

線偏振、圓偏振及橢圓偏振

【目的】

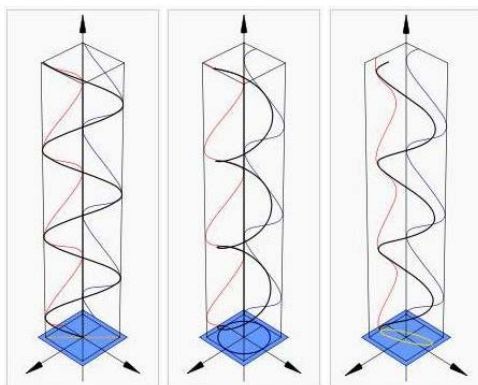
1. 認識光的偏振性和偏振光的種類，並學習利用偏振器製造偏振光。
2. 學習並驗證 Malus' s Law。
3. 觀察 $\frac{\lambda}{2}$ 波片和 $\frac{\lambda}{4}$ 波片對線偏振光的作用。

【原理】

光是電磁波，而電磁波是一種橫波，電磁場的振動方向與波的前進方向垂直。若電場 E 被限制在某一些方向上振盪，稱為光的偏振化，電場振動方向稱為光的偏振方向。

1. 偏振光的種類

沿 z 方向傳播的波動方程的通解可表示為沿 x 、 y 方向振動的兩個獨立場分量的線性組合，即 $E = iE_x + jE_y$ ，其中 $E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_x)$ 、 $E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_y)$ 表示傳播方向相同、振動方向相互垂直、有固定相位差的兩束線偏振光。根據空間任一點光電場 E 的向量末端在不同時刻的軌跡不同，可分為線偏振光 (linear polarized light)、圓偏振光 (circular polarized light)、橢圓偏振光 (elliptical polarized light)，如圖一所示。



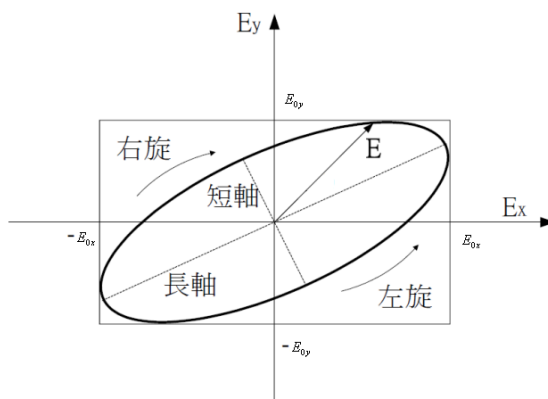
圖一 線偏振光、圓偏振光、橢圓偏振光

(1) 橢圓偏振光 (elliptical polarized light)

將 $E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_x)$ 和 $E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_y)$ 消去 $(\omega t - kz)$ ，經過運算

$$\text{可得} \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right) \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right) \cos \varphi = \sin^2 \varphi, \quad \varphi = \varphi_y - \varphi_x \dots \dots (1)$$

在垂直於傳播方向的平面內，公式 (1) 為二元二次方程，表示的幾何圖形是橢圓，稱為橢圓偏振光，其電向量的大小和方向都隨時間變化，如圖二所示。

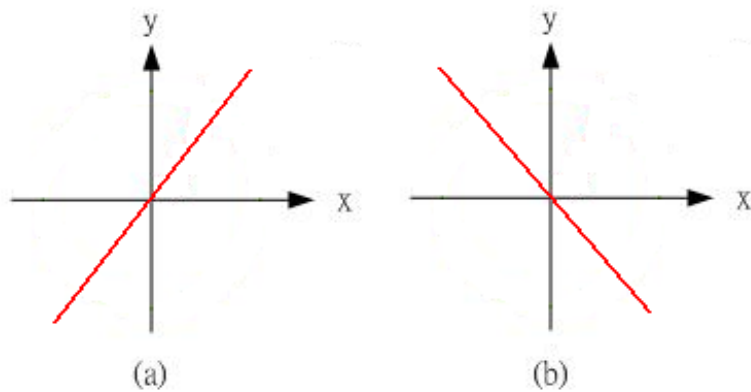


圖二 橢圓偏振光的電場向量圖

根據電向量的旋轉方向不同，可將橢圓偏振光分為右旋橢圓偏振光 (right-hand elliptical polarized light) 和左旋橢圓偏振光 (left-hand elliptical polarized light)。所謂右旋或左旋，與觀察的方向有關，通常規定逆著光傳播的方向看，E 順時針方向旋轉時，稱為右旋橢圓偏振光；反之，稱為左旋橢圓偏振光。其旋向取決於相位差 φ 。當 $2m\pi < \varphi < (2m+1)\pi$ ， $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 時，為右旋橢圓偏振光；當 $(2m-1)\pi < \varphi < 2m\pi$ 時，為左旋橢圓偏振光。

(2) 線偏振光 (linear polarized light)

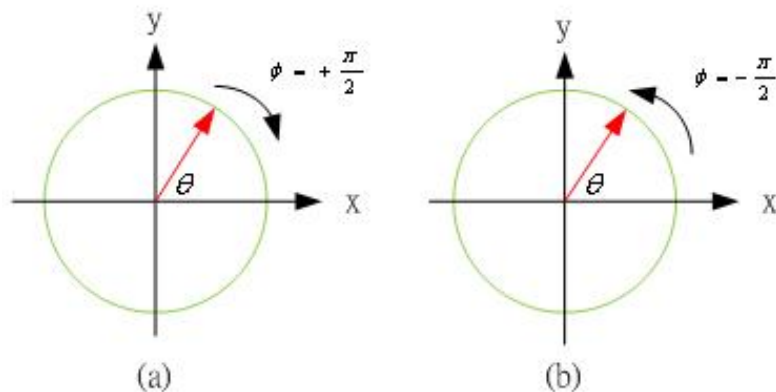
當 E_x 、 E_y 兩分量的相位差 $\varphi = m\pi$ ， $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 時，公式 (1) 為直線方程，稱為線偏振光。此時，有 $\frac{E_x}{E_y} = \pm \frac{E_{0x}}{E_{0y}}$ ，其電向量的方向保持不變，大小隨相位變化。當 m 為零或偶數時，光振動方向在 I、III 象限內；當 m 為奇數時，光振動方向在 II、IV 象限內，如圖三所示。



圖三 線偏振光，(a) m 為零或偶數，(b) m 為奇數。

(3) 圓偏振光 (circular polarized light)

當 E_x 、 E_y 的振幅相等 ($E_{0x} = E_{0y} = E_0$)，相位差 $\varphi = (2m \pm \frac{1}{2})\pi$ ， $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 時，公式 (1) 為圓方程， $E_x^2 + E_y^2 = E_0^2$ ，該光稱為圓偏振光。其電向量的大小保持不變，而方向隨時間變化。和橢圓偏振光一樣，圓偏振光的電向量也有旋轉方向，即左旋還是右旋的問題。當 $\varphi = (2m + \frac{1}{2})\pi$ 時，為右旋圓偏振光 (right-hand circular polarized light)，而當 $\varphi = (2m - \frac{1}{2})\pi$ 時，為左旋圓偏振光 (left-hand circular polarized light)，如圖四所示。



圖四 圓偏振光，(a) 為右旋圓偏振光，(b) 為左旋圓偏振光。

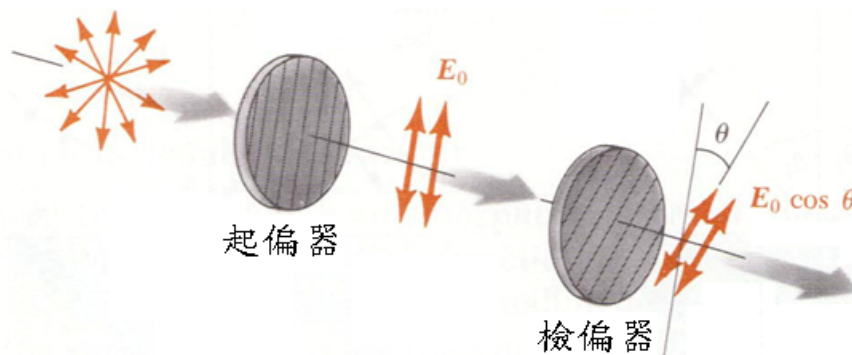
2. 偏振器 (polarizers)

能夠產生偏振光的裝置，包括儀器、元件等，稱為起偏器 (polarizer)。用來檢測偏振光及其偏振方向的裝置，叫檢偏器 (analyzer)。起偏器也可用來作檢偏器，二者無實質性的差別，只是用途不同，完全可以互換。

如圖五所示，未偏振的光線在各方向振動的機率相同，經過起偏器後，只容許振動方向與起偏器透射軸方向平行的光通過，即電場向量方向平行於起偏器的透射軸。再進入檢偏器後，若偏振光的振動方向與檢偏器之透射軸夾 θ 角時，振幅為 E_0 的偏振光通過檢偏器後，其振幅變為 $E_0 \cos \theta$ ，又經過偏振器的光強度與振幅的平方成正比，故通過偏振器前後的光強度關係可以表示為： $I(\theta) = I_0 \times \cos^2 \theta \dots\dots (2)$

上式即稱作 Malus' s Law。其中， I_0 是入射偏振光的強度，與振幅 E_0 的平方成正比，即 $I_0 \propto E_0^2$ ；而 I 是通過檢偏器後之強度，與振幅 $E_0 \cos \theta$ 的平方成正比，即 $I \propto E_0^2 \cos^2 \theta$ 。

未偏振的光線



圖五 Malus' s Law 示意圖

由公式 (2) 知：當夾角 $\theta = 0^\circ$ (電場平行於檢偏器的透振軸) 時，所有的偏振光均可以自檢偏器通過，故強度並不改變，即 $I = I_0$ ；當夾角 $\theta = 90^\circ$ (電場垂直於檢偏器的透振軸) 時，通過檢偏器之光強度為零，即 $I = 0$ ，表示當起偏器與檢偏器的軸互相垂直時，光線將無法通過檢偏器。

3. 波片 (wave plates)

由起偏器獲得的線偏振光垂直入射到由單軸晶體 (uniaxial crystals) 製成的平行平面薄片上，這時入射的線偏振光將分成兩束振動方向相互垂直的線偏振光：o 光 (ordinary ray) 和 e 光 (extraordinary ray)，兩者光向量分別沿 x 軸和 y 軸。習慣上把兩軸中的一個稱為快軸，另一個稱為慢軸，即光向量沿快軸的比沿慢軸的傳播得快。對於正單軸晶體 (positive uniaxial crystals)，o 光比 e 光傳播快，所以光軸方向是慢軸，與之垂直的是快軸。由於 o 光和 e 光在晶片內速度不同，即兩者在晶體內所通過的光程不同，兩束光通過晶片後產生了一定的光程差或相位差。

設晶片的厚度為 d ，o 光和 e 光通過晶片後的光程差為 $\Delta = |n_o - n_e| d$ ，相位差為 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d$ ，這種能使光向量互相垂直的兩束線偏振光產生相位相對延遲的晶片稱為波片。

現有一束線偏振光垂直射入波片，在入射面上所產生的 o 光和 e 光分量同相位，振幅分別為 A_o 和 A_e 。該兩光束穿過波片射出時，附加了一個相位延遲差 δ ，因而其合成光向量端點的軌跡方程為

$$\left(\frac{E_1}{A_o}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{A_e}\right)^2 - 2\frac{E_1 E_2}{A_o A_e} \cos \delta = \sin^2 \delta \dots\dots (3)$$

該式為橢圓方程。它說明輸出光的偏振態發生了變化，為橢圓偏振光。利用波片可以將橢圓偏振光轉變成線偏振光，或將線偏振光轉變成橢圓偏振光。

(1) 全波片 (Full-Wave Plate, FWP)

如果波片產生的光程差 $\Delta = m\lambda$, $m = \pm 1, \pm 2, \dots$, 其中 m 為整數, 這樣的波片稱為全波片。其附加相位延遲差為 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d = 2m\pi$, $m = \pm 1, \pm 2, \dots$, 代入公式 (3) 得

$\left(\frac{E_1}{A_o} - \frac{E_2}{A_e}\right)^2 = 0$, 即 $E_1 = \frac{A_o}{A_e} E_2 = \tan \theta E_2$, 此式為直線方程, 即線偏振光通過全波片後, 其偏振狀態不變。因此將全波片放入光路中, 不改變光路的偏振狀態。全波片的厚度為

$$d = \left| \frac{m}{n_o - n_e} \right| \lambda。$$

(2) 半波片 ($\frac{\lambda}{2}$ 波片, Half-Wave Plate, HWP)

如果波片產生的光程差 $\Delta = (m + \frac{1}{2})\lambda$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 其中 m 為整數, 這樣的波片稱為半波片。其附加相位延遲差為 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d = (2m + 1)\pi$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,

代入公式 (3) 得 $\left(\frac{E_1}{A_o} + \frac{E_2}{A_e}\right)^2 = 0$, 即 $E_1 = -\frac{A_o}{A_e} E_2 = \tan(-\theta)E_2$, 此式為直線方程, 即線偏振光通過半波片後, 仍為線偏振光, 只是振動面的方位較入射光轉過了 2θ 角。當 $\theta = 45^\circ$ 時, 振動面轉過 90° 。半波片的厚度為 $d = \left| \frac{2m + 1}{n_o - n_e} \right| \frac{\lambda}{2}$ 。

(3) $\frac{1}{4}$ 波片 ($\frac{\lambda}{4}$ 波片, Quarter-Wave Plate, QWP)

如果波片產生的光程差 $\Delta = (m + \frac{1}{4})\lambda$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 其中 m 為整數, 這樣的波片稱為 $\frac{1}{4}$ 波片。其附加相位延遲差為 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d = (2m + 1)\frac{\pi}{2}$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,

代入公式 (3) 得 $\frac{E_1^2}{A_o^2} + \frac{E_2^2}{A_e^2} = 1$, 此式是一個標準橢圓方程, 其長、短半軸長分別為 A_o 和 A_e 。

線偏振光通過 $\frac{1}{4}$ 波片後, 射出光將變為長、短半軸等於 A_o 和 A_e 的橢圓偏振光。當 $\theta = 45^\circ$ 時,

$$A_o = A_e = \frac{A}{\sqrt{2}}, \text{ 射出光為圓偏振光, 其方程為 } E_1^2 + E_2^2 = \frac{A^2}{2}, \frac{1}{4} \text{ 波片的厚度為 } d = \left| \frac{2m + 1}{n_o - n_e} \right| \frac{\lambda}{4}。$$

【實驗器材】

線偏振 He-Ne 雷射 (附角度盤, 波長 = 632.8nm)、檢偏鏡 (附角度盤)、 $\frac{\lambda}{4}$ 波片 (第零階、材質: 石英)、 $\frac{\lambda}{2}$ 波片 (第零階、材質: 石英)、光度計 (OPTOMETER S370)、圓轉檯 (附角度盤)、放大鏡、光具座

註: 石英 (quartz) 是正單軸晶體, $n_o = 1.5443$, $n_e = 1.5534$ 。

【注意事項】

1. 光度計因靈敏度高，故讀值跳動不停。記錄讀值速度要快，看到就記不要等。
2. 轉動檢偏鏡時，務必‘精確’置於待測角度上，避免繪出的圖形偏轉。
3. 波片是高價光學元件，請小心拿取，並避免指紋留在上面。

【實驗步驟】

1. Malus' s Law



圖六 Malus' s Law 實驗裝置圖

(1) 如圖六所示，檢偏鏡暫時取下，調整雷射光路徑，大略與光具座平行，雷射光打在光度計的正中央。開啟光度計並設定在工作狀態（操作步驟寫在機殼上）。

(2) 放回檢偏鏡，使雷射光點落於鏡中心，其反射光點儘量靠近雷射輸出孔，用放大鏡看游標尺刻度，使檢偏鏡角度精確置於 90 度。

註：雷射光的反射光點不可射入雷射，以免影響其偏振性。

(3) 緩慢轉動雷射管，使光度計讀值最小（nW 以下），此時雷射光偏振面垂直桌面。固定雷射管並記錄雷射管轉盤角度。

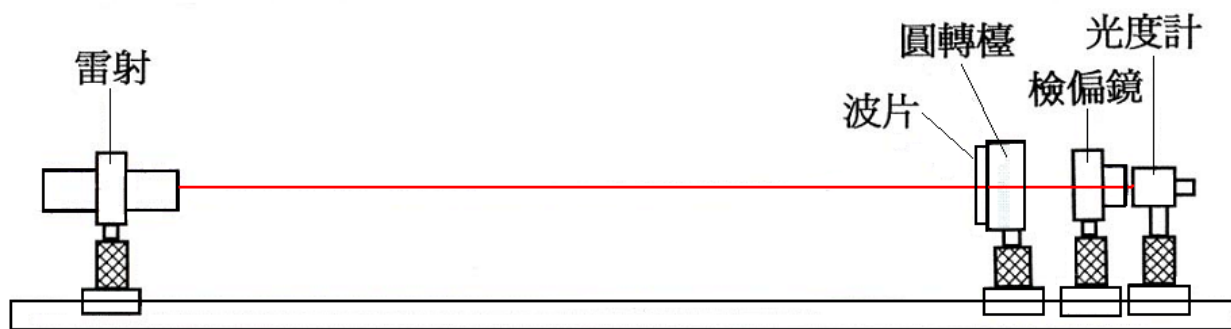
註：雷射管的角度不管向左或向右，光度計的讀值都變大，才是最小值。此步驟請確實操作，以免造成繪出的圖形平移。

(4) 檢偏鏡由 0 度起，每 5 度記錄一次光度計讀值至 360 度止。

(5) 以 θ 為 X 軸、歸一化的光度計讀值 $(\frac{\text{讀值}}{\text{最大讀值}})$ 為 Y 軸，繪曲線圖於方格紙上，並與

' $\cos^2 \theta$ ' 函數曲線對照。

2. 觀察 $\frac{\lambda}{4}$ 波片對線偏振光的影響



圖七 波片實驗裝置圖

(1) 如圖七所示，檢偏鏡角度置於 90 度，使光度計讀值最小，再將 $\frac{\lambda}{4}$ 波片安裝在圓轉檯上，

使雷射光點落於鏡中心，其反射光點儘量靠近雷射輸出孔正下方，轉動 $\frac{\lambda}{4}$ 波片使波片外環上的刻痕（波片光軸方向）大致垂直桌面，即與起偏鏡光軸方向平行，儘量使光度計讀值減小，固定轉盤，微調其角度使光度計讀值最小。（nW 以下）

註：雷射在光具座的最左邊、波片在最右邊，相離較遠則波片面與雷射光較垂直。

註：波片的角度不管向左或向右，光度計的讀值都變大，才是最小值。此步驟請確實操作，以免影響實驗結果，導致重複該步驟 N 次。

(2) 檢偏鏡角度置於 0 度，記錄光度計讀值 I_0 ；順時針轉雷射管 45 度，記錄雷射管轉盤角度。

(3) 檢偏鏡由 0 度起，每 5 度記錄光度計讀值至 360 度止。

註：起偏鏡在順時針 45 度時，線偏振轉換成圓偏振，光度計讀值應為常數，可借此現象估計實驗裝置是否已調整妥當。因為產生圓偏極光，故光度計的讀值變化應該不大，變化若大於 10%，系統必須重調，並重作一遍。

(4) 由理論知： $E = \sqrt{2I_0}$ （雷射光入射波片的振幅）， $E_{//} = E \cdot \cos \theta$ ， $E_{\perp} = E \cdot \sin \theta$

由實驗數據知： $E_{//} = \sqrt{I(0^\circ) + I(180^\circ)}$ ， $E_{\perp} = \sqrt{I(90^\circ) + I(270^\circ)}$

將兩者比較，可預先估計實驗數據是否正確。

(5) 順時針轉雷射管與波片光軸夾角 15 度，記錄雷射管轉盤角度，並重複步驟 (3) (4)。

(6) 順時針轉雷射管與波片光軸夾角 30 度，記錄雷射管轉盤角度，並重複步驟 (3) (4)。

(7) 參考【實驗數據處理】，將步驟 (3) (5) (6) 的數據繪圖，並解釋圖形產生的原因。

3. 觀察 $\frac{\lambda}{2}$ 波片對線偏振光的影響

(1) 將 $\frac{\lambda}{4}$ 波片取下，檢偏鏡角度置於 90 度，緩慢轉動雷射管，使光度計讀值最小後，換上 $\frac{\lambda}{2}$ 波片。

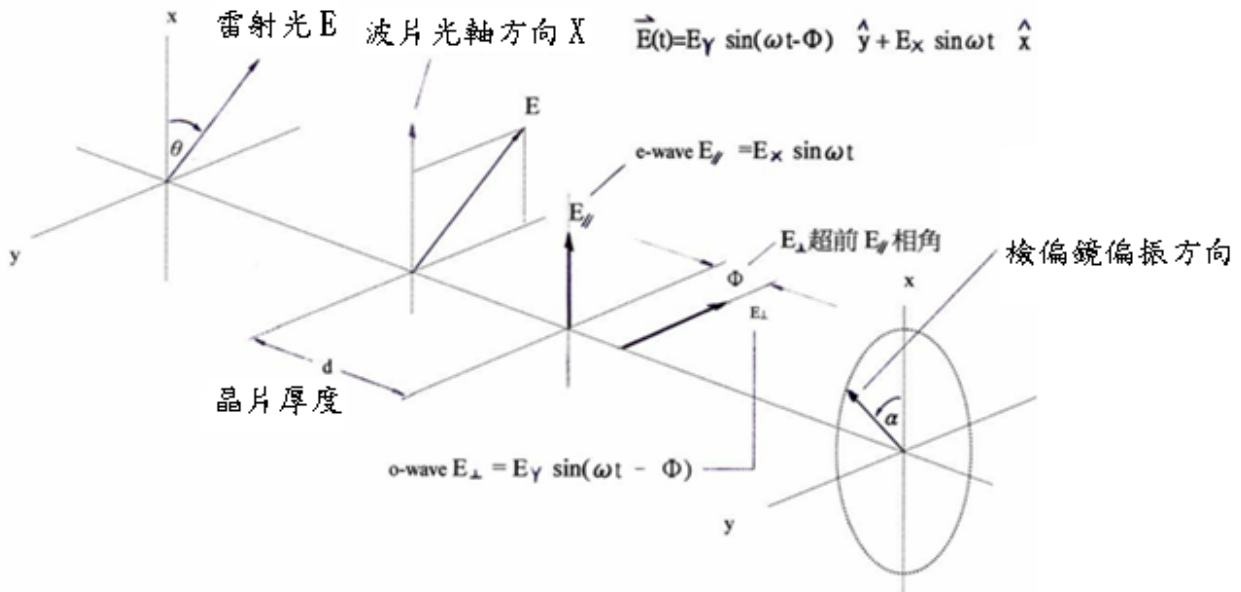
(2) 轉動 $\frac{\lambda}{2}$ 波片使波片外環上的刻痕（波片光軸方向）與桌面垂直，微調其角度使光度計讀值最小（nW 以下）。

(3) 雷射管順時針轉 10 度，再旋轉檢偏鏡使光度計讀值最小，記錄檢偏鏡旋轉的方向與角度。

註：+ 代表順時針方向、- 代表逆時針方向。

(4) 重覆步驟 (3)，至雷射管順時針轉 80 度止，解釋各角度間的關聯與原因。

【實驗數據處理】



圖八 波片實驗電場向量示意圖

1. 由 Malus' s Law 知：線偏極光 [$E(t) = A \sin \omega t$] 通過檢偏鏡，若二者間的夾角為 θ ，則光度計讀值為 $\langle I \rangle = \frac{1}{2} A^2 \cos^2 \theta$ 。

2. 線偏極光通過 $\frac{\lambda}{4}$ 波片時，因光在晶體中快慢軸有不同的速度，將電場 E 分裂成兩部份：

$$E_x(t) = E_{\parallel} \sin \omega t \hat{x} \text{ 及 } E_y(t) = E_{\perp} \sin(\omega t - \varphi) \hat{y} \dots\dots (4)$$

偏振面分別為 x 軸、y 軸，二者間相差為 φ ， $E_{\parallel} = E \cos \theta$ ， $E_{\perp} = E \sin \theta$

3. 晶片的材質和厚度控制相差 φ ，相差 φ 的大小決定線偏極光通過晶體後為何種橢圓偏極光。

4. 實驗使用的晶体為 $\frac{\lambda}{4}$ 波片，故相差 φ 等於 90 度，代入公式 (4) 中得：

$$\vec{E}(t) = E_{\parallel} \sin \omega t \hat{x} - E_{\perp} \cos \omega t \hat{y} \dots\dots (5)$$

5. 公式 (5) 代表一個電場軌跡在標準位置上的橢圓 (參考圖八)，且晶軸方向即為 x 軸。

6. 當檢偏鏡與 x 軸夾角為 α ，由 Malus' s Law 知，通過檢偏鏡後光度計讀值 $I(\alpha)$ 為

$$I(\alpha) = \frac{1}{2} (E_{\parallel} \cos \alpha)^2 + \frac{1}{2} (E_{\perp} \sin \alpha)^2 \dots\dots (6)$$

7. 經由解析幾何對公式 (6) 的複雜換算，可以求得橢圓偏極光在角度 α 上的電場分量

$$E(\alpha) = \frac{E_{\parallel} \cdot E_{\perp}}{\sqrt{E_{\parallel}^2 + E_{\perp}^2 - 2 \cdot I(\alpha)}} \dots\dots (7)$$

$$\text{其中 } E_{\parallel} = \sqrt{I(0^\circ) + I(180^\circ)}, \quad E_{\perp} = \sqrt{I(90^\circ) + I(270^\circ)}$$

8. 電場的橢圓軌跡直角座標方程式為 $\frac{X^2}{E_{\parallel}^2} + \frac{Y^2}{E_{\perp}^2} = 1 \dots\dots (8)$

其中 $E_{\parallel} = E \cdot \cos \theta$ ， $E_{\perp} = E \cdot \sin \theta$ ，橢圓軌跡等同於公式 (5) 一向量參數方程式

9. 將測量值 [公式 (7)] 與理論值 [公式 (8)] 的結果同繪於一張方格紙上，比較其不同並解釋原因。

10. 由石英及記錄的資料，分析實驗中的橢圓偏極光是左旋還是右旋？

【問題】

1. 請解釋單軸晶體(uniaxial crystals)、雙軸晶體(biaxial crystals)、正晶體(positive crystals)、負晶體(negative crystals)、雙折射晶體(birefringent crystals)。
2. 以石英材質的晶體為例，繪圖說明如何製作 $\frac{\lambda}{2}$ 波片和 $\frac{\lambda}{4}$ 波片？
3. 測量橢圓偏振時，在 θ 角下光度計的讀值代表什麼？

【參考資料】

1. 幾何光學，葉玉堂、饒建珍、肖峻編著，郭浩中校訂，台北市，五南圖書出版股份有限公司，2008年12月，CH 4.3、7.6.1-7.6.2。
2. 雷射原理與量測概論，楊國輝、黃宏彥編著，台北市，五南圖書出版股份有限公司，2008年12月，CH 2-5。
3. 光學系統設計進階篇，許阿娟、朱嘉雯、林佳芬、陳志隆編著，fourth version，2002版，第十二章 偏振。
4. Optics, by Eugene Hecht, 4th Edition, Ch 8.1-8.4、8.7。
5. 國立中央大學，普通物理實驗講義，光的偏振性質。
6. 崑山科技大學，物理實驗，線偏振光特性量測實驗。
7. 天主教輔仁大學物理學系，光學實驗講義，偏振實驗。
8. 偏振，國立台北科技大學機械系丁振卿，May 22 2012。

空間濾波

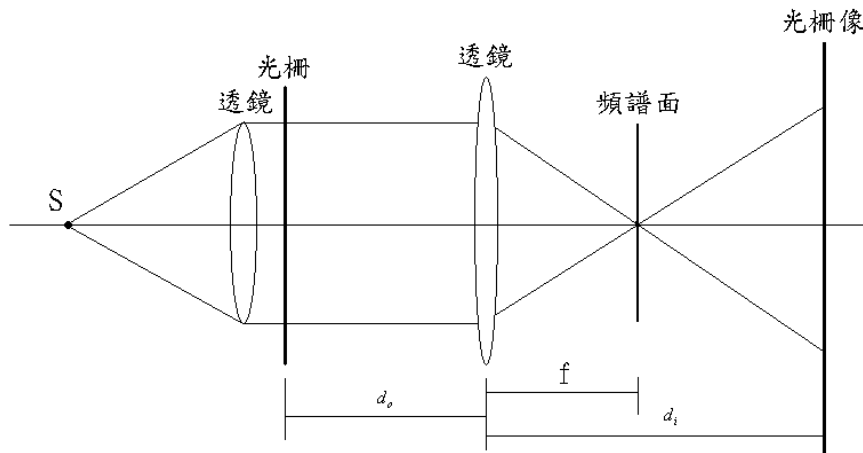
【目的】

1. 認識空間濾波器，並學習光學系統的成像理論。
2. 觀看圖像訊號的成像（十字網格的像），探討並分析「空間頻率」的頻譜分布。
3. 瞭解圖像訊號「空間頻率」的濾除方法與功效。

【原理】

空間濾波 (optical filter) 是在光學系統的空間頻率平面上放置適當的濾波器，去掉或選擇通過某些空間頻率，或改變它們的振幅和相位，使平面物體的像按照要求得到改善。

1873年，阿貝 (Abbe) 提出的二次繞射成像理論為空間濾波奠定了理論基礎，1906年完成的阿貝-波特空間濾波實驗 (Abbe-Porter spatial filter experiment) 應用了空間濾波技術，並使用了二元振幅濾波器。



圖一 阿貝-波特空間濾波實驗原理圖

阿貝-波特空間濾波實驗的原理如圖一所示，物是一個二維矩形光柵，位於透鏡前焦面之前，到透鏡的距離為 d_o ；用垂直入射的平面相干光照明，在透鏡後 d_i 處得到光柵的像。按照阿貝成像理論，可以將成像過程解釋為：相干光照明矩形光柵時，光柵對光波進行第一次繞射，繞射光通過透鏡在透鏡的後焦面上形成光柵的傅立葉頻譜 (Fourier frequency spectrum)，即照明光源的各級繞射像 $I'_{\pm m}$ (光斑陣列)。這一過程也可以解釋為對物進行了一次傅立葉變換 (Fourier transform)，也就是將物函數分解為一系列分立的頻譜分量，後焦面即是物體的頻譜面。至於第二次繞射則是在焦平面和像面之間進行的，照明光源的各級繞射像 $\dots I'_{-2}$ 、 I'_{-1} 、 I'_0 、 I'_{+1} 、 $I'_{+2} \dots$ 在像面上疊加形成干涉條紋，且頻譜面和像面向上的光波場分佈滿足 Fourier 變換的關係。兩次繞射 (兩次 Fourier 變換) 的結果得到了光柵的像。

實驗過程中，當把各種不同形狀的光柵 (如圓環、狹縫和圓形光柵等) 放置在透鏡的後焦平面上時，像平面上就會出現不同形式的像結構。其原因在於不同形狀的光柵允許通過的物體的空間頻譜成分不同，所以得到了二元空間濾波器的作用。

使用二元濾波器的空間濾波技術能夠改變成像系統中像場中的光強分佈。二元振幅濾波器根據實際使用要求可分為下列四種：

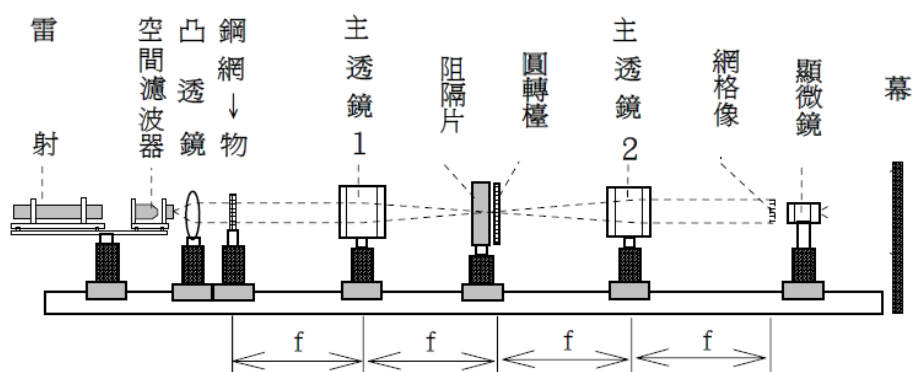
- (1) 低通濾波器 (low-pass filter)：作用是去掉高頻成分，僅使靠近零頻的低頻成分通過，可以用來濾掉高頻雜訊。
- (2) 高通濾波器 (high-pass filter)：作用是濾掉低頻成分，允許高頻成分通過，可用來突出像的邊緣部分，或者實現像的對比度翻轉。
- (3) 帶通濾波器：可以使某些需要的頻譜通過，其餘被濾掉。
- (4) 方向濾波器：做成一定方向的阻擋光柵，用來濾掉不需要的頻譜，以突出圖像的某些特徵。

相位濾波器 (phase filter) 只改變物體頻譜的相位，不改變它的振幅分佈。1935 年澤尼克 (Zernike) 提出的相位顯微鏡就是相位濾波器應用的一個很好的例子。這種方法適合觀察弱相位物體。相位物體只有折射率的不同或厚度的不同，當相干照明光波通過這種物體時，光波的振幅不發生變化，只是相位發生變化，所以光強度分佈與照明光波相同，用平常顯微鏡是無法觀察到的。

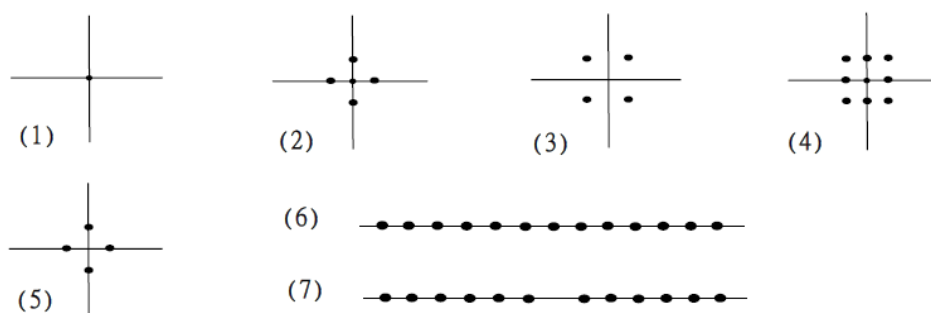
相襯顯微鏡 (phase-contrast microscopy) 的原理是利用相位濾波器將物體的相位變化轉換成光的強弱變化，從而使物體能夠被觀察到。這對於研究生物細胞組織、金相表面、拋光表面以及透明材料的不均勻性等非常有用。

【實驗器材與裝置】

光具座組、He-Ne 雷射(波長=632.8nm)、空間濾波器(20 倍顯微物鏡+孔徑 $10\mu\text{m}$ 微孔)、凸透鏡 ($f=8\text{ cm}$)、極細目鋼網(100 格/cm)、主透鏡(焦點位於鏡後 30.2 cm)、阻隔片(7 片)、圓轉檯、顯微鏡(影像放大)、捲尺、數位相機架



圖二 空間濾波器實驗裝置圖



圖三 阻隔片圖

【注意事項】

1. 因為時間的關係，雷射及空間濾波器的準直調整於實驗開始前已調整妥當，請勿隨意調整。違者該實驗成績零分計算，並請自行調整。
2. 微孔是極敏感的高價器材，嚴禁碰觸、擦拭、吹氣。
3. 主透鏡‘厚重’，調整其高低時，務必鎖緊，避免其緩慢下滑而影響成像的觀察。

【實驗步驟】

1. 實驗器材的安裝

- (1) 將雷射及其安裝架置於光具座最左側，調整光束與光具座平行，在幕上標示光束的位置。
- (2) 利用器材的規格資料，大略算出各元件的位置，先安放第二個主透鏡，使光點打在主透鏡鏡心上，由主透鏡反射回來的各光點，要全部重合在雷射輸出孔上，通過主透鏡後，光束的中心點，仍落在標示點上。
- (3) 利用上述方法放入第一個主透鏡後再裝上凸透鏡。
- (4) 在空間濾波器上裝好顯微物鏡，仔細調整空間濾波器架上各旋鈕（不可再動雷射），使光束中心點仍落在標示點上，且由顯微物鏡反射回來的各光點，要全部重合在雷射輸出孔上。
※經過上述的調整，才可確認各元件光軸精確共軸，以提高成像品質。

2. 空間濾波器的調整

- (1) 顯微物鏡後退遠離微孔架，裝上微孔，在凸透鏡上覆蓋一張白紙。
- (2) 調整微孔位置，使雷射光通過微孔落在白紙上。
- (3) 緩慢的前移顯微物鏡，同時精確修正微孔位置，使雷射光在白紙上的像保持同心環紋。
- (4) 繼續上述調整，直到所有同心環紋消失，紙上只剩下非常純淨的第零級亮點為止。
- (5) 阻隔片架放在正確位置上，調整凸透鏡前後位置，在阻隔片架上成精確焦點像（產生平行光），移開阻隔片，非常仔細的調整空間濾波器和凸透鏡，使光束中心點仍落在標示點上，且光束品質不變。

※這一部份的調整是非常困難的，熟手幾十分鐘左右，生手數小時也很正常。

※助教會作雷射的準直校正，並讓雷射光通過空間濾波器後，有非常純淨的第零級亮點。

- (6) 依照圖二所示，放置儀器，並微調其位置，使原光路不變。

※實驗前上述的調整均已完成，步驟 3. 只可更動阻隔片架、顯微鏡架、數位相機架。

3. 觀察各阻隔板的濾波效果

- (1) 網格放置在主透鏡 1 前焦點上，顯微鏡架放在主透鏡 2 後 30.2 cm 處，仔細調整其焦距，由目鏡看使呈現清晰的網格放大像。

註：請確認網格放大像正好對準顯微物鏡的鏡頭中央，以免觀察到錯誤影像。

- (2) 放上阻隔片，網格的繞射花紋會落在阻隔片的正中央上，分別更換 7 種不同的阻隔片（不要再動顯微鏡的焦距），只允許網格的繞射花紋通過特定的部份，觀察並記錄各阻隔片所對應的圖像。

註：利用數位相機直接拍攝是不錯的方法（有數位相機架），但對於相機的操作（手動調焦）及規格（最近拍攝距離要小於 10 cm）要事先弄清楚，並攜帶 AC 電源（電池電力絕對不夠用），且在拍攝過程中不可改變 Zoom 的設定，否則相片的尺寸無參考價值。

【分析】

1. 比較阻隔片（6）與（7）有何不同，即中央第零階繞射光點對影像有何影響。
2. 比較阻隔片（2）與（5）有何不同，即中央第零階繞射光點對影像有何影響。
3. 比較阻隔片（3）與（5）有何不同。
4. 比較阻隔片（2）與（3）的疊加效果，是如何產生阻隔片（4）的成像。
5. 仔細觀察阻隔片（1）的成像（並不是全部空白的），到底網格像還剩下什麼，並解釋產生的原因。

【問題】

1. 請解釋四焦距空間濾波器中的物體平面（object planes）、轉換平面（transform planes）、成像平面（image planes）。
2. 空間頻率（spatial frequency）與時間頻率（temporal frequency）有何差別？
3. 請列舉一個應用空間濾波器的實例。

【參考資料】

1. 現代光學，劉繼芳編著，張勝雄、梁財春編修，台北縣中和市，新文京開發出版股份有限公司，2006年9月，CH 5.1。
2. Optics, by Eugene Hecht, 4th Edition, Ch 11、Ch 13.2-13.2.3。

干 涉

【目的】

1. 認識光的波動性與干涉現象
2. 觀察雙狹縫的干涉現象，測量雷射光波長。

【原理】

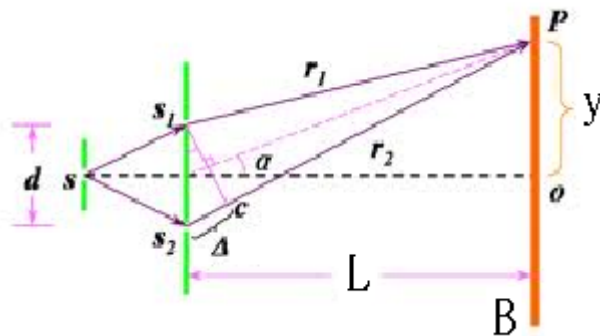
光在相遇區域內形成穩定的明暗交替或彩色條紋的現象稱為光的干涉 (Interference) 現象。光的干涉現象是光波疊加後能量再分配的結果。光干涉的理論基礎是波的疊加原理 (The Superposition Principle)。並不是任意的光波疊加都能產生干涉現象，能夠產生干涉現象的光波必須滿足一定的條件，即兩列光波疊加產生干涉的必要條件，也稱為相干條件為：①兩光波的振動方向相同；②兩光波的頻率相同；③兩光波的相位差固定 (同調)。

利用普通光源獲得干涉光線束的方法可分為兩大類：一類是分波前法，另一類是分振幅法。所謂分波前干涉 (wave-front splitting inference) 是由同一波前分出兩部分或多部分，然後再使這些部分的子波疊加產生干涉。雙縫干涉就是一種典型的分波前干涉。所謂分振幅干涉 (amplitude splitting inference) 是來自同一光源的光波經薄膜的上表面和下表面反射，將光波的振幅分成兩部分或多部分，再將這些波束疊加產生干涉。薄膜干涉、麥克森干涉儀和多光束干涉儀均利用了分振幅干涉。

1. 楊氏雙狹縫干涉

利用分波前產生雙光束干涉的典型實驗是楊氏雙狹縫實驗。1801年，楊 (Young) 的雙狹縫實驗首次證明了光可以發生干涉，由此肯定了光的波動性。

楊氏雙狹縫干涉裝置原理圖如圖一所示，一強光源照明狹縫 S，經 S 的光照明兩平行的狹縫 S_1 和 S_2 ，雙狹縫 S_1 和 S_2 的間距為 d ，觀察屏幕 B 與兩狹縫的距離為 L ，且 $d \ll L$ ，雙狹縫 S_1 和 S_2 是從狹縫 S 發出的同一波前上分割出來的很小的兩部分，作為兩干涉光線源，他們發出的次波在觀察屏幕上疊加，形成干涉條紋。



圖一 楊氏雙狹縫干涉實驗裝置原理圖

狹縫 S 和雙狹縫 S_1 、 S_2 都很窄，均可視為線光源。在觀察屏幕上 y 很小的範圍內的 P 點，從線光源 S 發出的光波經 SS_1P 和 SS_2P 兩條不同路徑的兩束光的光程差為

$$\Delta = r_2 - r_1, \text{ 其中 } r_1 = \sqrt{\left(y - \frac{d}{2}\right)^2 + L^2}, r_2 = \sqrt{\left(y + \frac{d}{2}\right)^2 + L^2}$$

$$\text{由上兩式得：} r_2^2 - r_1^2 = 2yd, \Delta = r_2 - r_1 = \frac{2yd}{r_2 + r_1}$$

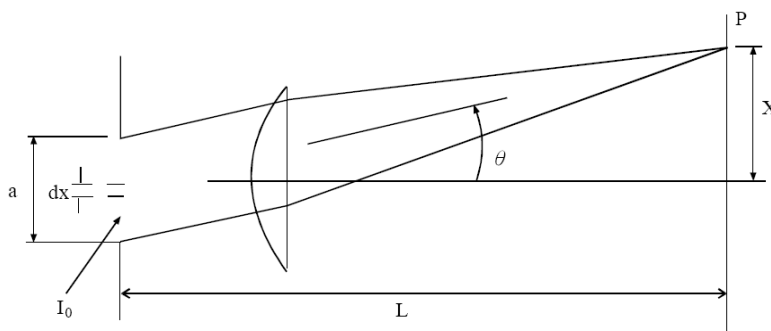
當屏幕的距離夠遠，使 $L \gg d$ ，且觀察範圍夠小，使 $L \gg y$ 時，有 $r_2 + r_1 \sim 2L$ ，故 $\Delta \sim \frac{yd}{L}$ ，相應的相位差為 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{yd}{L}$

① $\phi = \pm 2m\pi$ ($m=0, 1, 2, \dots$) 時，光強極大，得亮紋中心位置為 $y = \pm m \frac{L\lambda}{d}$ ，其中， m 為亮紋級次， $m=0$ 的亮紋稱為零級亮紋或中央亮紋。

② $\phi = \pm (2m+1)\pi$ ($m=0, 1, 2, \dots$) 時，光強極小，得暗紋中心位置為 $y = \pm (m + \frac{1}{2}) \frac{L\lambda}{d}$ ，其中， m 為暗紋級次。

兩相鄰亮紋（或暗紋）間的距離為 $D = (m+1) \frac{L\lambda}{d} - m \frac{L\lambda}{d} = \frac{L\lambda}{d}$ ， $\lambda = \frac{dD}{L} \dots\dots (1)$

由於雙狹縫是由兩個寬度為 a 的單狹縫所組成，故雙狹縫干涉必同時伴隨有單狹縫之繞射效果，實際觀察其干涉圖像，亦為二者之混合。



圖二 單狹縫繞射原理圖

相應的相位差為 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi xa}{\lambda L}$

① $\phi = 0$ 時，相長干涉，為亮紋。

② $\phi = \pm (2n+1)\pi$ 時， $n=1, 2, 3, \dots$ ，相長干涉，為亮紋，亮紋中心位置為 $x = \pm (n + \frac{1}{2}) \frac{L\lambda}{a}$ 。

③ $\phi = \pm 2n\pi$ 時， $n=1, 2, 3, \dots$ ，相消干涉，為暗紋，暗紋中心位置為 $x = \pm n \frac{L\lambda}{a}$ 。

第一階繞射暗紋的位置為 $x = \pm \frac{L\lambda}{a}$ ，兩者距離 $W = \frac{L\lambda}{a} - (-\frac{L\lambda}{a}) = 2 \frac{L\lambda}{a}$ ， $a = \frac{2L\lambda}{W} (2)$

【實驗器材】

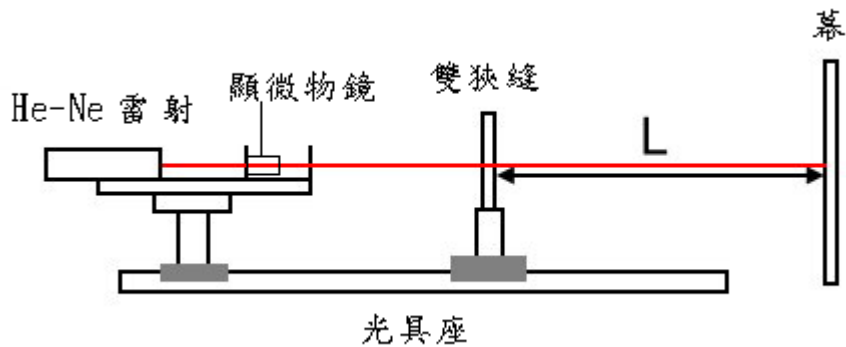
He-Ne 雷射(波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$)、顯微物鏡(x10)、雙狹縫($d=0.24\text{mm}$ 、 $a=0.045\text{mm}$)、光具座、游標尺、幕、捲尺、30 cm直尺

【注意事項】

1. 雷射和顯微物鏡下方的微調螺絲已經調整妥當，請勿隨意調整。違者該實驗成績零分計算，並請自行調整。

【實驗步驟】

1. 楊氏雙狹縫干涉



圖八 楊氏雙狹縫干涉實驗裝置圖

- (1) 如圖八所示，調整雙狹縫到幕的距離 L 大約 1.2 公尺，以捲尺測量並記錄距離 L 。
- (2) 調整雙狹縫的高度與左右位置，使雷射光點打在雙狹縫的中點上，並在幕上產生均勻對稱的干涉紋。
- (3) 在幕上放置一張白紙，畫下干涉紋和繞射紋的位置，以游標尺讀取任意二條干涉暗紋間的平均距離 D 和第一階繞射暗紋的距離 W 。
- (4) 將數據代入公式 (1)、(2)，算出雷射光波長 λ 和單狹縫寬度 a ，並與標準值比較，算出百分誤差。

【問題】

1. 何謂同調(coherence)? 時間同調(temporal coherence)與空間同調(spatial coherence)的定義。
2. 雙狹縫干涉花紋中的繞射現象在那裡? 能否排除? 如何排除?

【參考資料】

1. 幾何光學，葉玉堂、饒建珍、肖峻編著，郭浩中校訂，台北市，五南圖書出版股份有限公司，2008年12月，CH 5.1、5.2.1、5.6.1。
2. Optics, by Eugene Hecht, 4th Edition, Ch 9.1、9.2、9.3、10.2.2。

數位光學

【目的】

1. 認識液晶空間光調變器的工作原理。
2. 使用液晶空間光調變器控制光場，進行光學實驗。

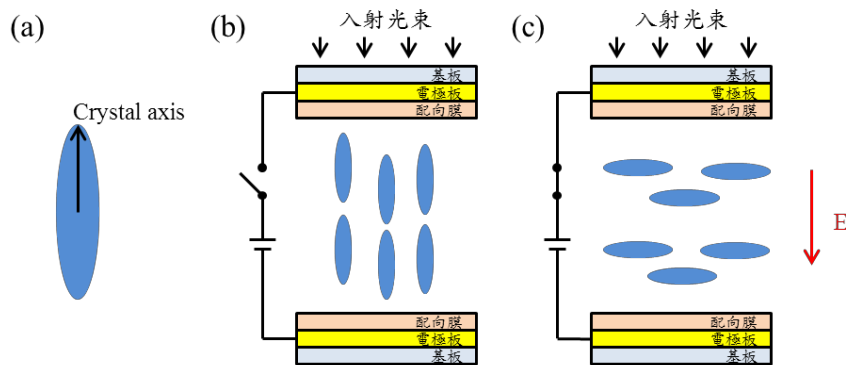
【原理】

一、液晶空間光調變器

液晶於十九世紀中葉被發現於神經纖維，其雙折射的特性使得我們可以控制光束的偏振狀態，開啟了液晶光學的新里程碑。

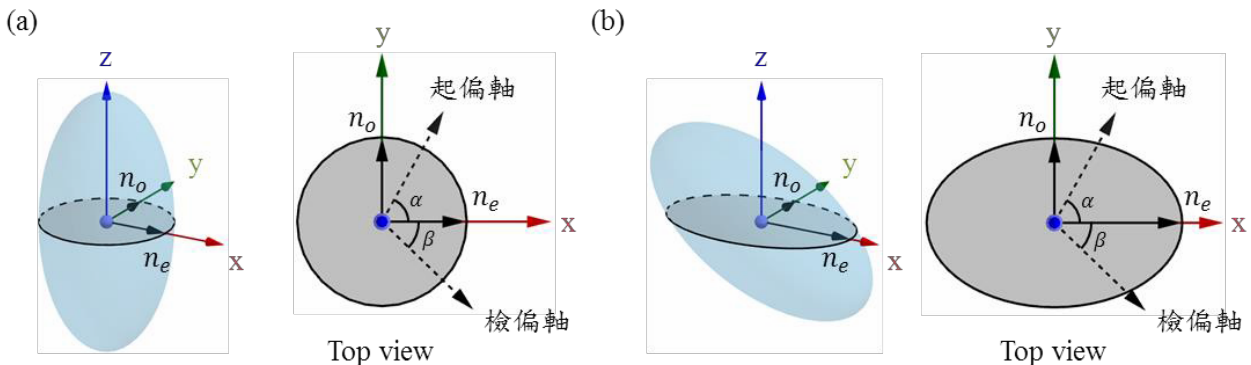
一般情況下，雷射光束分布於空間中是不均勻的，最簡單的分布為高斯分布。若我們能控制光束的強度分布，就能夠做到許多實驗。利用液晶的雙折射特性，可以很輕易的達到光強度控制。舉例來說，生活周遭常見的液晶顯示器即是控制了光束於空間上的分布狀況，使得能夠藉由明亮的變化來顯示文字在螢幕上。二十世紀開始，液晶空間光調變器 (Liquid-Crystal Spatial Light Modulator, 簡稱LC-SLM) 陸續推出，而空間光調變器 (Spatial Light Modulator, 簡稱SLM) 也成為實驗上常見的光調變元件。

液晶的類型有許多種，本實驗以垂直排列型 (Vertical Alignment, 簡稱VA) 做原理介紹，對其他類型的液晶有興趣的同學可自行尋找資料。



圖一、(a)液晶分子示意圖。(b)未加電場時，液晶分子排列情形。
(c)外加電場時，液晶分子排列情形。

VA型用的是負型液晶，此類型的液晶在無外加電場的情況下，(圖一b) 液晶分子受到上下配向膜的交互作用力和液晶分子彼此的交互作用力，液晶分子最後將會平行入射光束的前進方向排列，此時入射光束前進方向與液晶分子光軸平行，因此入射的光束通過液晶時，其偏振態將不被影響。而當此類型的液晶在受到外加電場作用時 (圖一c) 液晶分子光軸向垂直光束行進方向偏轉，此時液晶分子會與外加電場呈垂直排列。因此，當於液晶外加電場下，入射光束通過液晶時，將感受到不同方向上有不同的折射率，因而被改變偏振態。



圖二、以單軸晶體為例，液晶分子受電場而偏轉，造成 n_e 軸折射率變化示意圖。

如圖二，若光朝+z方向傳播，起偏鏡與x軸夾 α 角、檢偏鏡與x軸夾 β 角。通過起偏器的電場可表示為：

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \cos \alpha \\ E \sin \alpha \end{pmatrix}$$

當光束經過液晶分子， n_e 軸與 n_o 軸相位差 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} |n_e - n_o| d$ ，液晶盒的Jones Matrices轉換矩陣表示為：

$$L_{\text{retard}}(\delta) = \begin{pmatrix} \exp(i\delta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中d兩倍於液晶層厚度，因為市售SLM多為反射式，光束通過兩次液晶層。

最後通過一個與x軸夾 β 角的檢偏鏡，則最後出射電場則表示為：

$$\begin{pmatrix} E_{x,\text{exit}} \\ E_{y,\text{exit}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \beta & \cos \beta \sin \beta \\ \cos \beta \sin \beta & \sin^2 \beta \end{pmatrix} L_{\text{retard}}(\delta) \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

經計算後可以得到 $E_{\text{exit}} = E \cdot [\cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \exp(i\delta) + \sin \alpha \cdot \sin \beta] \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}$ 。

根據偏振片設定的不同，SLM可以有不同的效果：

(一) 振幅調變器 ($\alpha = 45^\circ, \beta = -45^\circ$)

此時 $I_{\text{exit}} = I_0 \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}$ 。當相位差滿足 $\{\delta = (2m + 1)\pi, m \in \mathbf{N}\}$ ，光束將可無耗損地通過檢偏器，此時得到最大光強；當相位差滿足 $\{\delta = 2m\pi, m \in \mathbf{N}\}$ ，光束無法通過檢偏器，此時得到最小光強。液晶螢幕藉由畫面上不同的灰階值，調整外加的偏壓，控制液晶的偏轉，進而達到振幅調變的效果。

(二) 相位調變器 ($\alpha = \beta = 0$)

此時 $E_{\text{exit}} = E \cdot \exp(i\delta)$ 。根據輸入畫面不同的灰階值，可以使相位差有不同的改變，以達到相位調變的效果。

二、數位光學

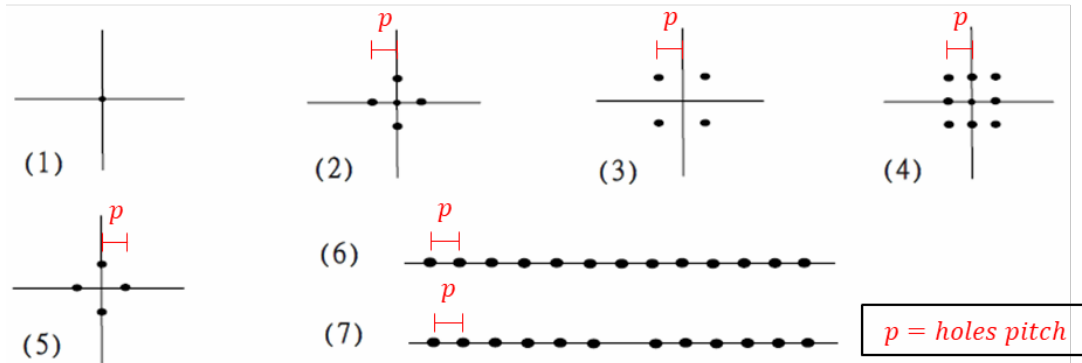
液晶空間光調變器的每個像素都有獨立的調變能力，可以藉由調整每個像素上的液晶分子，達成對光場的調控。最常見的用法如同常見的液晶顯示器，便是藉由操控光場的振幅，使使用者可以看到顯示器上的圖案和影像。空間光調變器其強大的光場控制能力，使其成為光學研究的一大利器。

本實驗將藉由載入振幅型數位全像圖來展示數位光學的實際應用。

【方法】

1. 空間濾波實驗

本實驗將以SLM振幅調變器做為空間濾波元件使用，藉由將振幅調變器放置在頻譜面，來達成空間濾波。頻譜面上之阻隔圖如三所示。



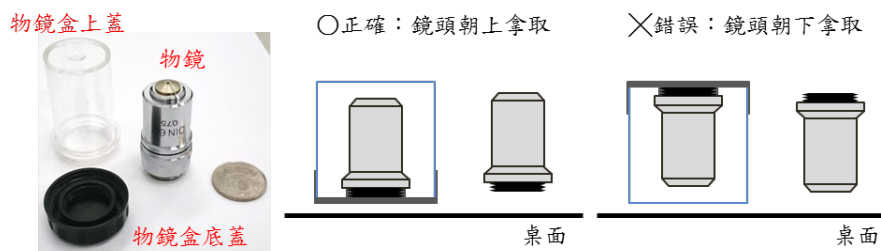
圖三、頻譜阻隔圖

【實驗器材與裝置】

He-Ne Laser、平面鏡、光圈、空間濾波器（10倍顯微物鏡+孔徑 $10\mu\text{m}$ 微孔）、 $f=120\text{mm}$ 透鏡（直徑2吋）、 $f=100\text{mm}$ 透鏡（直徑2吋）、極細目鋼網（100格/cm）、極化分光鏡(PBS)、SLM、中性密度濾光鏡（NEUTRAL DENSITY FILTER，固定於濾光鏡夾具上）、感光耦合元件（CHARGE-COUPLED DEVICE）、電腦、指高器、屏幕、六角板手、游標尺

【注意事項】

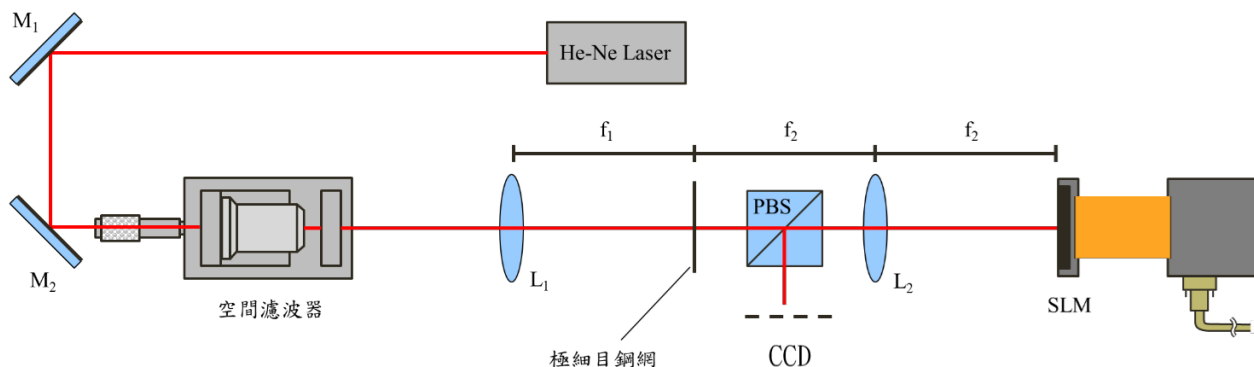
- 調整光路時，請勿嬉鬧遊玩，若雷射不小心射入眼中，可能造成不適甚至失明。架設光路時，所有人員務必站立，不可坐下架設光路，且光路務必與桌面平行。當光路架設完畢且無須再次調整時，可坐下進行實驗記錄，但仍需小心眼睛勿與光路同高。
- 顯微物鏡為精密儀器，拿取與使用物鏡時，鏡頭務必朝上拿取（圖四），避免灰塵從另一側進入物鏡中。



圖四 顯微鏡物鏡取用示意圖

- 使用空間濾波器時，切記不要使物鏡撞擊到微孔。另外，若長時間不使用時，請拆除顯微物鏡並放置於物鏡盒當中。若短時間須拆除放置，鏡頭朝上並利用拭淨紙覆蓋鏡頭。
- CCD為高價格的精密儀器，任何的灰塵沾附將造成成像出現光斑，長時間不使用，請將鏡頭蓋起來。另外，CCD可探測微弱光線，使用時切記關閉電燈，並且適當使用濾波片。長時間使CCD處於過曝情況下，可能會造成CCD的損壞。
- 微孔是極敏成的高價器材，嚴禁碰觸、擦拭、吹氣。
- SLM為高價格的精密儀器（約10萬元），請勿拉扯其排線和觸碰螢幕。

【實驗步驟】



圖五、空間濾波實驗架設圖

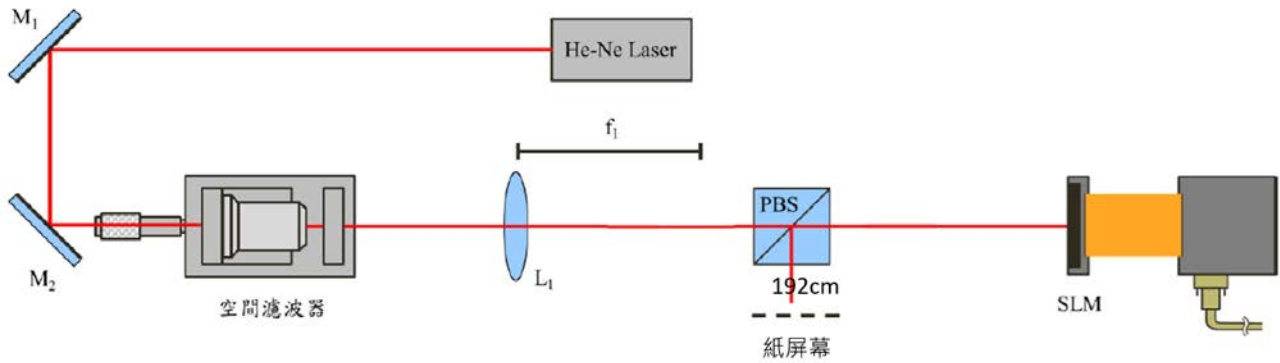
1. 安裝實驗器材

- (1) 調整雷射安裝架的旋鈕，使雷射光相與光學桌面約略平行。
- (2) 安裝反射鏡 M_1 與 M_2 ，使光路完全平行於光學桌面。(光路準直)
- (3) 安裝空間濾波器，使雷射光呈現乾淨清晰的高斯光束。(空間濾波)
- (4) 安裝透鏡 L_1 ，使光束擴束後無明顯發散。(擴束平行光束)
- (5) 根據透鏡 L_1 和 L_2 的規格，將SLM設置在適當的位置，並使其產生的反射光盡量沿原光路返回，但不可返回至He-Ne Laser中。雷射光盡量落在SLM中心處為佳。
- (6) 安裝透鏡 L_2 ，使雷射光聚焦在SLM中心處。
- (7) 安裝極細目鋼網於 L_2 前方焦距位置。藉由觀察落於SLM平面的繞射光點，調整極細目鋼網的位置，使其具有最小光點，即完成極細目鋼網之架設。
- (8) 根據SLM的規格資料，安裝極化分光鏡(Polarization Beam Splitter, PBS)，使其P波方向與SLM調變軸夾 45° 或 135° 。

2. 空間濾波實驗

- (1) 啟動SLM，並按照附錄A的教學，使用程式。
- (2) 選擇振幅調變模式，並載入全亮畫面。觀察PBS後方極細目鋼網之成像。如果成像難以觀測，可以加裝成像透鏡或是使用數位相機拍攝。
註：將CCD放於PBS後方的成像處，透過CCD觀察成像
- (3) 載入阻隔圖1，將孔徑diameter設定為100pixels，並觀察PBS後方成像。調整載入圖片之座標，使成像有較高的亮度。
註1：此步驟目的在於確認最大亮點在SLM上的位置，因為光束只是目視落於SLM中央，仍可能有些許偏離。因此，藉由調整SLM上圖案的位置來彌補該偏離誤差。
註2：該步驟須細心調整座標直至出現正確圖形為止，避免更換阻隔圖後，成像沒有變化差異。
註3：將孔徑由100pixels調小，重複調整座標，使得光束盡可能落於SLM的正中央。
- (4) 載入阻隔圖1~7，將孔洞pitch設定為98(122.5)pixels，觀察並記錄各阻隔圖所對應的成像。

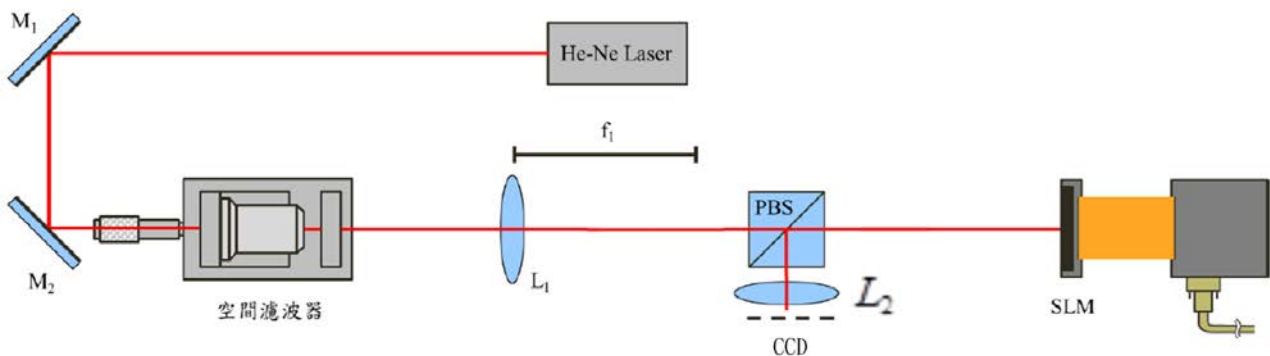
3. 狹縫干涉實驗



圖六、狹縫干涉實驗架設圖

- (1) 移除鋼網、透鏡 L_2 和 CCD，使擴束平行光束直接打在 SLM 上。
- (2) 載入雙狹縫圖，將狹縫 pitch 設定為 30 (37.5) pixels，width 設定為 1 pixel，觀察 PBS 後方位置的干涉紋。
- (3) 畫下干涉紋和繞射紋的位置，以游標尺讀取任意二條干涉暗紋間的平均距離 D 和第一階繞射暗紋的距離 W ；以捲尺量測屏幕到 SLM 之距離 L 。
- (4) 將數據代入干涉的公式 (1)、(2)，算出雷射光波長 λ 和單狹縫寬度 a ，並與標準值比較，算出百分誤差。

4. 數位光學實驗(全像術)



圖七、數位光學實驗架設圖

- (1) 按照附錄 B 的教學，使用振幅型數位全像程式。
- (2) 載入範例全像圖 (Holography Demo)，觀察 PBS 後方距離 SLM 位置 X 處的光場。
- (3) 將紙屏移到距離 SLM 位置 X 處，觀察現在看到的光場。
- (4) 試著載入任意一張圖片 (Holography maker)，並用程式生成其全像圖，再次觀察實驗結果。

【問題】

附錄A：實驗支援程式的使用(Matlab)

一、準備工作

1. 確認Exp7_support_program已經正確安裝於電腦中。預設安裝目錄在C:\Program Files\NCKU\Exp7_support_program的資料夾中。
2. 將電腦畫面比例調整為100%。以windows 11為例，於桌面右鍵選擇「顯示設定」找到「縮放與配置」下的「比例」將其調整為100%。

建議修改為100%，圖形較不容易因為windows縮放比例而失真。

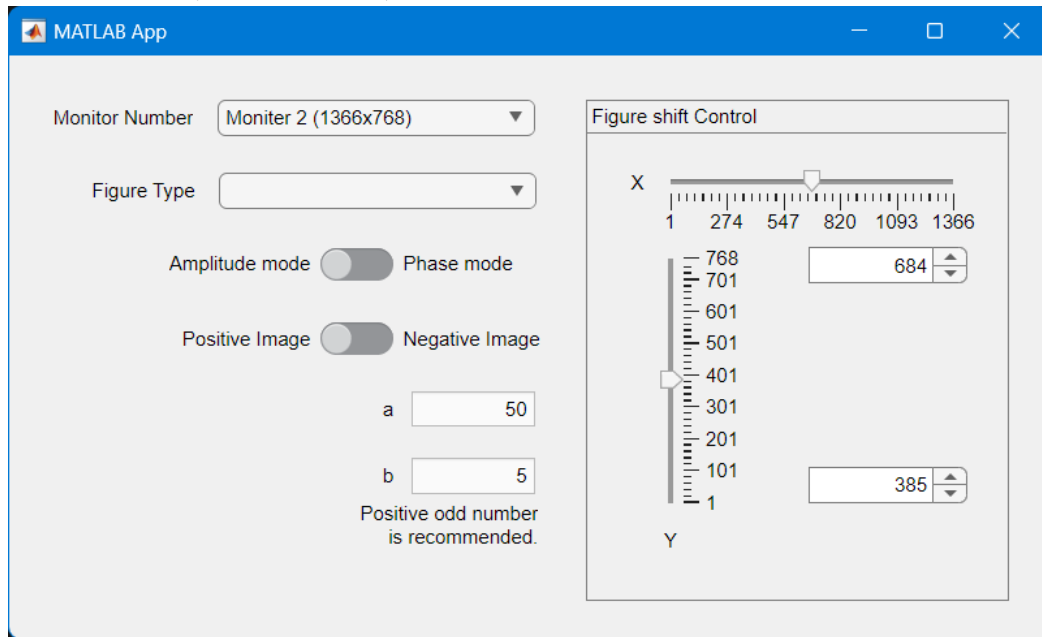


3. 確保SLM與電腦相連結，並將畫面延伸至SLM。以windows 11為例，於桌面右鍵選擇「顯示設定」找到「多部顯示器」將畫面顯示方式改為延伸。或是使用快捷鍵win + P來切換成延伸畫面。



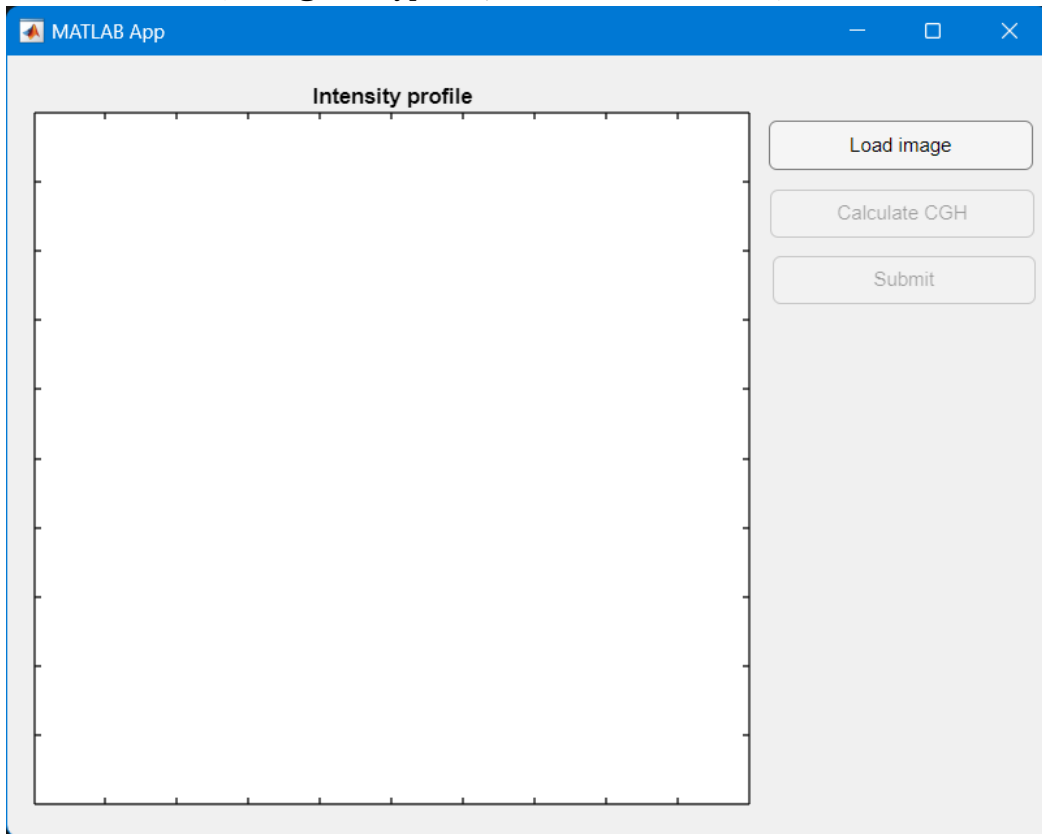
二、程式使用方式

1. 開啟程式後，預設情況下會在延伸畫面上顯示黑底的圖片。程式介面如下圖所示。



功能區塊	用途
Monitor Number	用於選擇圖片顯示的畫面 注意：圖片並非置頂顯示，要注意是否有其他應用程式佔用畫面。
Figure Type	選擇投影的圖片 Block 1~7、單狹縫、雙狹縫和展示用的全像片
Amplitude / Phase mode	對應SLM的使用方式，切換振幅或是相位調製模式。 本實驗中使用的是Amplitude mode，不須進行切換。
Positive / Negative image	正片模式或是負片模式
a / Pitch	對應到Pitch 根據選擇的Figure Type不同，會有不同的文字顯示。
b / diameter/ width	對應到孔洞的直徑或是狹縫的寬度 根據選擇的Figure Type不同，會有不同的文字顯示。 建議設定為正奇數
Figure shift Control	圖片的位移設定，用於調整圖片位置使用。 會根據Monitor Number的切換而重新置中

2. Hologram maker是附屬於Figure Type選單中的應用程式。選擇以後會跳出以下視窗



可以載入任意的圖片，按下Calculate CGH來產生Fraunhofer CGH，再按下Submit，將CGH 傳回程式中使用。

附錄B：SLM 規格

一、JD9554

Specifications	JD9554+
Display Type	Reflective LCoS
Resolution	1920×1080
Active Area Diagonal	0.55"
Active Area	12.5mm×7.1mm
Pixel Pitch	6.4 μ m
Fill Factor (Aperture Ratio)	$\geq 93\%$
Numbers of Input Level	8-bit(256 grey scale levels)
Input frame rate	60Hz
Retardation	$\geq 2\pi$ @ 633 nm
Response Time	<40ms
Input Signal I/F	HDMI 1.4
Power Supply	AC INPUT : 100-240V 50-60Hz DC OUT : +12V/2A

二、0.7" WUXGA SLM

Specifications	WUXGA SLM
Display Type	Reflective LCoS
Resolution	1920×1200
Active Area Diagonal	0.717"
Active Area	15.42mm×9.66mm
Pixel Pitch	8.0 μ m
Fill Factor (Aperture Ratio)	92%
Retardation	$\geq 2\pi$ @ 633 nm
Response Time	112ms