

光電實驗(一)

實驗報告

姓	名：
學	號：
組	別：
教	授：
日	期：

一、實驗名稱：雷射光的方向性

二、實驗目的與原理：

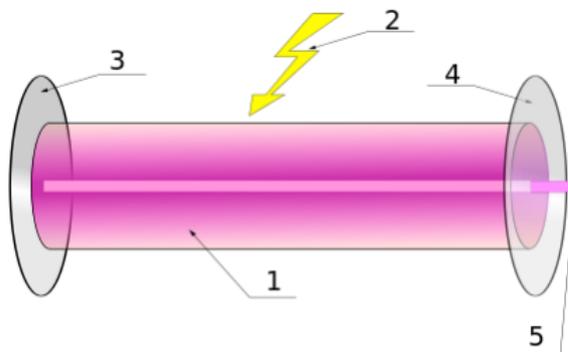
(1) 實驗目的：

使用氦氖雷射(He-Ne Laser)為光源，且利用反射鏡調整光路，並通過由數個光圈組成的特定路徑，熟悉儀器的組裝和操作，練習調整光路的能力。

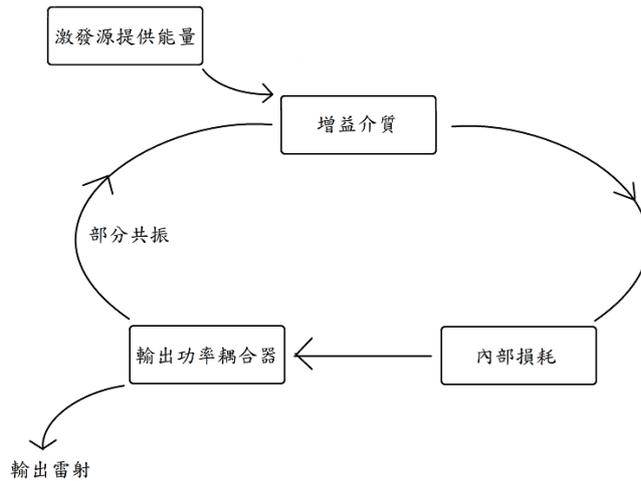
(2) 實驗原理：

1. 雷射原理

雷射(LASER)的三個基本要素主要為激發源(pumping source)、光學共振腔(optical resonator)、增益介質(gain medium)，如下圖一，1表增益介質，2表激發源提供能量，3表共振腔後方的全反射鏡，4表輸出功率耦合器，能以部分反射鏡提供相關功能，5表輸出的雷射。而雷射主要原理是透過激發源將增益介質內部的多數原子提至激發態，達成居量反轉，此時若有光子與該原子作用，則原子會被激發出一個與入射光子具有相同相位、方向、頻率的激發光子，而此過程稱為受激發光。而光子會在共振腔中多次行經增益介質，達成放大的效果，最後形成單色、高強度、同調、具準直性的雷射光。



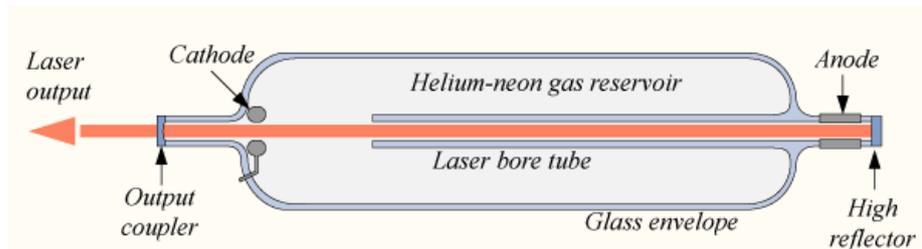
(圖一)，雷射基本構造圖[4]



(圖二)，雷射基本原理圖[3]

2. 氦氖雷射

氦氖雷射是波長約為 632.8nm 的紅光雷射，氦氖雷射是在氣體儲存槽中以約 10：1 的比例填入氦氣與氖氣的混和氣體，並且透過激發源激發氦與氖原子，使其電子躍升至高能階，由於激發的氦原子處於亞穩態，故不會自發輻射，也因此激發的氦原子將會逐漸累積。而當激發的氦原子碰撞到氖原子時，氖原子會因能量轉移而被激發，相對的氦原子會降回基態，而激發態的 Ne 原子將參與受激發光機制，作為氦氖雷射的主要發光來源。

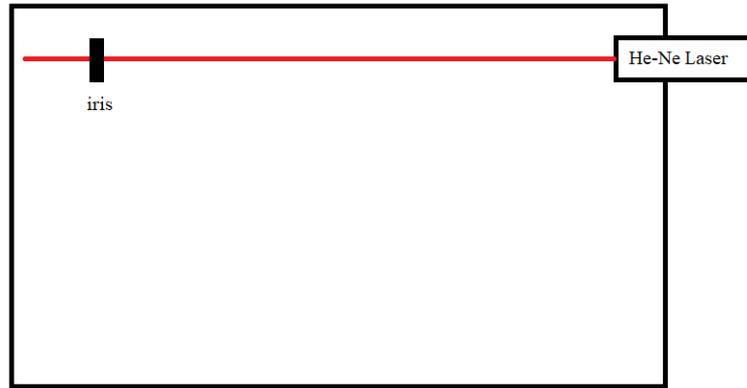


(圖三)，氦氖雷射簡易架構[5]

三、實驗步驟(含配置圖)：

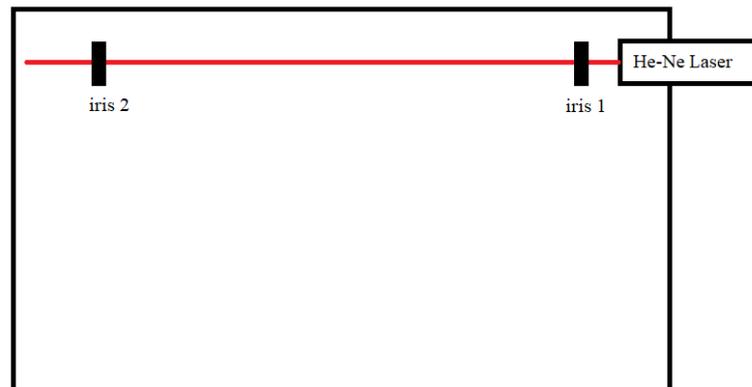
(1) 利用 2 個等高光圈調整雷射水平

首先將光圈置於雷射遠處，將光圈關至最小，並確保雷射通過光圈，接著將其他光圈置於同位置，以確認所有光圈皆為等高，如下圖三。



(圖三)等高光圈調整

接著將光圈一前一後置於雷射前方，先調整精密雷射固定架前方(出光處)的三軸，並將前方的光圈一關至最小，使雷射能夠通過光圈一，再調整雷射固定架後方的三軸，並將光圈一開至最大，將光圈二關至最小，使雷射能通過後方的光圈二，且重複上述操作，使雷射最終能同時通過兩個關至最小的光圈，即完成雷射水平調整。

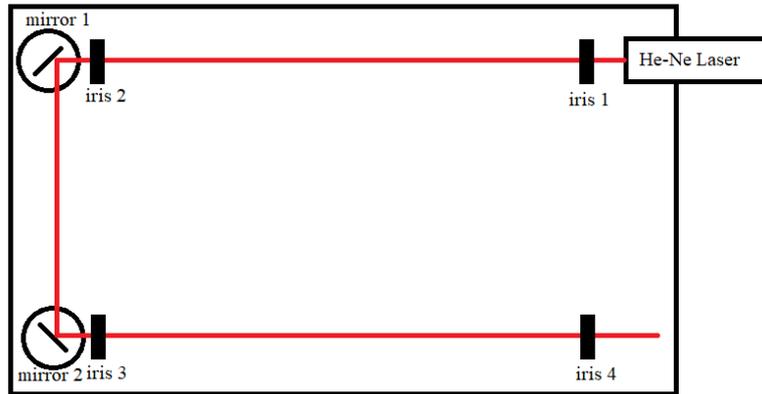


(圖四)雷射水平調整

(2) 控制單一雷射光束的行進方向

新增兩個等高光圈置於光學桌板下方的指定位置，並且放置兩個反射鏡，將儀器擺設如下圖五。

首先進行初調，選擇反射鏡位置使雷射大約照射到光圈四上，接著將光圈三開至最大，光圈四關至最小，調整反射鏡二使雷射能通過光圈四，接著將光圈三關至最小，調整反射鏡一使雷射能通過光圈三，並重複以上操作直到雷射能通過全部四個關至最小的光圈。

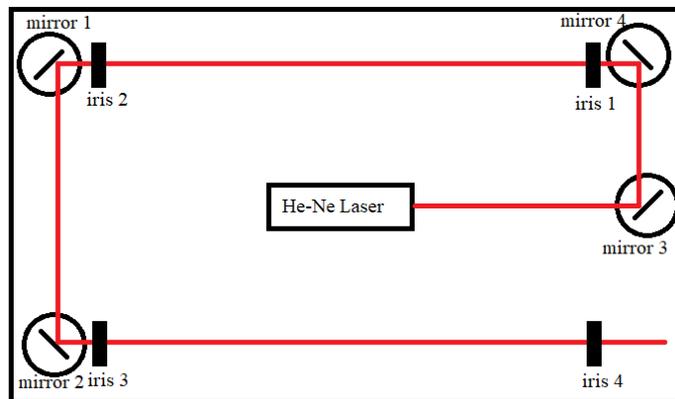


(圖五)透過兩個反射鏡調整雷射方向

(3) 控制兩個不同方向的雷射使其行進路徑重合

將上圖五的光路定義為光路一，且移動氦氖雷射位置，固定光圈、反射鏡一和二的位置，並新增兩個反射鏡，使新的光路二與原先的光路一重合，如下圖六。

首先移動氦氖雷射位置，且注意上圖五中除了雷射的其他儀器皆不可進行調整，接著如同調整單一雷射行進方向進行反射鏡的初調，並調整反射鏡三、四以通過關至最小的光圈一、二，則新的氦氖雷射光路與原先光路重合。



(圖六)使不同方向的雷射路徑重合

四、數據分析與討論：

(1) 實驗數據整理及分析：

本次實驗無數據。

(2) 預報題目作答：

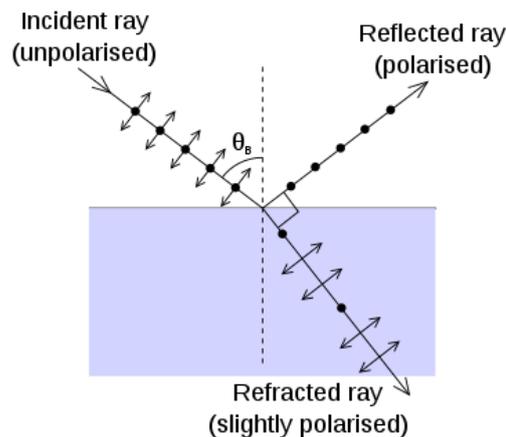
1. 氦氖雷射的可能輸出波長有哪幾個？本實驗所使用的紅光氦氖雷射可能的設計為何，使得輸出波長為 632nm？

答：氦氖雷射的可能輸出波長有 543.5nm、593.9nm、611.8nm、632.8nm、1.1523 μ m、1.52 μ m、3.3913 μ m 等幾種[6]，分別是透過增益介質中不同能階的電子所輻射出的，而其中對應到 632.8nm 的能階能提供可見光波段中最強的增益，故成為一般氦氖雷射設計中最常見的波段。而在雷射的共振腔中可能存在著許多不同波段的光，但透過共振腔的長度設計，可使特定波長的光(632.8nm)在共振腔中形成駐波，故經歷建設性干涉，造成該特定波長的光放大，而其他波長的光則會經歷破壞性干涉，並逐漸消耗，最後僅剩特定的輸出波長。

2. 在前述「Laser structure」圖示中，Brewster window 的功用為何？

答：如下圖七，當一未偏振的光入射介質時，若其入射角恰為布魯斯特角(Brewster's angle)，則電場方向與入射平面垂直(TE 方向)的光將會大部分被反射，而透射光中大部分皆為電場方向與入射平面平行(TM 方向)的光，而少部分為 TE 方向。

故由「Laser structure」示意圖可知，Brewster window 架設於雷射後方的全反射鏡前，因此當氦原子激發出的非偏振光入射 Brewster window 時，大部分 TE 方向的偏振光會反射，而僅有少部分的 TE 偏振光與所有的 TM 偏振光會穿透，並透過全反射鏡反射，因此透過 Brewster window 反射的 TE 偏振光無法在雷射共振腔中與共振腔長度對應，即無法進行建設性干涉且逐漸損耗，因此最後出射的雷射光為 TM 偏振光。

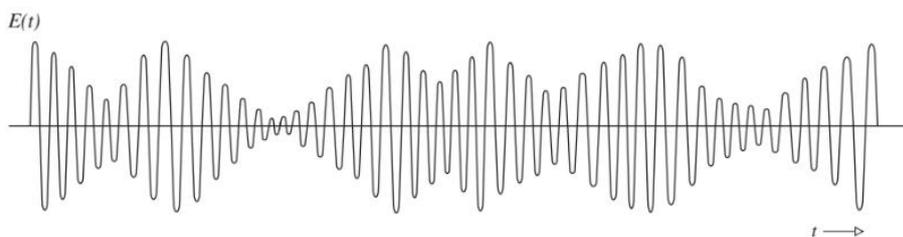


(圖七)，布魯斯特角示意圖[7]

3. Coherence 的物理意義為何？Coherence Length 的定義為何？

答：Coherence(相干)的意義是討論兩個以上的波之波型、頻率和相位差的相同程度，其主要又可分為時間相干度與空間相干度。

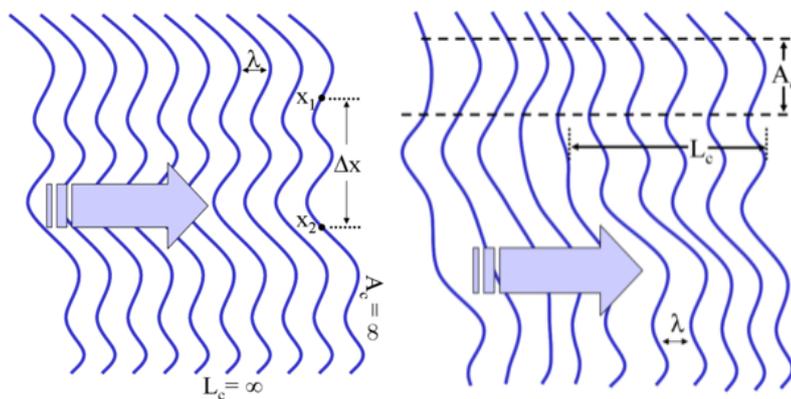
時間相干度是關於同一個波源在不同時間點的相干性，在討論時，可以考慮一個準單色的光波，如下圖。若將各個波列的平均持續時間定義為 τ_c ，則其即為該光波的相干時間(coherence time)，若取一個時間區段 Δt ，且 Δt 遠小於 τ_c ，則在該時間區段內，該光波相干，意即取定一定點觀察，在該小時間區段中，光波的波型和相位皆是可預測的。同時也可定義 $\tau_c \times \Delta\nu = 1$ ，而 $\Delta\nu$ 即為光源的頻寬，因此可得知若波源的頻寬越窄，該光波越趨向單色，則相干時間越長，光波的時間相干度越好。



(圖八)，準單色光波[1]

而關於空間相干度，則是考慮在不同空間位置上波的相干性，一般而言，空間相干性與波源的有限尺寸相關，如可考慮一波源向外傳播，在同一波前中取兩點作為其次級波源，若此兩波源距離越遠仍可保持相干，則代表原波源的空間相干性越好。此外，一波源在空間上仍可保持相干的最遠距離被稱為橫向相干長度 L_c ，也因此對於三維傳播的波而言，相干面積 $A_c = L_c^2$ 等同於能夠發生空間相干的最高面積，在該面積內的次波源皆為相干。

如下二圖，在左圖九中，在同一波前上取兩次波源 X_1 與 X_2 ，可發現兩波源的波型相同，且相位差為常數，固可稱此波的空間相干性極佳，反之，在右圖十中，在同一波前上任取 2 點作為次級波源，可發現空間相干性較差。



(圖九、圖十)，空間相干度[8]

而關於 coherence length(相干長度)，則是一個波源的時間相干性之量化，意即一波源可保持弦波，以便於預測其波型及相位的最大長度，可以簡單定義為 $L = c/(n \times \Delta\nu)$ ，其中 c 為光速， n 為介質折射率， $\Delta\nu$ 為光源的頻寬。

此外，相干長度也可被麥克森干涉儀測量，其將相干長度定義為一個自相干雷射在干涉可見度等於 $1/e = 37\%$ 的光程差，而干涉可見度被定義為 $V := I_{max} - I_{min}/I_{max} + I_{min}$ ， I 為干涉條紋強度[9]。實際上，由於白光的頻寬約為 $3 \times 10^{14}\text{Hz}$ ，故相干長度約為 900nm，而單模氦氖雷射的頻寬極窄，故相干長度高達 400m。

4. 請簡單敘述光與物質間作用的三大機制？其中哪一個機制為產生雷射的主要關鍵？

答：光與物質原子主要有三種交互作用。

第一種為吸收，即處於基態(E_1)的原子受到能量為 $h\nu$ 的光子入射， h 為普朗克常數， ν 為光子頻率，若該原子有一激發態(E_2)，且 $E_2 - E_1 = h\nu$ ，則該原子將會吸收入射光子，並將電子躍遷至激發態，此時該原子較原本具有更多能量。

第二種為自發輻射，一般而言，若激發態的原子並未因為碰撞或者其他因素而將能量消耗，則該激發原子會停留約 1~10ns，之後會自發性的將電子降回較穩定的基態，且朝隨機方向以隨機相位發射出一顆能量同為能階差的光子 $h\nu$ 。

第三種為受激輻射，考慮一顆已在激發態(E_2)的原子，若有一顆能量為 $h\nu$ 的光子入射，而該原子具有一較低的能階(E_1)，且 $E_2 - E_1 = h\nu$ ，則該原子將會受光子激發而發射一顆與入射光子具有同運動方向、相位、頻率的出射光子，並將電子由高能階(E_2)降至低能階(E_1)，此時等同於將入射光放大。

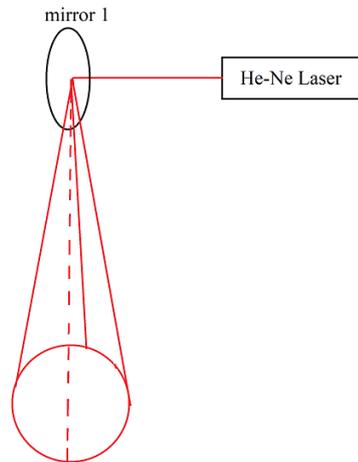
而雷射的主要原理即為受激輻射，當增益介質中高能階的電子密度大於低能階的電子密度時，即達居量反轉，此時若有一原子自發輻射光子，則該光子將會入射其他激發原子，並促使被入射的原子進行受激輻射，輻射出同方向、相位、頻率的光子，並且入射共振腔兩側的全反射鏡與半反射鏡，在共振腔中共振，多次行經增益介質，逐漸達成放大的效果，最後從雷射出口的部分反射鏡透射，形成雷射光。

(3) Q&A 題目作答

1. 於本實驗中，將一道雷射光穿過預先架好的兩個分開光圈時需要用兩面反射鏡來調整雷射的光路，為甚麼？只用一面反射鏡會有甚麼問題？

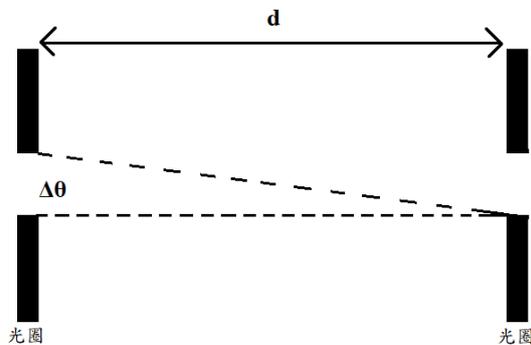
答：若使用兩面反射鏡能較精確的調整雷射的光路，可以利用兩面反射鏡反覆調整光路的水平，若只用一面反射鏡則無法建立有效率的調光路流程，只能直接對準 2 個光圈進行校正。

此外，當只有一面反射鏡時，雷射入射和出射反射鏡的點應是固定的，意即兩個光圈前的光點是固定位置，將會限制光路調整的幅度，如下圖十一，紅線與圓圈表示著光路的可調控範圍，假若反射鏡與光圈並未完全在同一直線上，就必須要改變光路出射點，否則將無法得到水平光路，此時則必須移動反射鏡，不但麻煩耗時且無法精確調整，因此，使用兩面反射鏡可有效得增加光路校正的幅度與軌跡，並且透過第二面反射鏡得到水平的光路。



(圖十一)，使用一面反射鏡調整雷射光路的方向

2. 如下圖，兩光圈的大小皆為 1mm，畫出兩光圈之距離 d 與最大角變量 $\Delta\theta$ 的關係圖，並觀察此畫出的關係曲線為線性、二次曲線或其他關係。(d 由 10cm 到 3m)，由此圖解釋調整雷射水平時，兩光圈距離之選擇。

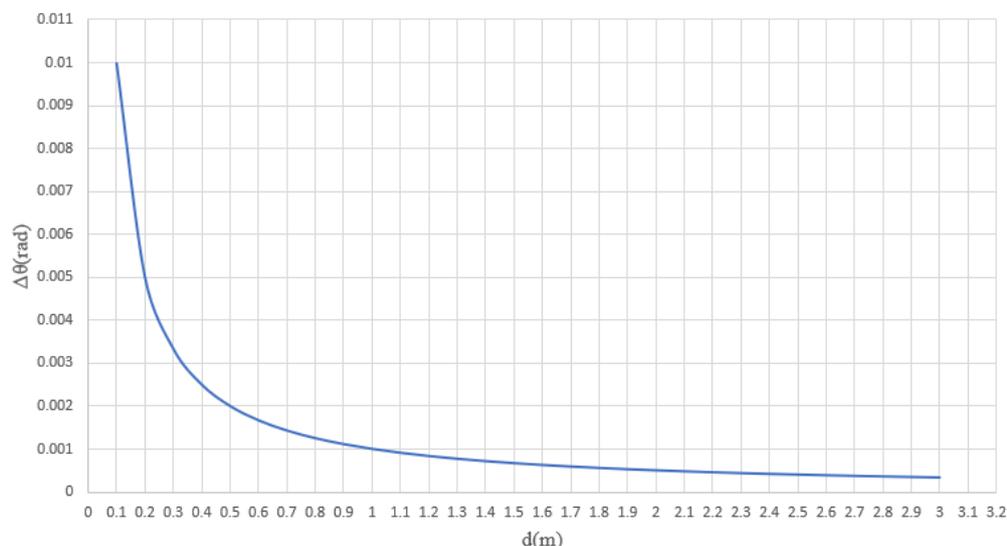


(圖十二)，兩光圈距離與最大角變量的關係

答：由上圖十二觀察可發現， $\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{1mm}{d(m)} = \tan^{-1} \frac{0.001(m)}{d(m)}$ ，並

可透過上述關係式得下圖十三：

兩光圈距離d與最大角變量 $\Delta\theta(\text{rad})$ 之關係圖

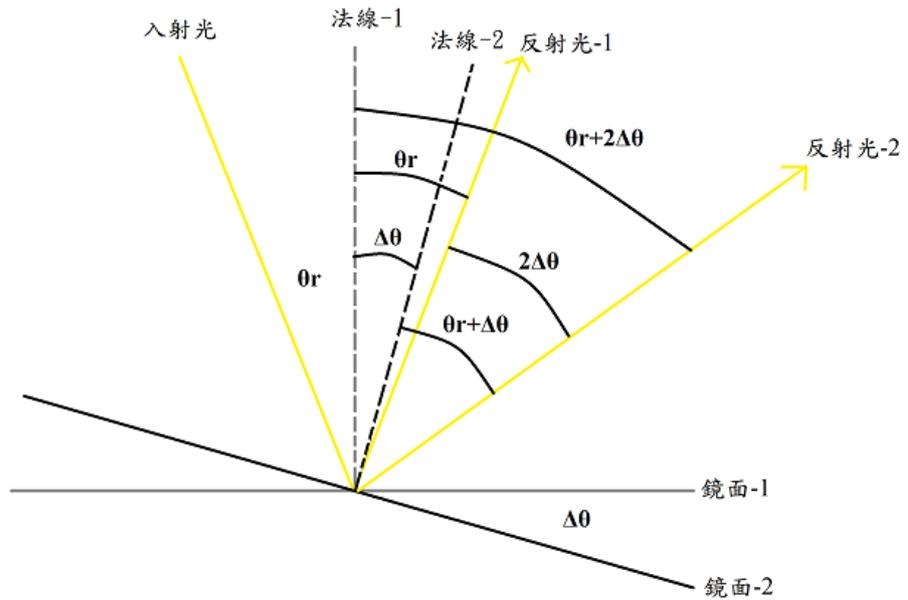


(圖十三)兩光圈距離 d 與最大角變量 $\Delta\theta$ 之關係圖

此關係為反正切函數，根據上圖十三，可得知在調整雷射水平時，兩光圈距離越遠越好，當兩光圈距離 3 公尺時，最大角變量 $\Delta\theta$ 可縮小至約 0.003(rad)，等同 0.02° ，同時也代表著雷射越水平，實驗誤差越小。

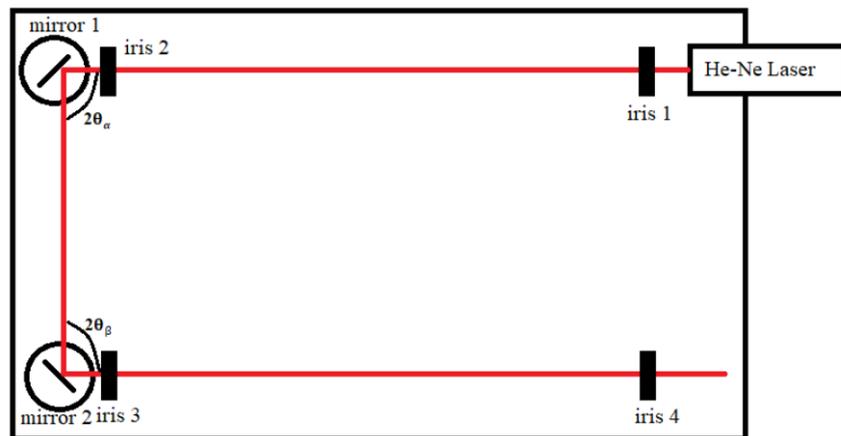
3. 「實驗內容 2」中，假設已完成面鏡 2(mirror 2)後雷射水平的調整，接著再旋轉面鏡 1(mirror 1)一 θ 角，則此時面鏡 2(mirror 2)應旋轉多少角度，可使雷射回復水平通過光路後的 2 個等高光圈？請說明原因。

答：首先討論光槓桿原理，假設一光線以 θ_r 角度入射鏡面-1，則該光線同以 θ_r 角度出射鏡面-1，若此時將鏡面旋轉 $\Delta\theta$ 度，成鏡面-2，則此時入射光與鏡面-2 構成的法線-2 夾 $\theta_r + \Delta\theta$ 角，出射光-2 也將與法線-2 夾 $\theta_r + \Delta\theta$ 角，同時可發現，旋轉鏡面後的反射光-2 與旋轉鏡面前的反射光-1 夾 $2\Delta\theta$ 角，此即為光槓桿原理，如下圖十四。



(圖十四)，光槓桿原理示意圖

接著討論問題中情況，首先因已完成面鏡二後雷射水平的調整，故面鏡1前的雷射光路與面鏡2後的雷射光路平行，即 $2\theta_\alpha + 2\theta_\beta = 90^\circ$ ，而在調整面鏡1一 θ 角後，透過光槓桿原理可得知面鏡1出射的光較原本的出射光多偏移 2θ 角，因此面鏡1的入射光和出射光共夾 $2\theta_\alpha + 2\theta$ 角，若要使面鏡2後的光路仍保持水平，則可推出面鏡二的入射光和出射光需夾 $2\theta_\beta - 2\theta$ 角，且現在的入射光較原先的入射光相差 2θ 角，因此透過光槓桿原理可得知，面鏡2需調整 θ 角以對應入射光 2θ 角的變化。所以面鏡2需調整 θ 角才可使雷射回復水平通過光路後的2個光圈。

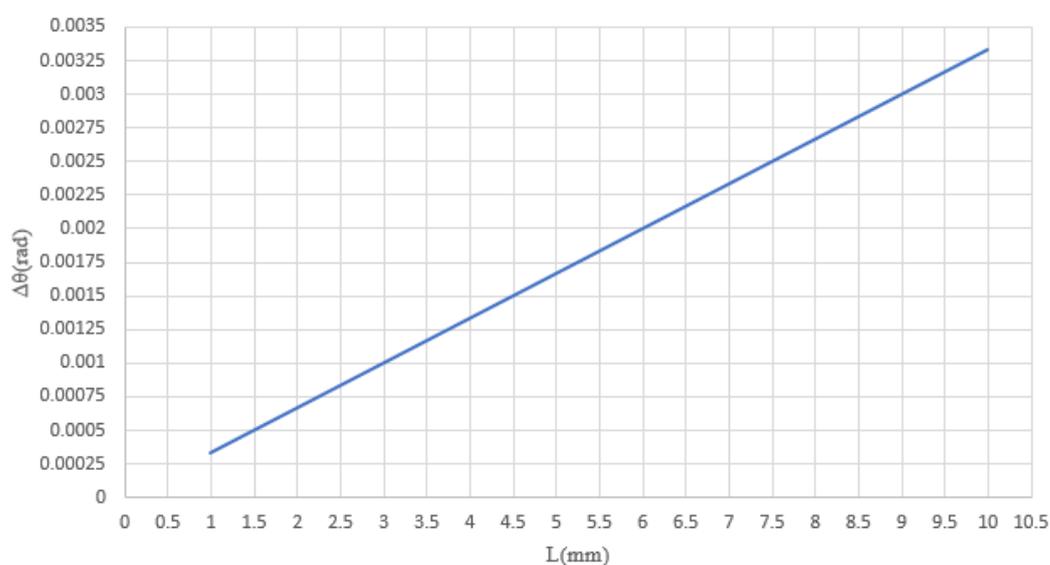


(圖十五)，透過兩個反射鏡調整雷射方向

4. 由「實驗預習 2」的作答及實驗過程中的觀察，光圈的大小會產生實驗誤差嗎？

答：會，光圈越大，實驗誤差也將越大，在實驗預習 2 中，可發現若假定光圈大小為 L ，則最大角變量 $\Delta\theta = \tan^{-1} L/d$ ，可發現光圈大小 L 對 $\Delta\theta$ 也相當重要，若延續實驗預習 2 的假設，將 2 光圈距離 d 定為 3m，將 2 光圈大小 L 設為從 1mm 到 10mm 的變量，則可繪出下圖。透過下圖，可發現因正切函式在小角度下的近似， $\tan\theta \approx \theta$ ，故光圈大小 L 與最大角變量 $\Delta\theta$ 有著近線性關係，因此光圈大小 L 直接關係到實驗誤差。

光圈大小 L 與最大角變量 $\Delta\theta(\text{rad})$ 之關係圖



(圖十六)，光圈大小 L 與最大角變量 $\Delta\theta$ 之關係圖

此外，在實驗實務上，以光圈校正雷射水平時，一般需將光圈縮至最小，使雷射通過光圈，而由於雷射仍具光束半徑，當穿過光圈時，可透過雷射在光圈上形成的光環是否均勻來判斷雷射是否水平，但倘若光圈孔洞半徑過大，將難以判斷光環厚薄、亮暗，甚至無法出現光環，即增添雷射水平校正的困難，也增加實驗誤差。

(4) 實驗結果討論

本次實驗主要建立了調整光路的技巧，除了理論上的方法，還有調整光路實務上的技巧跟細節。

在建立等高光圈時，需將數個光圈放在遠離雷射的同個位置。在建立雷射水平時，需先做好優良的初調，以便於之後的校正，校正時需注意光圈必須選用等高光圈，並且先調整雷射架前方的三軸，使雷射通過近雷射的光圈，再調整雷射架後方的三軸，使雷射通過遠雷射的光圈，並重複校正。在架設反射鏡前，也需先大略對齊雷射位置，以進行初調，方便之後校正。

此外，由於光電實驗對器材精密度相當要求，桌面的水平、儀器的穩定性都會大幅度的影響實驗精確度，甚至可能導致實驗無法完成，因此必須確定器材狀況，如桌面是否平整、無落塵、雷射固定架中的鋼珠是否完好，在架設器材時也需確實鎖緊，並注意不可用力過猛，損壞螺紋。在實驗中也需注意自己使用中的雷射不可影響他人，輕則影響其他組別數據，重則會有安全問題。最後，由於氦氖雷射使用時施加了近 1000V 的高壓，故在拆卸時需先將雷射插頭適當放電(接地)，避免傷人。

五、參考資料及文獻：

- [1] Eugene Hecht, *Optics*, 5th ed. (Pearson Education, 2017), Chapter 3.4.4, pp.74- 76. Chapter 7.4.3, pp.324-326. Chapter 9.2.1, pp.403-404. Chapter 12.1, pp.588-590.
- [2] 張守進、劉醇星、姬梁文，” 半導體雷射”，*科學發展*，第 349 期，14 頁至 17 頁，2002 年 1 月。
- [3] 楊坤璋，” 使用飽和吸收體之單模窄頻光纖雷射”，12 頁至 15 頁，2004 年。
- [4] 雷射，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%BF%80%E5%85%89>
- [5] Helium-neon laser, Wikipedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/Helium%E2%80%93neon_laser
- [6] List of laser types, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_laser_types
- [7] 布魯斯特角，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%B8%83%E5%84%92%E6%96%AF%E7%89%B9%E8%A7%92>
- [8] 相干性，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%9B%B8%E5%B9%B2%E6%80%A7>
- [9] 相干長度，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%9B%B8%E5%B9%B2%E9%95%BF%E5%BA%A6>
- [10] 干涉(物理學)，維基百科，[https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%B9%B2%E6%B6%89_\(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6\)](https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%B9%B2%E6%B6%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))
- [11] 受激發射，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%97%E6%BF%80%E5%8F%91%E5%B0%84>