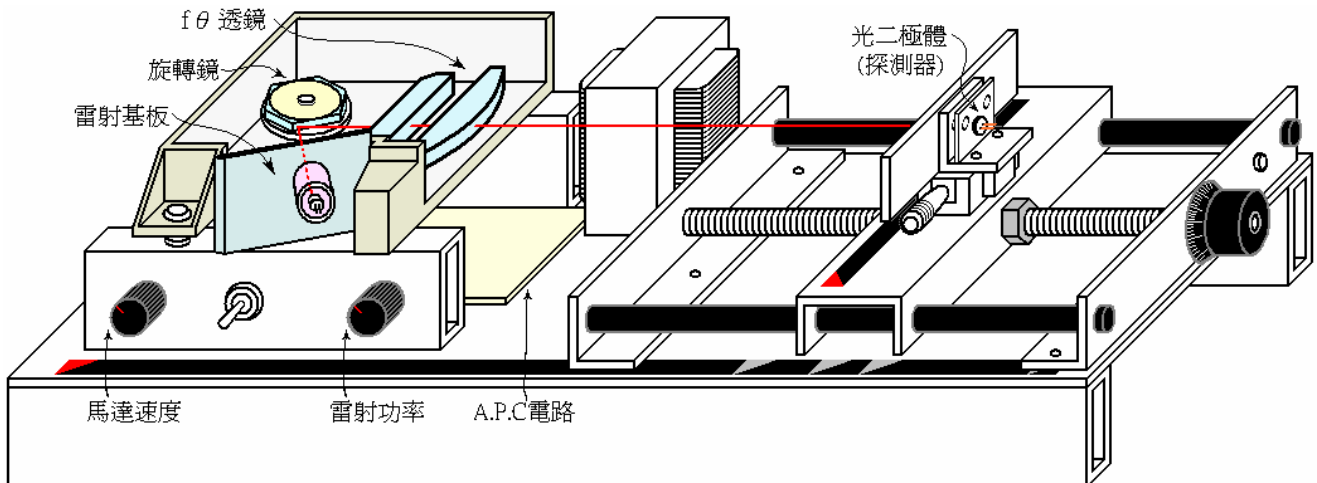
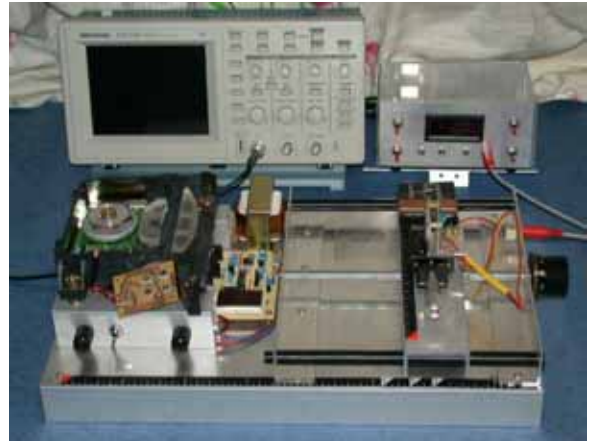
- (1) HP 印表機將 LD 基板(右上照片)、 $f\theta$ 透鏡、六面鏡全都置於雷射模組內，我們使用此模組與 22 頁自製的 PD 微調定位滑台裝置結合，可以使系統的準直性大為提高。
- (2) 印表機基板上 LD 所發出的光波長都是紅外的，經實測沒有可見光的，我們將其拆除，重新設計一片電路板，將前述購得的 LD 二極體及相關零件焊妥在電路板上，再將此電路板鎖回雷射模組，並以導線外接至 A.P.C 電路即可方便地調整 LD 的功率。



重新設計的 LD 基板(上)及光功率控制電



(3) 雷射模組內、LD 發射口處有一面積約 $2 \times 3\text{cm}$ 厚 2.5mm 的矩形凹槽，原為開關定位用，我們將其拆除，並且改為繞射狹縫的安置處，只要將狹縫適度修剪即能置入。



伍、實驗過程與結果

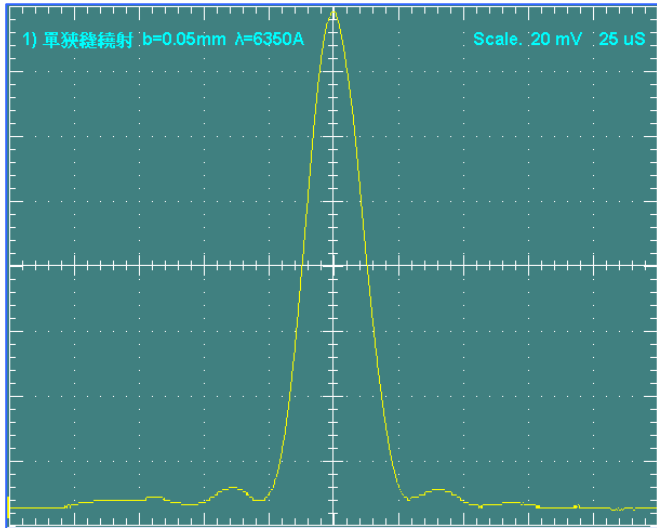
一. 器材配置及實驗步驟

- (一). 將自製掃瞄儀、數位示波器與自製光照度計接續妥當(見右上照片)。
- (二). 將待測狹縫置入前述的狹縫槽內，開啓系統電源。
- (三). 調整雷射模組底部螺絲以校正 Z 軸高度，使 LD 光線水平射入感測之 PD，至於 X、Y 軸校正的手續與第 18 頁說過的完全相同。
- (四). 調整馬達轉速及示波器之時基使畫面穩定，調整(A.P.C)電路使繞射圖案大小適中。
- (五). 按下示波器 capture 鍵，補捉畫面並可存成圖形檔案然後列印出來。
- (六). 列印之圖形可以立即作分析、比對，也可以代入分析軟體擬合，十分便捷。

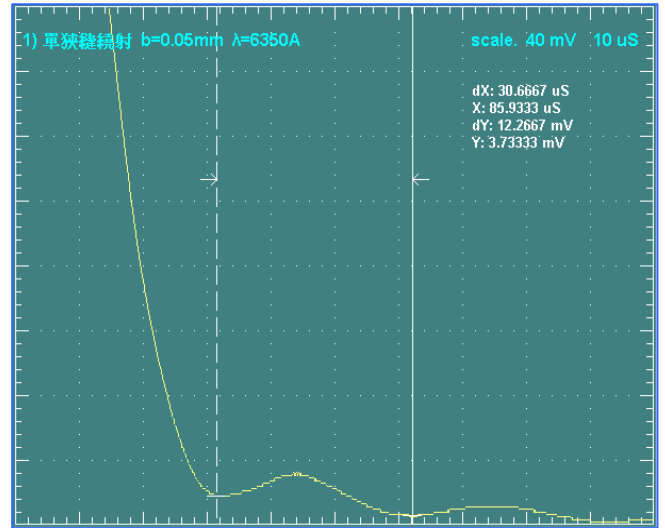
二. 實驗結果

- (一). 下頁列出了一部分測量所得之圖案，漂亮的繞射和干涉強度分佈曲線完整呈現。
- (二). 只要系統配置完成及校正妥當，每換一種狹縫，需要的測量時間都不超過 30 秒，繞射圖案可立即描繪，實驗時間大為減省，比起逐點測量和記錄繞射光強度相差何止千倍。
- (三). 依理論計算，繞射第一極大能量分佈應該是中央主極大的 4.7%，我們可利用數位示波器對圖形做局部放大、標示及驗算，同時還可求取誤差值。

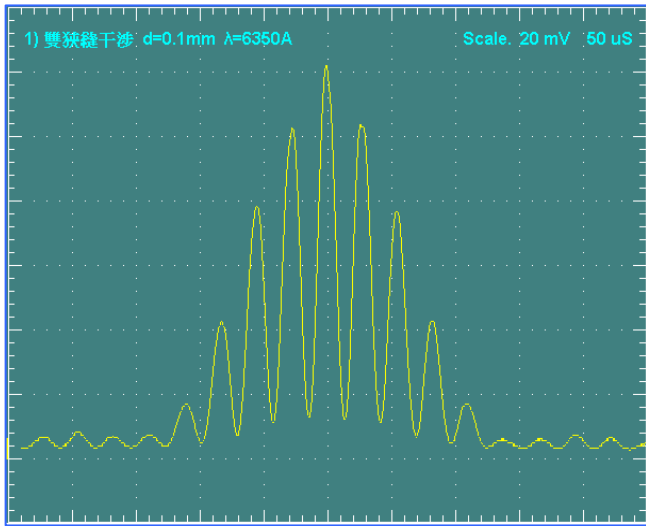
(四).下頁中雙狹縫及60線光柵的掃描圖案，和其下方理論圖形比較可看出失真度相當低。



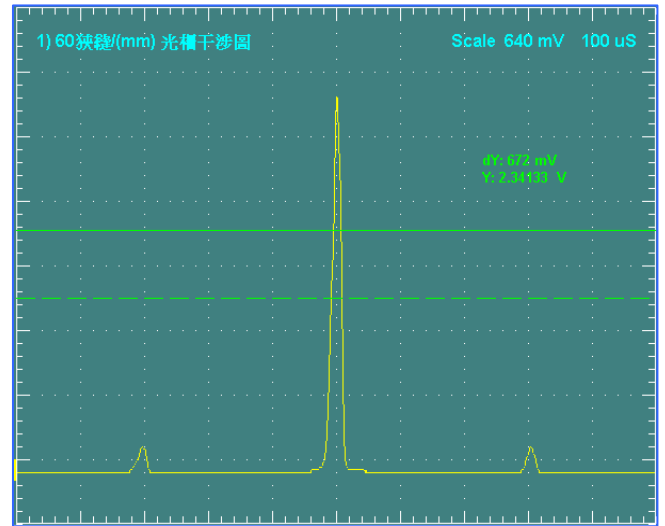
圖A: 單狹縫繞射的掃描圖案



圖B: 計算繞射局部區域資料

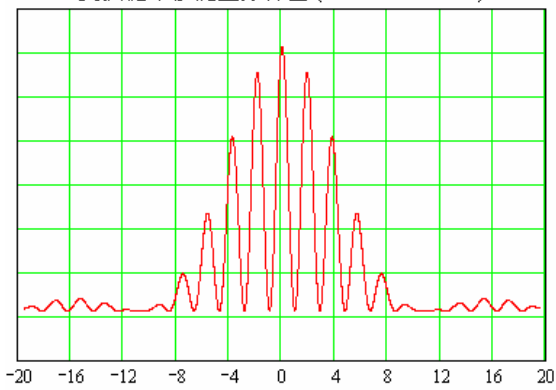


圖c: 雙狹縫干涉的掃描圖案

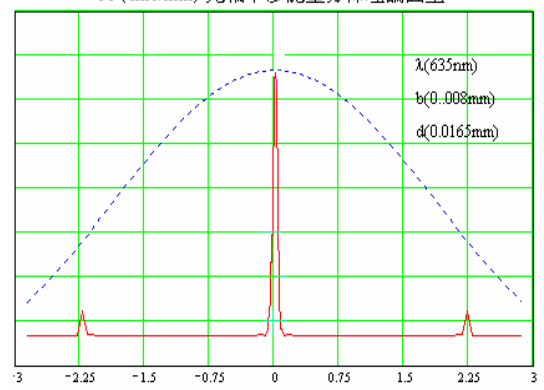


圖D: 60 line/mm 光柵掃描干涉圖

雙狹縫干涉能量分佈圖 ($b=0.018\text{mm}$ $d=0.1\text{mm}$)

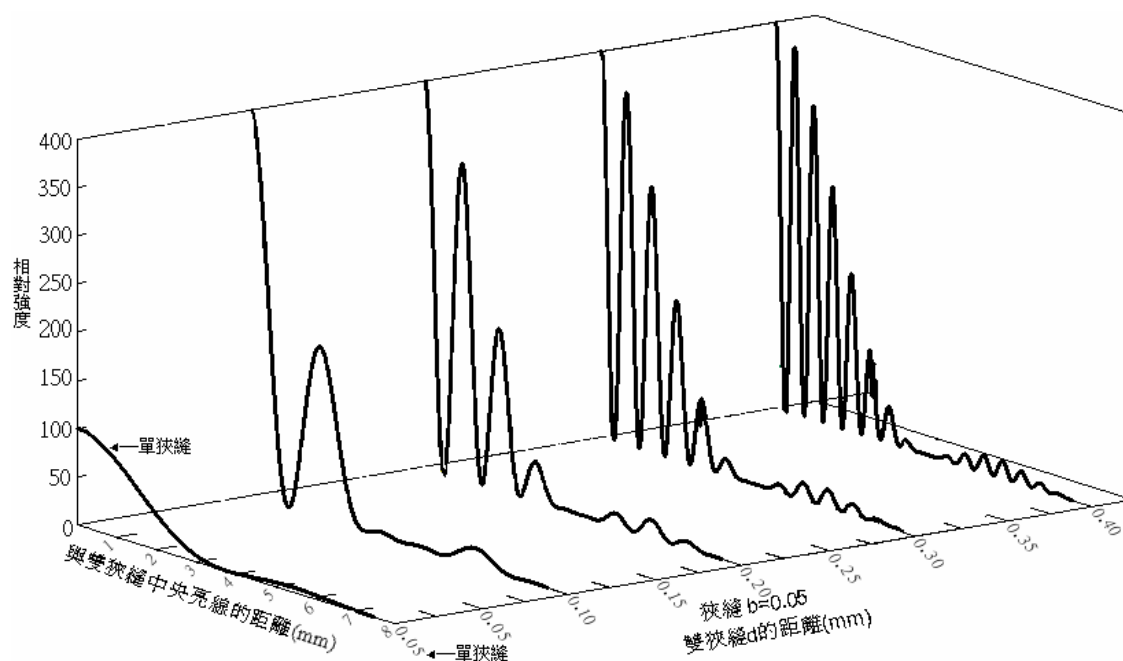


60 (line/mm) 光柵干涉能量分佈理論圖型



陸、討論

- 一.我們以旋轉多面鏡配合 LD 雷射模組對狹縫繞射(干涉)做線性掃描，能夠快速地、精確地得到繞射(干涉)圖案，極大與極小的位置及其相對能量分佈一次完整呈現，十分便捷。
- 二.我們向代理商購買的相位光柵都在 500line/mm 以上，買不到 100line/mm 以下的，文化大學物研所答應幫忙，他們以全像法製作了 60 至 90line/mm 的相位光柵送給我們，上頁圖 D 即為其中 60line/mm 的測量圖形，下方則為其理論圖型及同寬度單狹縫繞射圖形之比較。
- 三.我們有一組日本 Uchida 製造的雙狹縫，縫寬固定，縫距則由 0.05、0.1、0.2、0.3 至 0.4mm 呈規則增加，我們分別對這些雙狹縫實驗，將掃描完成的圖案依序排列在一起，再與縫寬為 0.05mm 單狹縫繞射的掃描圖案詳細比對後，似乎發現了一些有趣的規則(見下圖)：



- 四.上圖中除最左邊一條曲線為單狹縫繞射圖案外其於皆為雙狹縫干涉者，圖中顯示由繞射第一暗紋位置直線向後延伸恰好都是各干涉圖形強度極小之處，但是縫寬 $b=0.05\text{mm}$ 的單狹縫本身是否可看成是由兩個縫寬更小各為 0.025mm 的單狹縫彼此無限靠近至相連成單一狹縫呢?如此單狹縫繞射圖案是否可視為雙狹縫干涉的極限情況呢?
- 五.因為 Uchida 製造的狹縫規格有限，實驗所得掃描圖案數目無法更清楚看出由繞射至干涉的細微變化和因果關係，因此我們利用電腦程式將雙狹縫的距離數值由雙縫相連至逐漸分離以連續變化的方式呈現，所描繪的立體圖形能幫助我們進一步瞭解繞射和干涉的關係。
- 六.雙狹縫干涉的能量分佈是由狹縫寬度 b 、兩狹縫間距離 d 及入射光波長 λ 決定的，以下圖形中 σ 皆代表寬度為 b 之單狹縫的繞射第一極小與中央極大的距離，若狹縫寬 b 與波長 λ 固定，我們以程式分析雙狹縫間距離由 $d=b$ 至 $d=4b$ 之間干涉圖案逐漸變化的過程。

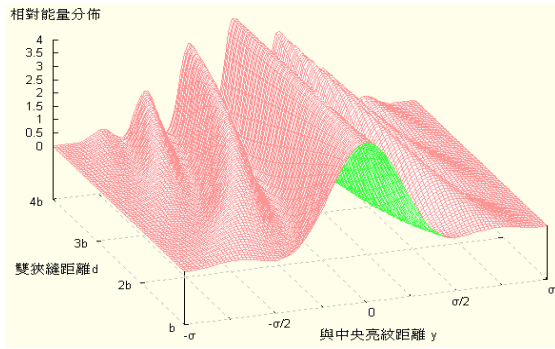


圖 a

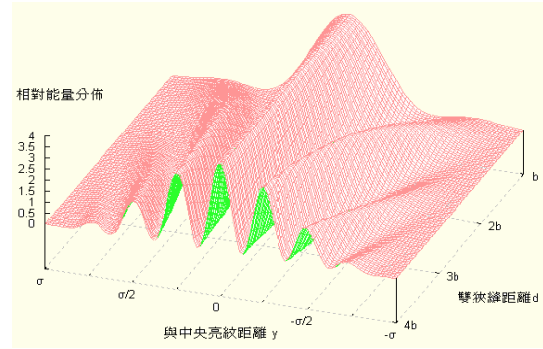
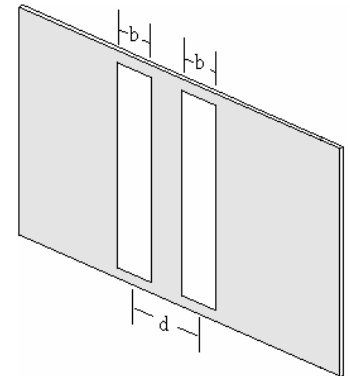


圖 b

(一).爲了與實驗比較與對照，上頁兩圖中 λ 與 b 的數值和實驗所使用的真實狹縫寬及 LD 波長完全一致，即 $b=0.05\text{mm}$ ， $\lambda=635\text{nm}$ ， $b \doteq 80\lambda$ 。

(二).圖a中只有最外側在 $d=b$ 處的第一條曲線爲單狹縫繞射曲線， $d=b$ 的意義可從右圖中看出即兩個狹縫彼此無限靠近，直至密接成寬度爲 $2b$ 的單狹縫，所以 $d=b$ 處爲繞射圖案。

(三).由 $d>b$ 開始， d 在連續增加的過程中所有的橫剖面皆呈現雙狹縫干涉圖形，而圖b爲由 $d=4b$ 處反方向觀察，更能看出狹縫分離過程中如何由繞射圖案轉變成干涉圖案。



(四).寬度爲 b 的單狹縫中央極大強度應是雙狹縫的 $1/4$ ，圖c與圖d中我們繪出寬度爲 b 的單狹縫所生繞射強度分佈(藍色的包絡面)，左右第一極小離中央極大皆爲 σ ，但是雙狹縫干涉的所有中央極大(甚至包含雙狹縫無限接近而形成單狹縫時)都有相同的強度，所有雙狹縫干涉強度的真正包絡面強度應升高 4 倍如同圖g的淡藍色外表面所示。

(五).詳細比較圖 a 至圖 g，於 $d=b$ 處的橫剖面曲線，它既可看成是縫寬加倍的單狹縫繞射曲線，又可看成是相距 $d=b$ 之兩點波源受到單狹縫繞射調制形成的雙狹縫干涉曲線，這兩種情況的第一極小都恰與中央相距 $\sigma/2$ ，不論如何，圖上所有曲線都受到寬度爲 b 的單狹縫繞射的包絡面所約束，在離中央極大爲 σ 處所有曲線的強度都降爲零。

(六).在圖h至圖j中，雙狹縫範圍加大了，由 $d=b$ 至 $d=11b$ ，雙狹縫干涉極大與極小條紋數目都隨 d 值增加而增多，於 $d=11b$ 處中央極大左右的幾個極大的強度相差不多，已接近純粹的干涉了，但整體能量分佈仍然受到寬度爲 b 的單狹縫繞射的包絡面所約束。

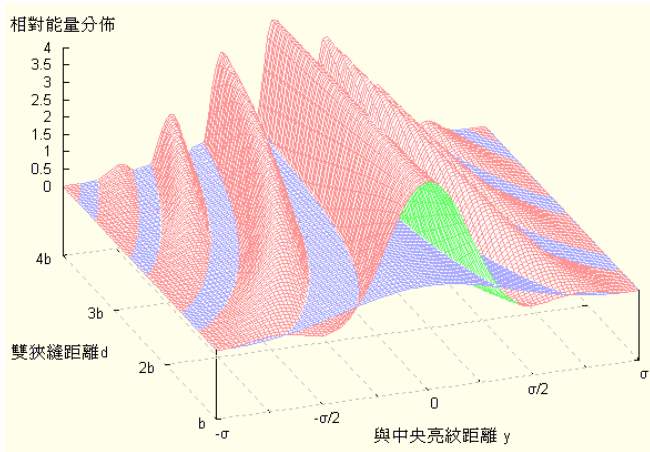


圖 c

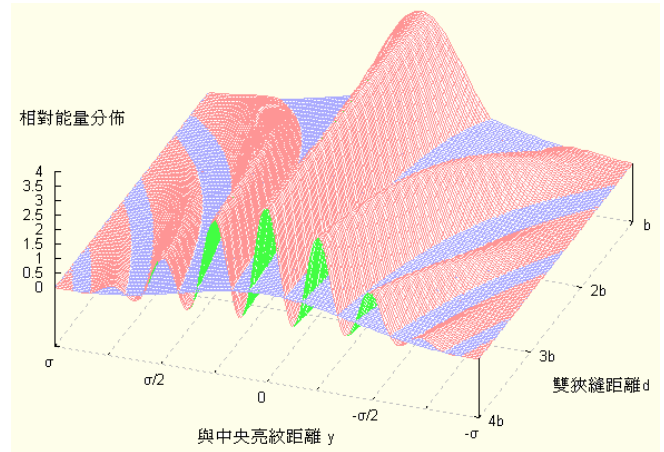


圖 d

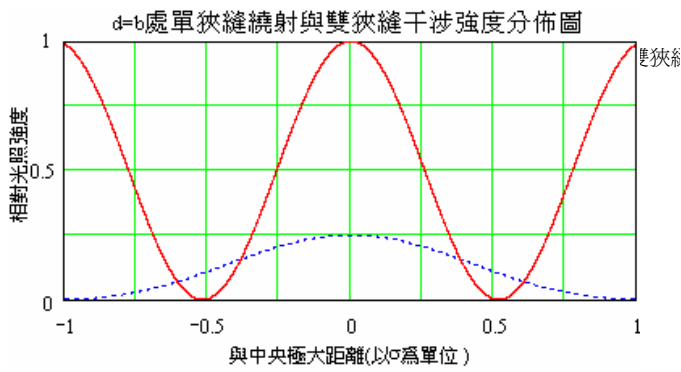


圖 e 於 $d=b$ 處分別只考慮單縫繞射(藍)及雙狹縫干涉(紅)曲線

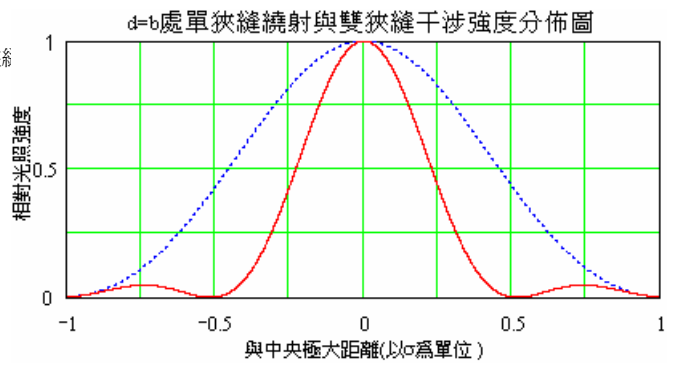


圖 f 紅色曲線既是縫寬 $2b$ 的繞射曲線又是相距 $d=b$ 的干涉曲線

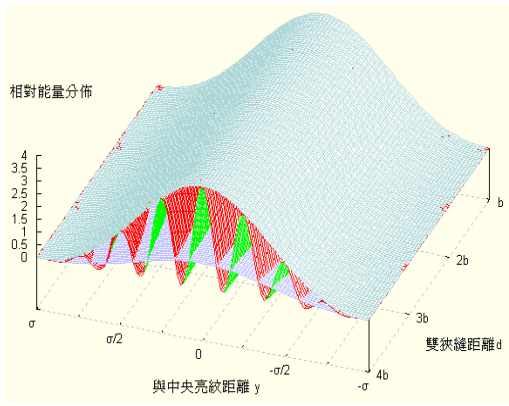


圖 g

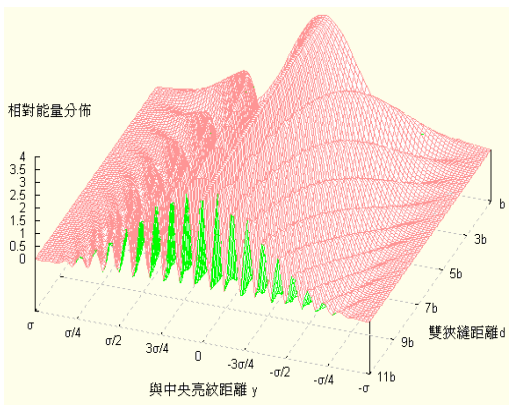
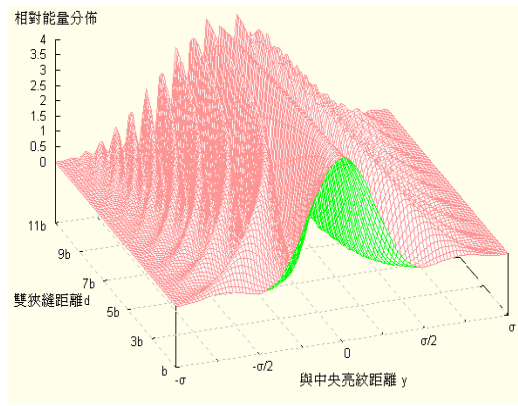


圖 i

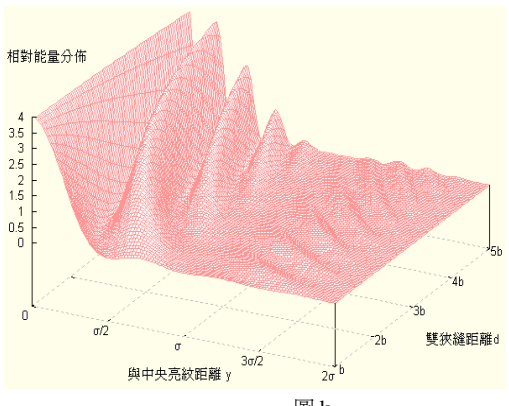
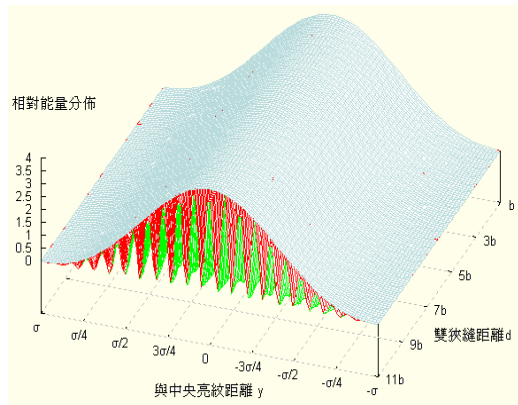
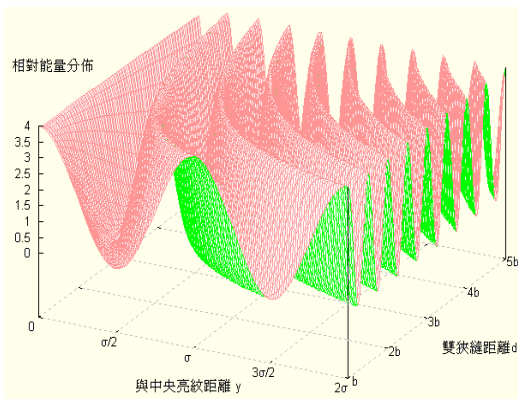


圖 k



- (七).圖 k 只繪出右半邊圖案，但將範圍延伸至 2σ ， $d=b$ 時等效寬度 $2b$ 的單狹縫產生的第 1、2、3..極大分別位於離中央 $3\sigma/4$ 、 $5\sigma/4$ 、 $7\sigma/4$...極小則位於 $\sigma/2$ 、 σ 、 $3\sigma/2$ 、 2σ ...
- (八).在圖 k 中若去除了繞射因素，則圖案全變成了圖 l 的雙狹縫干涉圖案，這顯示兩個不計寬度($b \rightarrow 0$)之狹縫由相距 d 至 $5d$ 的干涉強度分佈，任一 d 值之橫截面上都是明暗相間呈等距離分佈的雙狹縫干涉曲線，不論與中央極大相距多遠所有極大點的強度都相同；特別注意於 $d=b$ 處的情形，與中央相距 σ 及 2σ 都是干涉極大處，但在圖 k 中與中央相距 σ 及 2σ 的強度都是零，雙狹縫干涉極大恰被寬度為 b 的單狹縫繞射曲線壓抑至零，雙狹縫干涉強度被寬度為 b 的單狹縫繞射強度調變的情況相當清楚。
- (九).圖 m 中我們將單狹縫寬度 b 縮小了 100 倍，小於實驗的光波波長，如此於 $d=b$ 時不再產生繞射極小，繞射強度自中央向兩旁無限延伸，這情形在第 5 頁的中央左圖已說明過，但是若雙狹縫距離 d 遠比縫寬 b 大，那麼干涉條紋將趨於均勻，逐漸接近明暗相間等距離、等強度的標準干涉，圖 n 中於 $d=19b$ 時的曲線可說明此點。
- (十).圖 o 及圖 p 是寬度皆為 b ，彼此相距都是 d 的三狹縫干涉的強度分佈圖，每一干涉極大與中央極大的距離和雙狹縫干涉時完全相同，但是強度分佈的寬度縮小了，且有微小隆起的次極大介於相鄰兩主極大之間，在 $d=b$ 的情況下三個狹縫無限接近，曲線呈現寬度為 $3b$ 的單狹縫繞射圖形，第 1、2、3..繞射極小分別出現在離中央 $\sigma/3$ 、 $2\sigma/3$ 、 σ ..，當然這完全等同於彼此距離為 b 的三個點波源互相干涉，且受到寬度為 b 的單狹縫繞射所調變的曲線，繞射第 1、2..極小離中央距離為 σ 、 2σ ..，不論 d 值如何改變，所有干涉曲線都受此繞射約束，只是調變包絡面的強度已升高至 $3^2=9$ 倍了。

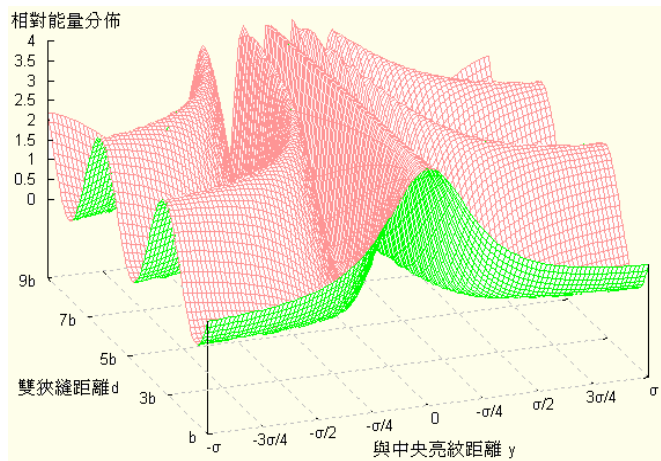


圖 m

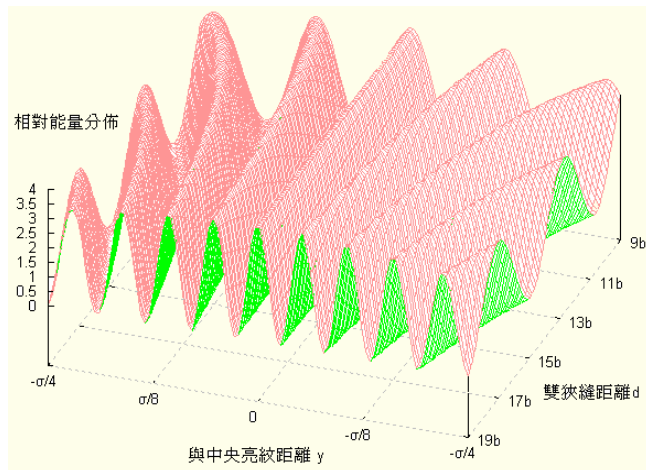


圖 n

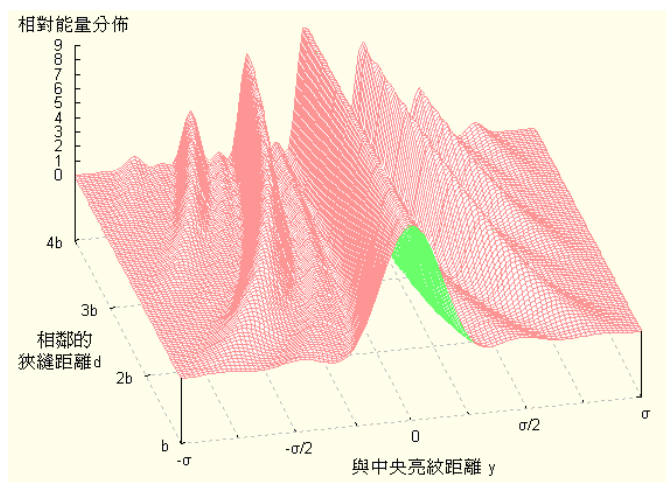


圖 o

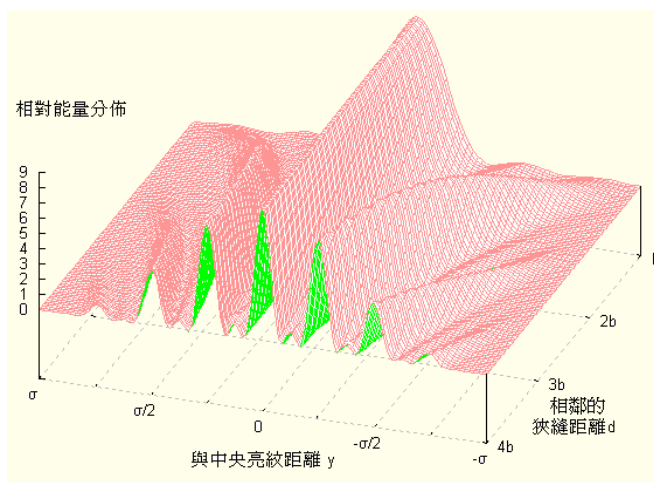


圖 p

柒、結論

一.實驗方面，我們在自行製作的實驗機台上成功地發展出兩種方法測量光的繞射、干涉圖案上之能量分佈，完成兼具精確、實用、價廉、廢物再利用等特色的測量儀器：

(一).逐點測量單狹縫繞射及雙狹縫干涉曲線上的能量分佈：

- 1.自製精細調整X-Y-Z位置的機台，大大提高了干涉曲線的解析度，可估計至 10^{-3}mm 。
- 2.設計 A.P.C 電路，可自由調整 LD 功率並有效降低其功率漂移，使得實驗光源穩定。
- 3.採用高直線性、高指向性、高反應速度的光二極體(PD)為感測器，偵測光的強度。
- 4.以低雜音放大器自製照度計，接收、放大 PD 訊號，並以數字顯示繞射或干涉強度值。

(二).以廢棄印表機改裝繞射、干涉圖案描繪儀，配合示波器直接掃描繞射圖案：

- 1.利用旋轉多面鏡系統將繞射或干涉強度對 PD 投射，連續而自動地掃描繞射、干涉圖案，使實驗時間大為縮減、操作手續大為簡化。
- 2.使用印表機雷射模組內的無刷式馬達帶動多面鏡，有效降低抖動，使得圖案清晰穩定。
- 3.以光纖傳送多面鏡反射光至自製的光電轉換接頭及馬達轉速計以監督掃描頻率，繞射、干涉圖案中條紋間的距離即可由(24)式精確求出，傳統測量中無法做到此點。
- 4.利用 $f\theta$ 特殊透鏡的低像差、高線性、短焦距的優異特性，大幅降低掃描圖案的成像失真，並且縮小掃描儀器的整體體積。

二.理論方面，由於實驗設計及實驗技術的改進，我們能在較短時間內累積大量實驗數據及實驗曲線，詳細檢驗和比對實驗結果使我們有機會重新思索繞射及干涉間的微妙關係及研究其強度分佈曲線逐漸變化的過程與圖案較佳的呈現方式。

(一).以極座標方式呈現單狹縫繞射及雙狹縫干涉曲線上的能量分佈：

1.初學干涉時課本上都印有強度-與中央極大距離圖，即 I vs y ，強度極大座標位置常以

$$y_{(n)} = L \cdot \frac{n \cdot \lambda}{d} \quad n = 0, 1, 2 \dots \text{表示(此式我們已修正成第 10 式), 課本上總是強調是在 } L \gg d \text{ 及}$$

$\theta \ll 1$ 情況下上式才有效，常使初學者誤以為干涉只發生在中央極大左右小範圍內。

2.我們嘗試以極座標 I vs θ 代替 I vs y 來描述干涉強度，無形中擴大了干涉的視野，因 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ 涵蓋狹縫出口整個空間，雙狹縫干涉會在空間內任何方位發生，若以狹縫處為圓心製作一個圓弧形屏幕，並在其上刻印角度標記，實驗時可立即讀出干涉條紋的方位角 θ 及強度 I ，非常方便，同樣的原則也適用於繞射或光柵強度分佈。

(二).以 3D 立體座標呈現干涉強度對應縫寬 b 和縫距 d 之間的關係：

1.依據(19)式 N 狹縫干涉的光強度分佈公式為 $I_{\theta} = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2$ ，其中 $\alpha = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta$

而 $\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$ ，上式中 $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$ 是單縫繞射因子，而 $\left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2$ 是多縫干涉因子，兩者共同

影響強度分佈，而這兩個因子中的主角 α 、 β 是分別由 b 和 d 決定的。

2.初學干涉時課本上只給了 d 值完全沒有提到 b 的作用，把每一狹縫寬度看成無限小，即 $b \ll \lambda$ ，如此 $\alpha \rightarrow 0$ 而縫繞射因子 $\rightarrow 1$ ，我們當然就沒有查覺繞射的影響，以為干涉圖案一定就是等強度，等距離、明暗相間的條紋。

3.實驗時所用的真實狹縫寬度 b 常是波長的數倍至數十倍，繞射因子不為 1，所以繞射因子將發揮調制干涉強度的作用，干涉只能在每兩個繞射極小區間內發生。

- 4.初學繞射時課本上將單狹縫分成數個區塊來討論各區塊間干涉與能量消長情形，這不容易理解，且常會混淆繞射與干涉間的關係，在 27 頁圖 a 中我們由 3D 立體座標可清楚看見當 d 值由 $4b$ 降至 b 時干涉圖案如何突然地轉變成繞射圖案，及兩個區塊(雙狹縫)無限靠近至合併成一個區塊(單狹縫)時干涉與繞射間的緊密關係。
- 5.區塊可以合併當然也就可以分割，一個寬度為 b 的單狹縫,我們可以將其等分為 N 個寬度為 b/N 的小狹縫彼此無限靠近相連著，每個小狹縫的中央與相鄰的相距 $d=b/N$ ，所以原狹縫的繞射曲線它既可看成是縫寬 b/N 的這些小狹縫連結成寬度為 b 的單狹縫繞射曲線，又可看成是相距 $d=b/N$ 之 N 個點波源互相干涉的結果，當然干涉曲線仍然被寬度為 b/N 的小狹縫之繞射曲線所調制，只是強度放大至該曲線的 N^2 倍，繞射與干涉的相互為用及微妙關係十分有趣且耐人尋味。
- 6.若分割的數目相當大，即 $N \rightarrow \infty$ ，每個小狹縫寬度 $b/N \rightarrow 0$ ，此時每個小狹縫不計寬度均視其為點波源，符合惠更斯原理(Huygen's principle)子波源的條件，它們各自產生的波面相互干涉疊加，可得到相同的單狹縫繞射強度分佈。

捌、參考資料及其他

中文資料

- 1.谷腰欣司 圖解雷射應用與原理 初版 世茂出版社 p.111.
- 2.卓聖鵬 量測用電路設計 初版 全華科技圖書 台北市 p.1-1.
- 3.許書務 光電元件應用技術 全華科技圖書 台北市 p.31.
- 4.黃崢瑜等 物理 第六版(下) 全華科技圖書 台北市 p.36-1.

西文資料

5. B. Rossi, Optics (Addison-Wesley, Reading, Reading, Mass., 1959), p.196.
6. Bruce Mechtly, "Graphical representations of Fraunhofer interference and diffraction" Am. J. Phys. 62(6), June 1994 p.501.
7. Eugene. Hecht and Alfred Zajac, Optics, (Addison-Wesley world student series edition), p.275-347.
8. J. D. Barnett and F. S. Harris, J. Opt. Soc. Amer. 52, 1962, p.637.
9. Salvatore Ganci, "Simple apparatus to display diffraction patterns on an oscilloscope", Am.J.Phys. 67(4), April 1999 p.357.

網路資料

- 10.http://www.earlytelevision.org/yanczer_mirror_drum.html
- 11.http://www.optocore.jp/products/f_lens.html
- 12.http://www.sigma-cybertech.sytes.net/sct_opt/hikiiai/OPTOutline/LENSES3/1.htm
- 13.<http://www.sei.co.jp/seiworld/2001/11/6a.html>
- 14.http://web.canon.jp/technology/detail/lbp/laser_unit/