

成功大學物理系近代光學實驗課程
2016年 第一版

液晶空間光調變器 實驗手冊

國立成功大學物理系

張國誌 編著

朱淑君教授 校訂

液晶空間光調變器

一、實驗目的

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，我們可以很輕易的達到光強度控制。舉例來說，我們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，使得我們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。

本實驗目的在於讓學生了解液晶工作原理，以及 SLM 的控制與使用。

- (1) 理解 SLM 的工作原理。
- (2) 學會測量 SLM 振幅調變特性，並藉其調變光強度分布。
- (3) 學會測量 SLM 相位調變特性，並藉其調變相位分布。
- (4) 利用本實驗所學之知識，進行更深入的光學應用。

二、實驗原理

在開始使用 SLM 之前，我們要先了解液晶的特性。液晶為介於固體與液體的物質，擁有如同固體的晶體結構，以及液體的流動性。其中最重要的是其雙折射率特性，藉由外加電場扭轉液晶分子的光軸方向，可以改變入射光束在快軸與慢軸的相位差，藉以調整入射光束的偏振態以及偏振角度。

液晶的類型有許多種，本實驗用的 SLM 是 JDC 公司推出的 JD9554，其為垂直排列型（Vertical Alignment 簡稱 VA）液晶。由於 VA 型液晶其黑白對比度較早期的扭轉向列型（Twisted Nematic 簡稱 TN）液晶優，因此成為市場的主流。本實驗主要探討 VA 型的工作模式，對其他類型的液晶有興趣的同學可自行尋找資料。

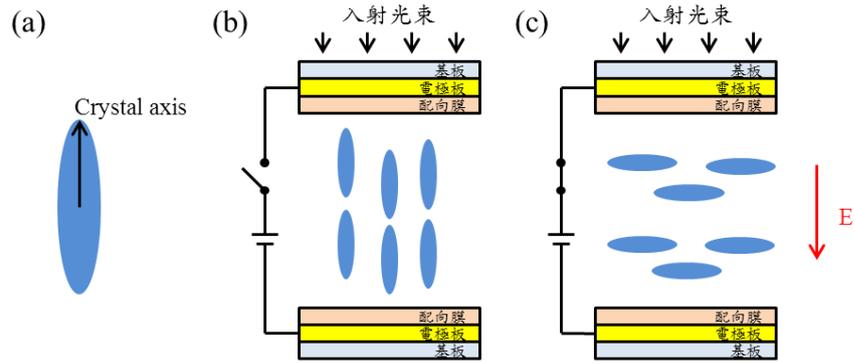


圖 1、(a)液晶分子示意圖。(b)未加電場時，液晶分子排列情形。(c)外加電場時，液晶分子排列情形。

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 1b），液晶分子受到上下配向膜的交互作用力，以及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 1c），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。

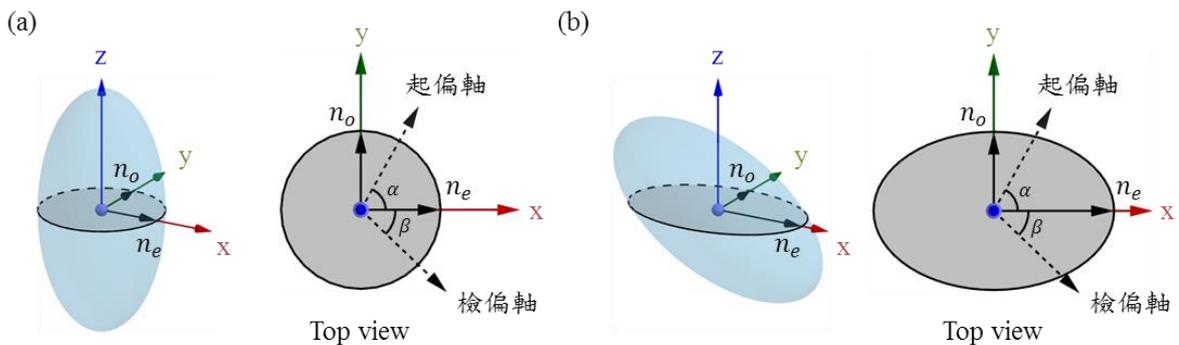


圖 2、以單軸晶體為例，液晶分子受電場而偏轉，造成 n_e 軸折射率變化示意圖。

如圖 2，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：

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

其中 d 兩倍於液晶層厚度，因為 JD9554 為反射式 SLM，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：

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

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

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 $I_{exit} = I_0 \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}$ 。當相位差滿足 $\{\delta = (2m + 1)\pi, m \in \mathbb{N}\}$ ，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 $\{\delta = 2m\pi, m \in \mathbb{N}\}$ ，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 $E_{exit} = E \cdot \exp(i\delta)$ 。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。

三、實驗器材

- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| ✓ He-Ne Laserx1 | ✓ 四分之一波片 |
| ✓ 2 吋平面鏡 Mirror (M)x3 | Quarter Wave Plate (QWP)x1 |
| ✓ 光圈 Iris (I)x2 | ✓ 偏振鏡 Polarizer (P)x2 |
| ✓ 空間濾波器 Spatial Filter (SF) ·x1 | ✓ 偏振鏡架x2 |
| ✓ 10X 顯微鏡物鏡x1 | ✓ 2 吋楔形分光鏡 |
| ✓ 25 μ m 針孔x1 | Wedge Beam Splitter (BS)x1 |
| ✓ f=150mm Lens (1 吋)x2 | ✓ SLMx1 |
| ✓ 可調式透鏡架x2 | ✓ CCDx1 |
| ✓ 電腦x2 | ✓ 光功率計 Power meterx1 |
| ✓ 中性濾光鏡 (8 片)1 組 | ✓ 支撐座 (Holder)x17 |

- | | |
|-----------------|----------------------------|
| ✓ 濾光鏡鏡架x1 | ✓ 支撐柱 (Post)x17 |
| ✓ 光學鏡架x3 | ✓ 底板基座+壓板 |
| ✓ 分光鏡鏡架x1 | Bottom+Base clampx17 |

【注意事項】

1. 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，且盡量不要坐在 SLM 正對面。
2. 顯微鏡物鏡為精密儀器，拿取與使用物鏡時，鏡頭務必朝上拿取 (圖 3)，避免灰塵從另一側進入物鏡中。
3. 使用空間濾波器時，切記不要使物鏡撞擊到針孔。另外，若長時間不使用時，請拆除顯微鏡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。
4. 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。另外，CCD 可探測微弱光線，使用時切記關閉電燈，並且適當使用濾光鏡。長時間使 CCD 處於過曝情況下可能會造成 CCD 的損壞。
5. 不可將光束聚焦在光功率計上，這可能造成單位面積下的能量超過光功率計之負荷，燒毀功率計的感應元件，且小面積的量測較易出現雜訊。使用時應使光線均勻分布在整個感測器上。
6. 雙濾光鏡鏡架為鏡片放置型鏡架，請注意不要觸碰到架上的濾光鏡，避免造成損壞。
7. 安放光學元件時請勿鎖太緊，避免元件龜裂或粉碎。

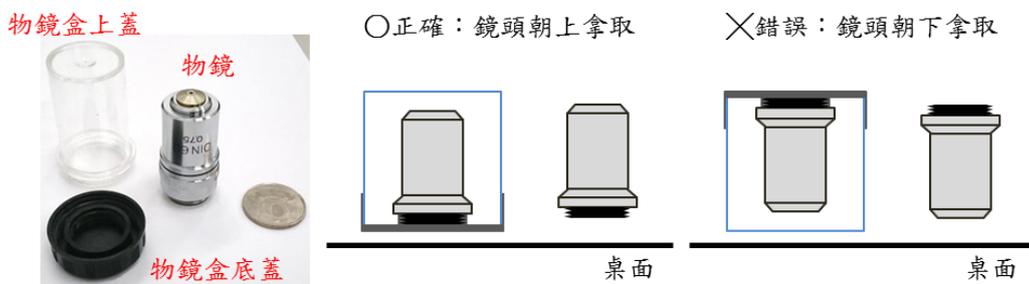


圖 3、顯微鏡物鏡取用示意圖。

四、實驗

(一) 繞射光強測量

1. 按照圖 4 架設好光路。在架設 QWP 與 P_1 時，要先校正光線通過 QWP 時是圓偏振態，此時無論如何旋轉 P_1 皆量得相同光強度。另外預留一些空間在 P_1 與 BS 之間，讓 P_2 及光功率計可同時放置在此空間內。
2. 確認 SLM 已開機，並輸入 Multilevel blazed grating 圖形至 SLM 上。
3. 旋轉 P_1 角度，並用光功率計量測零級光出射光強，找出光強具有最小值的角度。
4. 旋轉 P_1 角度 5 度，並用光功率計量測出射光強，將數據紀錄在實驗記錄簿。
5. 重複步驟 4，直到 P_1 角度變化 270 度。紀錄並將光強對 P_1 角度作圖。
6. 將 P_1 旋轉至光強具最小值的角度，作為後續實驗的初始架設。

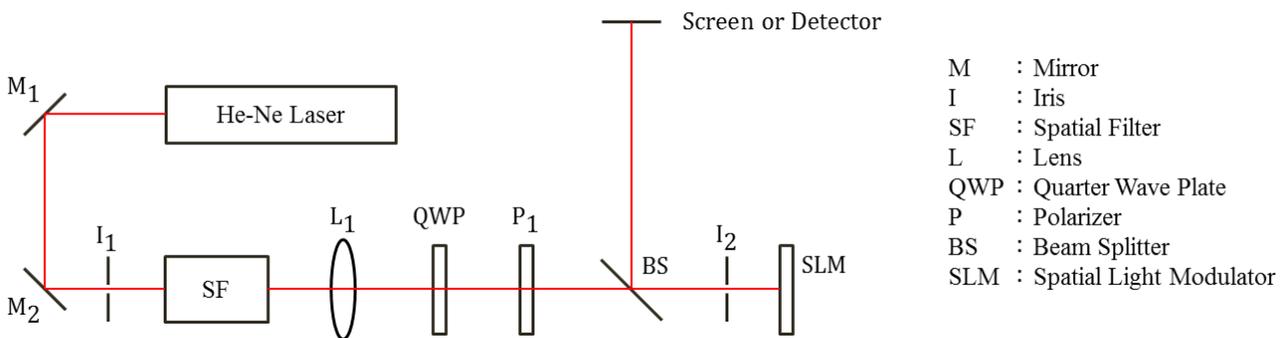


圖 4、實驗(一)光路架設圖。

(二) 振幅調變器：NB、NW 顯示模式與灰階調變測量

原理：

一般情況下，空間光調變器都具有兩種顯示模式，Normal Black (NB) 模式與 Normal White (NW) 模式。依據起偏器與檢偏器夾角的不同，可以在兩種模式下切換。

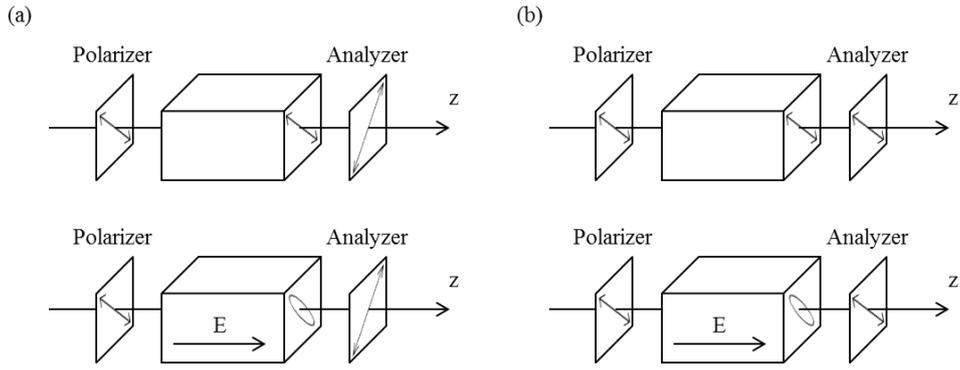


圖 5、(a) NB mode 工作原理示意圖。(b) NW mode 工作原理示意圖。

如圖 5，未加外加電場時，入射光偏振方向不受液晶調變，若檢偏器與起偏器夾 90 度，則此時出射光強為最弱。當開始施加電場，入射光偏振態被改變，有分量可以通過檢偏器，我們稱此模式為 NB 模式。反之，當起偏器與檢偏器夾 0 度角，則稱之為 NW 模式。如圖 6，NB 與 NW 是兩個互補的模式，即在 NB 模式下字體為「黑底白字」，在 NW 模式下則變為「白底黑字」。

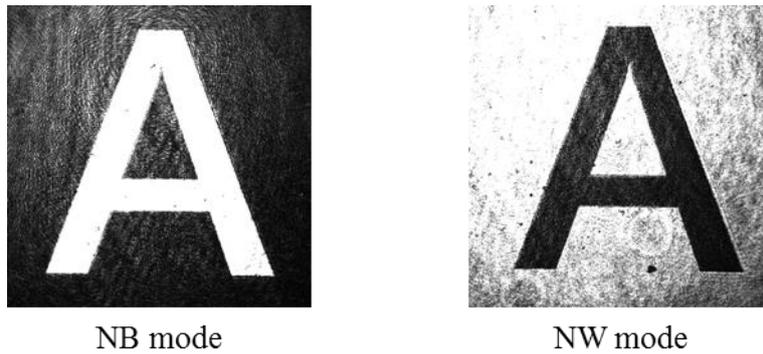


圖 6、在 SLM 上面輸入相同圖形的情況下，NB 與 NW 模式的差異。

實驗步驟：

1. 將 P_2 與光功率計架設在圖 4 中 P_1 與 BS 之間的預留空間中。
2. 旋轉 P_2 角度，當光功率計有最小值時，記錄下此時 P_2 角度（務必記得光是從哪一面入射 P_2 ，否則此步驟將失去意義。），此時 P_1 與 P_2 夾 90 度角。
3. 同時將 P_1 與 P_2 往正方向旋轉 45 度角。

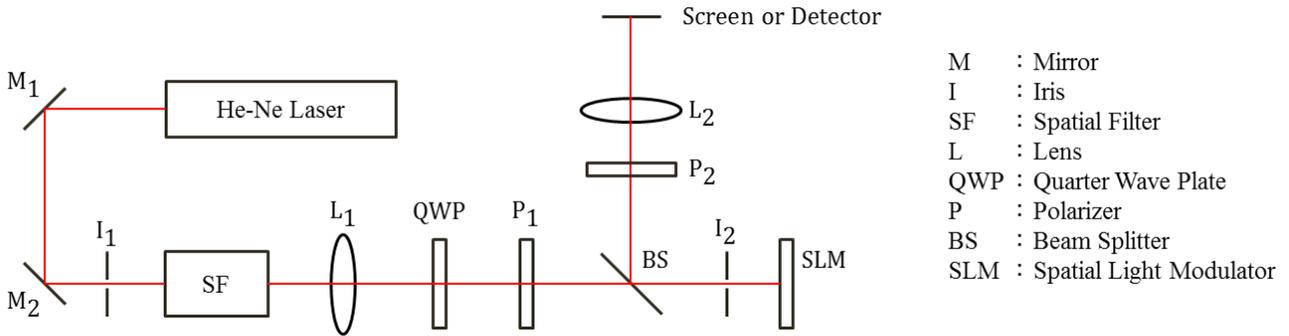


圖 7、實驗(二)光路架設圖。

4. 將 P_2 與光功率計移除，並將實驗架設成如圖 7。在架設 L_2 的時候，記得 SLM 與屏幕分別是物平面與像平面的關係。另外，使用 CCD 的同學請把成像大小控制在 CCD 的收光範圍之內。若 CCD 畫面曝光嚴重，請在 L_2 與 CCD 之間加入適當的濾光鏡。
〔小技巧〕可以在 SLM 上面輸入任意圖形，觀察其在屏幕或 CCD 上面的成像，當成像物體輪廓最清晰時，即達到最佳成像。
5. 於 SLM 上面輸入全黑圖形（灰階值為 0），將灰階值與光功率計讀數記錄在實驗紀錄簿中。
6. 將投影的灰階值+15，重複步驟 4 直到灰階值為 255。紀錄並將光強對灰階值作圖。
7. 將 P_2 旋轉 90 度，重複上述實驗，比較前後光強對灰階值的不同。
8. 如果行有餘力，請根據實驗結果設計圖形或動畫，製作單色光投影應用。此步驟不須紀錄實驗結果。

〔小提示〕PPT 內建動畫效果，可利用 PPT 內建功能快速製作簡易動畫。

(三) 相位調變器：利用 Michelson 干涉儀測量相位調變與灰階值的關係

1. 將 P_1 調整回實驗(一)測量的光強具最小值的角度。至於 P_2 可拆可不拆。

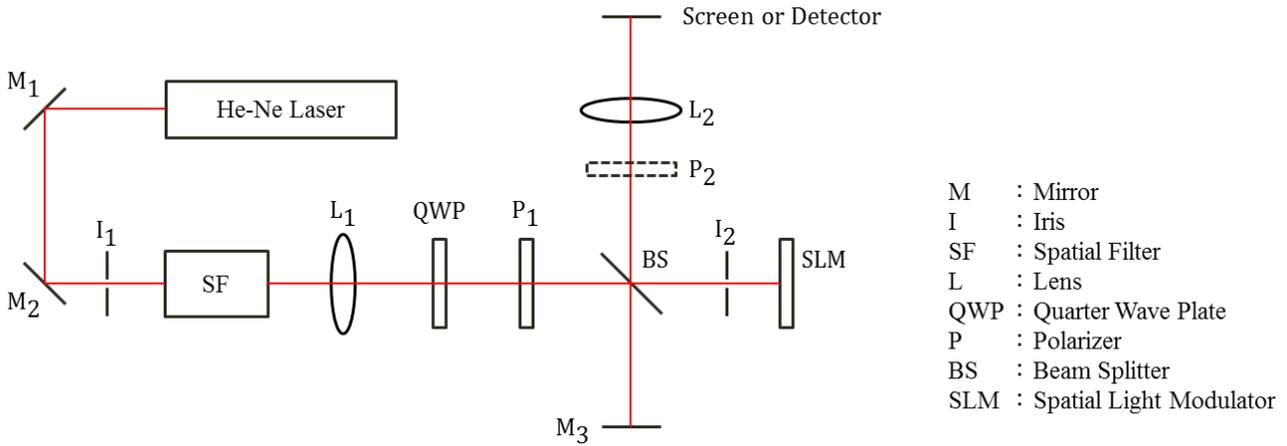


圖 8、實驗(三)光路架設圖。

- 將實驗架設修改成如圖 8。注意，此處 M_3 與 SLM 距離 BS 距離要一致，並確認在 SLM 投影上全黑圖形的情況下，其成像與 M_3 反射光具有干涉條紋。注意，干涉條紋不可太過緊密，且盡量使條紋水平（垂直）於 CCD。

〔小技巧〕如果覺得干涉條紋的調整很沒有手感的話，可以先移除 CCD，並在雷射光經過 L_2 的聚焦點位置處設置屏幕。觀察 SLM 的反射聚焦點以及 M_3 的反射聚焦點位置是否在一起，當調整 M_3 使兩點重疊之後，再將屏幕拉回成像位置，此時會得到很寬的干涉條紋。接著再微調 M_3 使條紋方向與寬度達到合適的範圍。

〔小提示〕當 M_3 與 SLM 距離不一致時，很容易出現同心圓環的干涉條紋，會造成無論如何調整 M_3 都無法使條紋趨近直線。另外，此實驗不需要調成完美的直線干涉條紋，只需接近直線即可。

- 於 SLM 上面輸入全黑的圖形，並用 CCD 紀錄其影像。
- 重複步驟 3，但輸入圖形改成左黑右白（上黑下白）的圖形，白色部分的灰階值以 15 為單位遞增，直到灰階值到 255。

〔小提示〕輸入圖形（上下或左右）與干涉條紋的關係如圖 9。

- 藉由影像推測不同灰階值對應的相位變化。以相位變化為縱軸，灰階值回橫軸作圖。

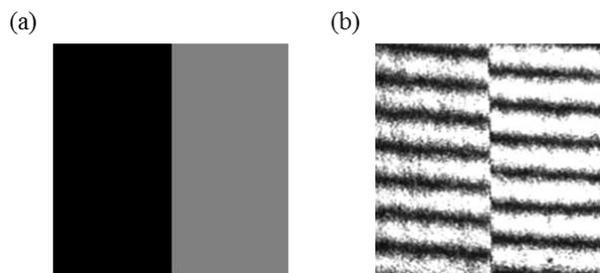


圖 9、(a)投影在 SLM 上面的圖形。(b)對應到(a)圖所需的條紋方向。

五、問題與討論

1. 【理論】當 SLM 使用 NW mode 時，出射光強的數學公式為何？請寫下推導或論證。
2. 【理論】你認為一般市售液晶螢幕使用的是 NB mode 還是 NW mode？Why？
3. 【實驗】根據你的實驗結果，液晶螢幕是 NB mode 還是 NW mode？此結果與你的預測相符嗎？若不相符，你覺得原因是什麼？
4. 【實驗】本實驗使用楔形分光鏡目的為何？
5. 【理論】為何實驗(一)旋轉起偏器會造成繞射光強產生變化？當零級光強最弱時對應到的是快軸 (n_o 軸) 還是慢軸 (n_e 軸)？
6. 【實驗】根據你實驗(二)(三)的結果，你覺得一般市售液晶螢幕相位對上灰階值變化是線性的還是非線性的？