

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

利用九十度扭轉式液晶聚合物網絡
之偏振無關液晶相位調制器

A Polarization-independent Liquid Crystal Phase Modulation
Using Polymer-Network Liquid Crystals in a 90 Degree Twisted
Cell

研究生：林威志

指導教授：林怡欣 助理教授

中華民國九十八年七月

利用九十度扭轉式液晶聚合物網絡

之偏振無關液晶相位調制器

A Polarization-independent Liquid Crystal Phase Modulation Using
Polymer-Network Liquid Crystals in a 90 Degree Twisted Cell

研究生：林威志

Student : Wei-Chih Lin

指導教授：林怡欣 助理教授

Advisor : Prof. Yi-Hsin Lin

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Photonics and Institute of Electro-Optical Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Electrical-Optical Engineering

July 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

利用九十度扭轉式液晶聚合物網絡 之偏振無關液晶相位調制器

研究生：林威志

指導教授：林怡欣 助理教授

國立交通大學光電工程學系暨研究所

摘要

本文提出一種偏振無關液晶相位調制器，主要是利用九十度扭轉式液晶聚合物網絡(簡稱 T-PNLC)。其機制結合兩種偏振無關液晶相位調制器，第一種為剩餘相位型液晶相位調制器，其液晶分子有一個相同的傾角，且指向矢隨機分佈在 T-PNLC 液晶盒的中間層。另一種為雙層型液晶相位調製器，靠近 T-PNLC 的上下基板，液晶指向矢方向為相互垂直。這種混合型的 T-PNLC，其電控相位移大小介於剩餘相位型與雙層型之間，且操作之前不需額外偏壓。藉由 SEM 觀察，我們得知 T-PNLC 的 domain 夠大($\sim 10\mu\text{m}$)，一顆聚合物又夠小($\sim 0.2\mu\text{m}$)，所以為低散射的相位調制器。另外，T-PNLC 的偏振相關性與光聚合時外加電壓、光聚合時溫度、液晶盒厚度、及光入射角相關。實驗中，當液晶盒厚度為 $7\mu\text{m}$ ，其相位調制器在施加 30 V_{rms} 電壓下可達到 0.28π 之相位變化，反應時間約 1.5ms 。最後我們將 T-PNLC 做光學分析，估計出 T-PNLC 中雙層型液晶分子的平均預傾角 ($50\sim 70\text{degree}$)、剩餘相位型液晶分子的平均預傾角 ($73\sim 83\text{ degree}$) 及其他參數。此偏振無關之相位調制器未來可應用於電控焦距之微液晶透鏡陣列或雷射指向。

A Polarization-independent Liquid Crystal Phase Modulation Using Polymer-Network Liquid Crystals in a 90 Degree Twisted Cell

Student: Wei-Chih Lin

Advisor: Prof. Yi-Hsin Lin

Department of Photonics
and Institute of Electro-Optical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

A polarization independent liquid crystal (LC) phase modulation using polymer-network liquid crystal in a 90 degree twisted cell (T-PNLC) is demonstrated. Two polarization-independent mechanisms are adopted. The first one is the phase modulation from the middle layer LC directors with random but same tilt orientations and can be classified as the residual phase type. The other one is the phase modulation from the directors near the two substrates with nearly orthogonal orientations and can be classified as the double-layered type. T-PNLC is a scattering-free phase modulator because of large domain size ($\sim 10 \mu\text{m}$) and small polymer grain ($\sim 0.2 \mu\text{m}$) observed by SEM. No bias voltage is needed when we operate T-PNLC. The phase modulation range is between the residual phase type and the double-layered type. In addition, the polarization dependency of T-PNLC depends on the effects of the curing voltage, the curing temperature, the cell gap, and off-angle of an incident light. In the experiments, the maximum phase shift of T-PNLC is around 0.28π at $30 V_{\text{rms}}$ with the cell gap as $7\mu\text{m}$. The response time is around 1.5 msec. The average pretilt angle of liquid crystal in double-layered region ($50\sim 70$ degree), residual phase region ($73\sim 83$ degree), and other parameters can be estimated base on our optical analysis of T-PNLC. The potential applications of the polarization independent T-PNLC are electrically tunable-focus LC micro-lens arrays and laser beam steering.

致謝

在這兩年研究生涯當中，首先，要感謝的是我的指導教授林怡欣老師與師丈吳勇勳博士，不管在做人處事方面或學習態度上，都能夠給予我許多寶貴的意見；並且在論文的研究上，辛勤的指導，釐清我許多的觀念，給了我更多的思考方向，在此表達我最真誠的敬意與感謝。再來，我要感謝王淑霞老師，老師常在百忙之中，抽空來關心我們，以過來人的身份，告訴我們許許多多受用不盡的人生道理與經驗。也要感謝口試委員陳瓊華老師、徐旭寬博士與楊秋蓮博士的批評與指教，使得本論文更加完善。

另外，感謝林弘峻學長、楊智名學長，鄒雨時學長，他們的專業和認真的工作精神，還有讓人不得不佩服的領袖風範，是我們做學弟最值得學習的。

還要感謝液晶實驗室的同學：羅春祥同學、洪青樺同學與李炯寬同學，在互相的激勵下，總算渡過了這段日以繼夜、不眠不休地寫論文的快樂時光，也感謝眾多的學弟妹們：陳俊霖、陳宏山、朱庭玉、陳明璿、江宗翰、黃鈺智、吳俊宏、賴致維、林辰歲、黃俊歲、朱為麟、倪詩雅、蘇歆茹、陳文柔，在必要時給予我適時的幫助與鼓勵，也因為你們，使我的研究生生活更加多采多姿。其中特別要感謝雨時學長與陳明璿學弟，在寫論文期間，幫了我很大的忙，使我的論文能夠順利完成。

最後感謝我的家人以及朱庭玉的表姐小青給我支持與鼓勵，使我能順利的完成碩士學位。

在此感謝所有幫助過我的人，謝謝你們，僅以此論文與你們分享。

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	IX
第 1 章 緒論.....	1
2.1 液晶簡介.....	3
2.1.1 液晶彈性連續體介紹.....	3
2.1.2 液晶之物性.....	3
2.3 偏振無關液晶相位調制器之簡介.....	6
2.4 研究動機.....	10
第 3 章 操作原理和理論.....	11
3.1 T-PNLC操作原理.....	11
3.2 理論探討.....	12
3.2.1 雙層型效應.....	12
3.2.2 剩餘相位型效應.....	14
3.2.3 混合型液晶相位調制器.....	16
第 4 章 實驗方法與量測.....	18
4.1 液晶盒樣品製作.....	18
4.2 量測架構.....	21
第 5 章 實驗結果.....	25
5.1 光聚合時外加電壓之效應.....	25
5.1.1 不同外加電壓光聚合之T-PNLC的電光效應.....	28

5.1.2 不同外加電壓光聚合之T-PNLC與相位調制大小的關係	31
5.1.3 不同外加電壓光聚合之T-PNLC與偏振相關性的關係	33
5.2 光聚合時溫度之效應	34
5.2.1 不同溫度光聚合之T-PNLC的電光特性	34
5.2.2 不同溫度光聚合之T-PNLC與相位調制大小的關係	36
5.2.3 不同溫度光聚合之T-PNLC與偏振相關性的關係	37
5.3 改變液晶盒厚度之效應	38
5.3.1 不同液晶盒厚度之T-PNLC的電光特性	38
5.3.2 不同液晶盒厚度之T-PNLC與相位調制大小的關係	39
5.4 斜向入射之相位移與偏振相關性	40
5.3.1 斜向入射於雙層構造液晶相位調制器	41
5.3.2 斜向入射於T-PNLC	43
第 6 章 實驗結果討論	45
6.1 結果整理	45
6.2 T-PNLC光學分析與模擬	47
6.3 結果分析	53
第 7 章 結果與展望	56
參考文獻	58
附錄A	60

圖目錄

第 2 章

圖 2-1 液晶的三種形變	3
圖 2-2 將行經液晶分子的入射光拆解為e-ray與o-ray	4
圖 2-3 液晶相位調制器的示意圖	4
圖 2-4 平行配向液晶盒結構示意圖	5
圖 2-5 液晶聚合物網絡結構示意圖	5
圖 2-6 形變液晶聚合物網絡結構示意圖	6
圖 2-7 雙層式液晶凝膠結構示意圖	7
圖 2-8 雙層式液晶結構示意圖	7
圖 2-9 聚合物穩固膽固醇液晶結構示意圖	8
圖 2-10 聚合物分散式液晶結構示意圖	8
圖 2-11 液晶凝膠示意圖	9
圖 2-12 偏振無關液晶相位調制的種類	10

第 3 章

圖 3-1 T-PNLC的操作機制	11
圖 3-2 雙層型結構示意圖	12
圖 3-3 剩餘相位型液晶相位調制器操作原理	14
圖 3-4 T-PNLC結構示意圖型	16

第 4 章

圖 4-1 T-PNLC樣品製作流程	20
圖 4-2 量測裝置(穿透率對電壓關係)	22
圖 4-3 量測裝置(反應時間量測)	22
圖 4-4 量測裝置(相位移量測)	23

圖 4-5 麥克詹達干涉儀量測T-PNLC觀察到的干涉條紋	23
-------------------------------------	----

第 5 章

圖 5-1 偏振無關液晶相位調制器於cross polarizer下觀察時為暗態	25
圖 5-2 光聚合前與光聚合後T-PNLC之燈箱照片	26
圖 5-3 顯微鏡下以cross polarizer觀察T-PNLC	27
圖 5-4 相同三片樣品之T-PNLC的穿透率對電壓關係	28
圖 5-5 由SEM觀察到光聚合電壓 $4V_{rms}$ 之T-PNLC	29
圖 5-6 不同外加電壓光聚合之T-PNLC的穿透率對電壓關係	29
圖 5-7 不同外加電壓光聚合之T-PNLC的反應時間	30
圖 5-8 相同三片光聚合電壓製作之T-PNLC的相位移對電壓關係	31
圖 5-9 不同外加電壓光聚合之T-PNLC與相位調制大小的關係	32
圖 5-10 不同外加電壓光聚合之T-PNLC的偏振相關性	33
圖 5-11 不同溫度光聚合之T-PNLC的電光特性	34
圖 5-12 光聚合溫度 45°C 條件製作之T-PNLC的SEM圖	35
圖 5-13 不同溫度光聚合之T-PNLC的反應時間	35
圖 5-14 不同溫度光聚合之T-PNLC與相位調制大小的關係	36
圖 5-15 不同溫度光聚合之T-PNLC的偏振相關性	37
圖 5-16 不同液晶盒厚度之T-PNLC的電光特性	38
圖 5-17 不同液晶盒厚度之T-PNLC的反應時間	39
圖 5-18 不同液晶盒厚度之T-PNLC與相位調制大小的關係	39
圖 5-19 不同液晶盒厚度之T-PNLC的偏振相關性	40

圖 5-20 雙層構造液晶相位調制器結構	41
圖 5-21 非偏振光在各入射角的相位移-電壓圖(雙層型相位調制器)	42
圖 5-22 偏振光在各電壓的相位移-偏振方向圖(雙層型相位調制器)	42
圖 5-23 非偏振光在各入射角的相位移-電壓圖(T-PNLC)	43
圖 5-24 偏振光在各電壓的相位移-偏振方向圖(T-PNLC) ...	44
圖 5-25 當 $V=30V_{rms}$ ，偏振光在各入射角的相位移-偏振方向圖	44

第 6 章

圖 6-1 正負角斜向入射的TM光入射於不施加電壓之T-PNLC	47
圖 6-2 正負角斜向入射的TM光入射於施加高電壓之T-PNLC	49
圖 6-3 正負角斜向入射的TE光入射於不施加電壓之T-PNLC	51
圖 6-4 正負角斜向入射的TE光入射於施加高電壓之T-PNLC	52
圖 6-5 模擬計算光聚合電壓 $2.5V_{rms}$ 製作之T-PNLC的各項參數	53
圖 6-6 模擬計算光聚合電壓 $4V_{rms}$ 製作之T-PNLC的各項參數	54

表目錄

第 4 章

表 4-1 液晶E7 之參數表.....	18
表 4-2 儀器列表.....	21

第 6 章

表 6-1 不同光聚合電壓對各項參數影響之整理.....	45
表 6-2 不同光聚合時溫度對各項參數影響之整理.....	46
表 6-3 不同液晶盒厚度對各項參數影響之整理.....	46



第 1 章 緒論

液晶的發現始於西元 1888 年，奧地利的植物學家 Friedrich Reinitzer 研究膽固醇苯甲酸酯的化合物時，發現這種化合物加熱時具有兩個熔點的奇特現象，在這兩個熔點之間，其物質狀態介於固態物質與一般透明的液態物質之間，類似膠狀的混濁液體。翌年 1889 年，德國的物理學家 Otto Lehmann 利用偏光顯微鏡觀察這種物質加熱後的狀態，發現此物質呈白色混濁，具有著異方性晶體(anisotropic crystal)對光線特有的雙折射性(birefringence)現象。經過數年的探討與研究，科學家們發現此混濁膠狀物是一種介於固態與液態間的新相態，稱為液晶態。時至今日，液晶材料除了可應用於顯示器來調變光強度，利用液晶來單純調變光相位，更能廣泛的應用在各種光電領域，因此是最近重要的研究題材。

以液晶來做相位調制器有許多優點，例如重量輕且可電控方式改變液晶排列，所以能取代傳統透鏡使光學元件更加輕薄[1,2]，或取代傳統光柵可做到電控繞射效率(diffraction efficiency)[3,4]、甚至在空間相位調制(spatial light modulation)方面，還能應用在雷射指向(beam steering)[5]上。

目前液晶相位調制器可分為需要額外添加偏振片與不需偏振片，需要偏振片的液晶相位調制器有平行配向液晶盒(homogenous cell)、聚合物網絡液晶盒(polymer network liquid crystal)[6]或切形變聚合物網

絡液晶盒(sheared polymer network liquid crystal)[7,8]，此類的液晶相位調制器由於相位調制為偏振相關，需偏振片使入射光為偏振光才可達到相位調制，所以光效率低。而不需偏振片的液晶相位調制器主要有雙層型(double layered type)[9] 與剩餘相位型(residual phase type)[9]，雙層型液晶相位調制相位調制量大，但有不需製作且需花費兩片液晶盒的缺點，相較之下，剩餘相位型液晶相位調制雖然製作較為簡單，但相位調制量小且操作電壓高，因此做到與偏振光方向無關(polarizer-independent)、低操作電壓的液晶相位調制器是其中主要的課題。

本論文中，我們提出一種偏振無關液晶相位調制器---九十度扭轉式液晶聚合物網絡(T-PNLC)，其機制結合雙層型與剩餘相位型兩種偏振無關液晶相位調制器，解決剩餘相位型相位調制量小及雙層型不易製作的問題。實驗中，當液晶盒厚度為 $7\mu\text{m}$ ，其相位調制器在施加 30 V_{rms} 電壓下可達到 0.28π 之相位變化，反應時間約 1.5ms 。其電控相位移大小介於剩餘相位型與雙層型之間，另外操作 T-PNLC 之前不需額外偏壓。

本論文的目的是在於研究一種新的不需偏振片之液晶相位調制器(T-PNLC)的電光特性與相位調制。論文第 2 章先對液晶及本章提及的幾種液晶相位調制器做簡單的介紹，然後進一步說明研究的動機。第 3 章為 T-PNLC 的操作機制及理論探討，第 4 章介紹樣品的製作流程與量測架構。第 5 章為實驗結果：探討 T-PNLC 的相位調制大小、偏振相關性與光聚合時外加電壓、光聚合時溫度、液晶盒厚度、及光入射角的相關性，接著第 6 章為實驗結果的整理、分析與討論，最後為結論與展望。

第 2 章 動機

2.1 液晶簡介

2.1.1 液晶彈性連續體介紹[10]

向列型液晶在外加電場或磁場的作用下，會產生形變。此分子排列受外力而變形的狀態，可視為受應變力的彈性連續體，且形變可用指向矢 n 來描述。向列型液晶(Nematic Liquid Crystal)的形變依Frank的定義可分為三種：展曲(Splay)，扭曲(Twist)和彎曲(Bend)，如圖2-1所示。

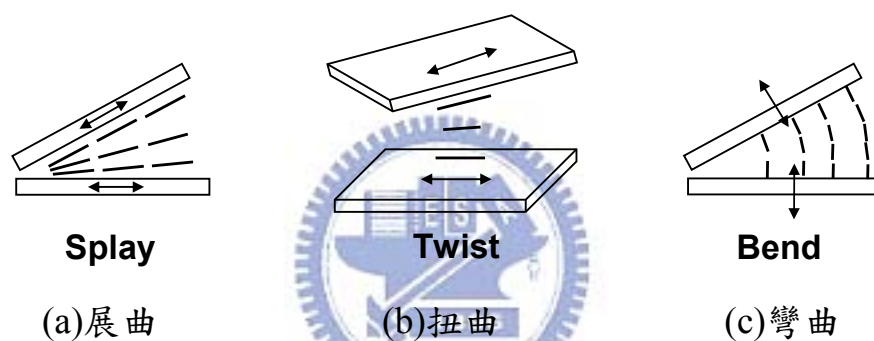


圖 2-1 液晶的三種形變

2.1.2 液晶之物性[11, 12]

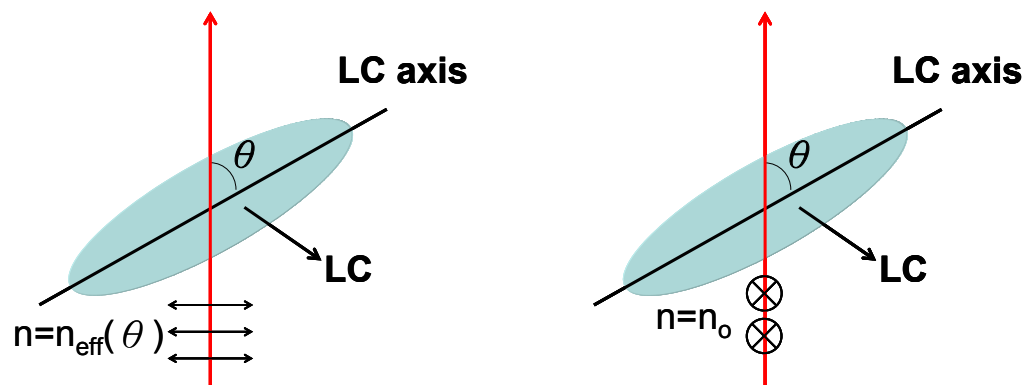
由於液晶為一種具有雙折射性質的單軸晶體，所以光經過液晶會因為液晶指向矢的方向不同，而感受不同的折射率，如圖 2-2(a)，當液晶分子與入射光偏振方向在同一入射平面上，我們稱這道光為非尋常光(e-ray)，此時，光看到液晶分子的折射率為

$$n_{eff}(\theta) = \left(\frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} \right)^{-1/2}$$

其中 θ 為入射光的方向與液晶指向矢間的夾角，當 $\theta=0$ 度，光感受到的折射率為 n_e ，若 $\theta=90$ 度，則光感受到的折射率為 n_o 。

若入射光的偏振方向垂直液晶指向矢的方向，如圖 2-2(b)，我們則

稱這道光為尋常光(o-ray)，此時，光看到液晶分子的折射率為 $n=n_o$ 。



(a)e-ray 的光看到的折射率為 n_{eff} (b)o-ray 的光看到的折射率為 n_o

圖 2-2 將行經液晶分子的入射光拆解為 e-ray 與 o-ray

2.2 液晶相位調制器之簡介

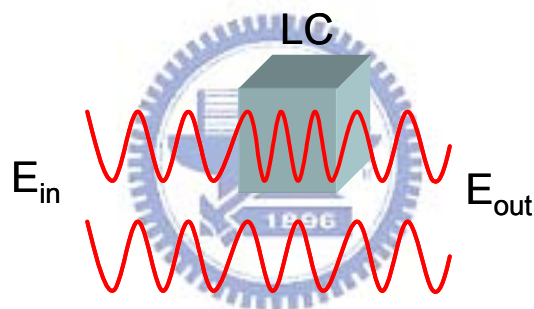


圖 2-3 液晶相位調制器的示意圖

圖 2-3 為液晶相位調制器的示意圖，光通過液晶層看到的折射率 ($n>1$)與未經過液晶層所看到的折射率($n=1$)會有所不同，也就是光通過液晶盒時，得到一個相位延遲，所以光通過液晶盒的速度比較慢。當我們施加電壓於液晶盒後，由於液晶分子轉動，光看到液晶分子等效折射率隨液晶分子轉的角度而變，因此光得到的相位延遲隨電壓大小有所變化，這種現象稱為液晶的相位調制。

一般的液晶相位調制主要有三種：

(1) 平行配向液晶盒(homogenous cell)

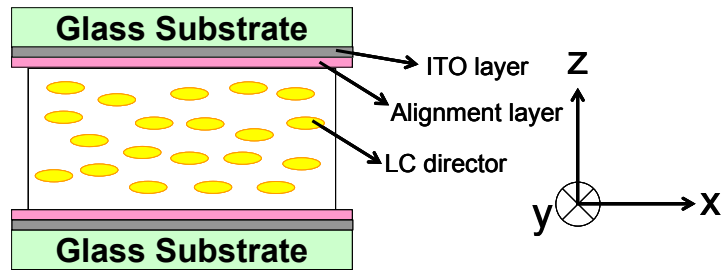


圖 2-4 平行配向液晶盒結構示意圖

平行配向盒如圖 2-4，液晶盒上下基板是 ITO 導電玻璃組成，內側為水平配向層，不加電壓時，液晶分子沿著摩擦方向水平排列(x 軸)。加高電壓後，液晶分子站直，沿著 x 方向的偏振光看到的折射率由 n_e 變成接近 n_o ，所以相位調制大，但沿著 y 方向的偏振光看到的折射率保持 n_o 不變，不具有相位調制的功用，因此平行配向盒缺點是需要額外一片偏振片，且與一般添加聚合物網絡的液晶相位調制器相比(例如聚合物網絡液晶盒)，反應速度較慢。

(2) 聚合物網絡液晶盒(polymer network liquid crystal, or PNLC)[6]

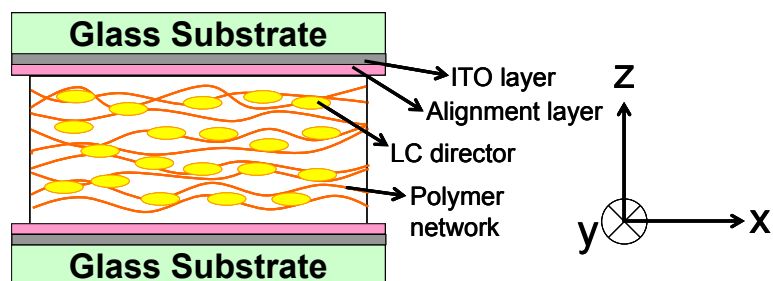


圖 2-5 液晶聚合物網絡結構示意圖

PNLC 的液晶盒結構如圖 2-5 所示。為了改善水平配向盒(圖 2-4)

反應速度慢的缺點，PNLC 利用聚合物網絡(polymer network)對液晶分子有一個額外的回復力矩，所以加快液晶分子的反應時間(上升時間+下降時間)，但缺點是由於添加聚合物網絡，操作電壓高，且入射光感受到液晶分子的折射率，與聚合物網絡的折射率兩者不同，所以散射(scattering)也較大。

(3)切形變聚合物網絡液晶盒(sheared polymer network liquid crystal, or S-PNLC)[7, 8]

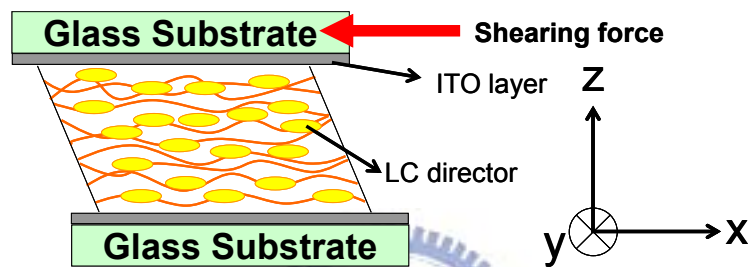


圖 2-6 形變液晶聚合物網絡結構示意圖

S-PNLC 的結構如圖 2-6 所示，製作時當液晶盒內聚合物網絡形成，由於沒有配向膜，液晶分子與聚合物網絡為隨機分佈，此時光散射強。所以需把玻璃基板施上一硬力，讓聚合物網絡與液晶分子具有一個方向排列，使液晶盒變成穿透態。與一般 PNLC 相位調制器相比，S-PNLC 具有操作電壓低、散射程度低等優點，但是不易製作。

2.3 偏振無關液晶相位調制器之簡介

在 2.2 節中，我們介紹的三種液晶相位調制器皆為偏振相關，需要外加一片偏振片，所以光效率低，為了解決這個問題，偏振無關液晶相位調制器的研究與開發倍顯重要。近年來，偏振無關液晶相位調制器的類型主要能夠分成兩大類，第一種為雙層型，第二種為剩餘相位型，本節將介紹這兩種類型的液晶相位調制器。

第一類：雙層型

(1) 雙層式液晶凝膠(double layered LC gels)[13]

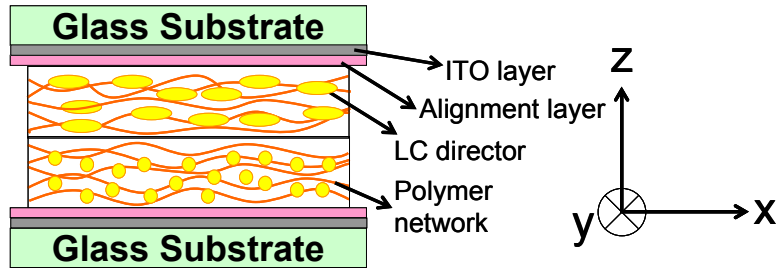


圖 2-7 雙層式液晶凝膠結構示意圖

雙層式液晶凝膠的結構如圖 2-7，需要用到兩個 PNLC 液晶盒(圖 2-5)，中間需要將玻璃拆開。它的優點是相位調制量 $>1\pi$ 且液晶反應時間快($\sim 0.7\text{ms}$)，缺點為聚合物濃度高所以操作電壓大($0\sim 180\text{V}_{\text{rms}}$)，並且製作不易。

(2) 雙層式液晶(double layered LC)[14]

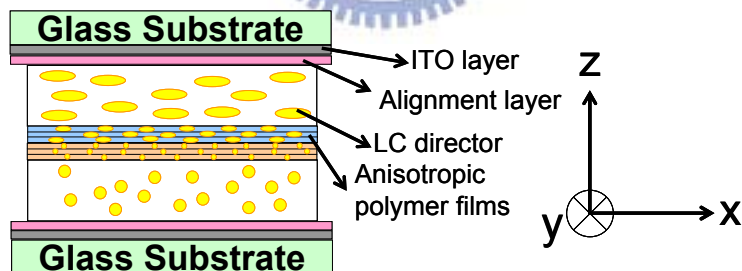


圖 2-8 雙層式液晶結構示意圖

如圖 2-8，雙層式液晶需要兩個水平液晶盒(圖 2-4)，先中間將玻璃拆開，再用兩片聚合物薄膜連接，做為液晶的配向，由於上下層是純液晶，所以相位調制量可達 8.1π ，且操作電壓低($0\sim 50\text{V}_{\text{rms}}$)，但是反應時間慢($\sim 300\text{ms}$)、製作難度高。

第二類：剩餘相位型

聚合物穩固膽固醇液晶 (polymer stabilized cholesteric texture, or PSCT)[15]

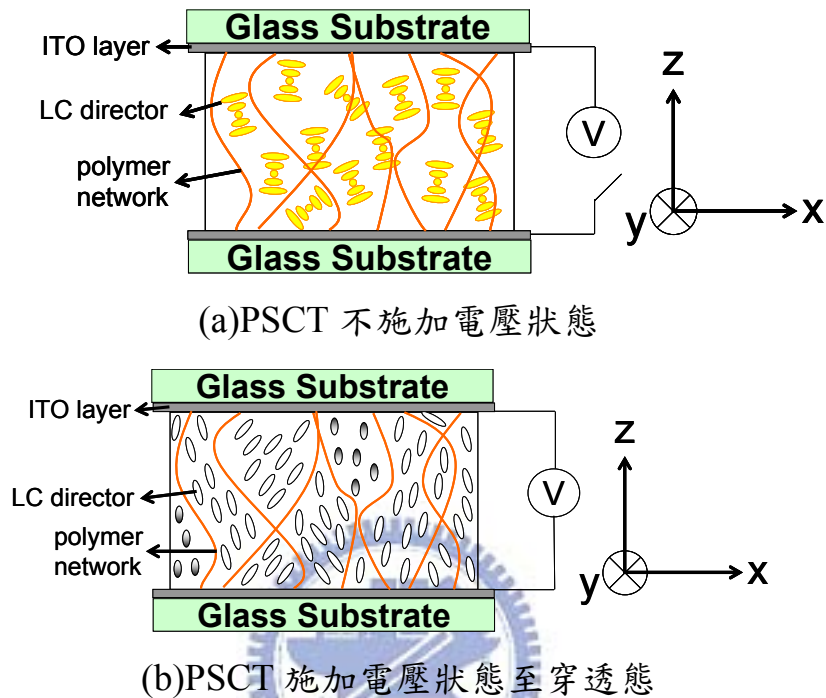


圖 2-9 聚合物穩固膽固醇液晶結構示意圖

PSCT 如圖 2-9(a)所示，結構上為垂直方向鍵結的聚合物網絡，和散佈於之間的膽固醇液晶。加電壓下，如圖 2-9(b)，液晶開始站直，此時一直增大電壓到液晶完全站直的電壓區間內，入射光為高穿透率且偏振無關相位調制。其相位調制量小($\sim 0.025\pi$)，且操作電壓高 ($40V_{rms} \sim 160V_{rms}$)

(2) 聚合物分散式液晶 (polymer dispersed liquid crystal, or PDLC)[16]

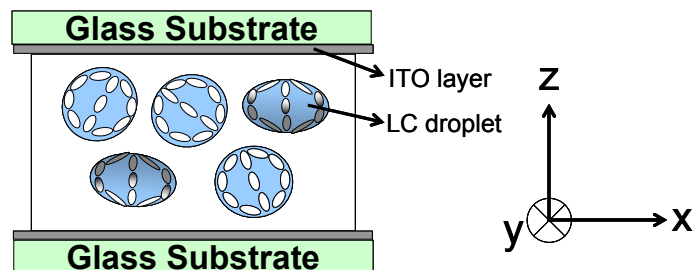
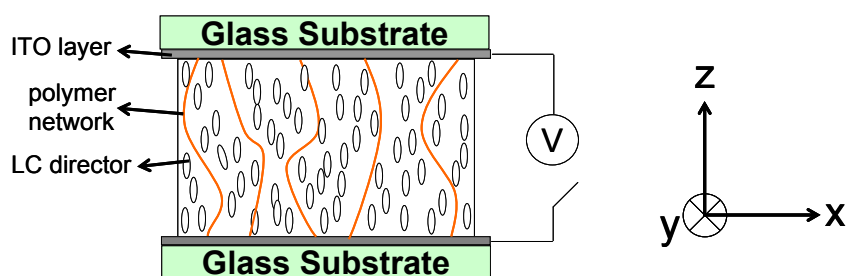


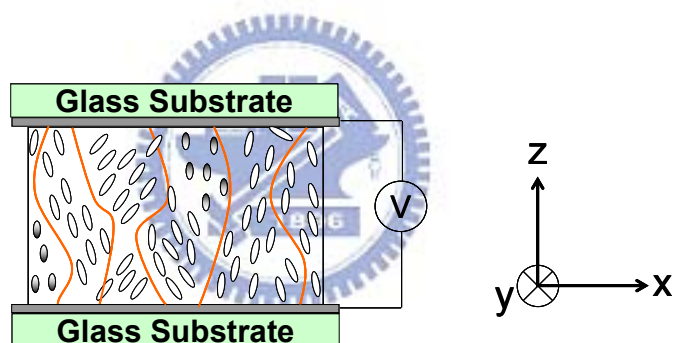
圖 2-10 聚合物分散式液晶結構示意圖

PDLC 結構如圖 2-10 所示，當製作時聚合物濃度高，液晶會被聚合物包住形成一個個液晶球。此時在加電壓到入射光為高穿透態後，也就是液晶快站直與完全站直之間，入射光為偏振無關相位調制。在 PDLC 操作電壓 $26V_{\text{rms}}$ 與 $55V_{\text{rms}}$ 之間，其相位調制量小($\sim 0.05\pi$)。

(3) 液晶凝膠(LC gels)[17]



(a) LC gels 不施加電壓時，液晶為站直狀態



(b) LC gels 施加電壓後，液晶開始隨機向 x-y 面倒下

圖 2-11 液晶凝膠示意圖

液晶凝膠如圖 2-11(a)所示，在不加電壓時，結構上為垂直方向鍵結的聚合物網絡與站直的液晶，入射光為高穿透。加電壓下，如圖 2-11(b)，由於液晶為負型液晶，會開始向 x-y 平面隨機倒下，若持續增加電壓到入射光仍然維持高穿透率的這段電壓區間，屬於偏振無關相位調制。其相位調制量小($\sim 0.008\pi$)，且操作電壓高($130V_{\text{rms}}\sim 180V_{\text{rms}}$)

2.4 研究動機

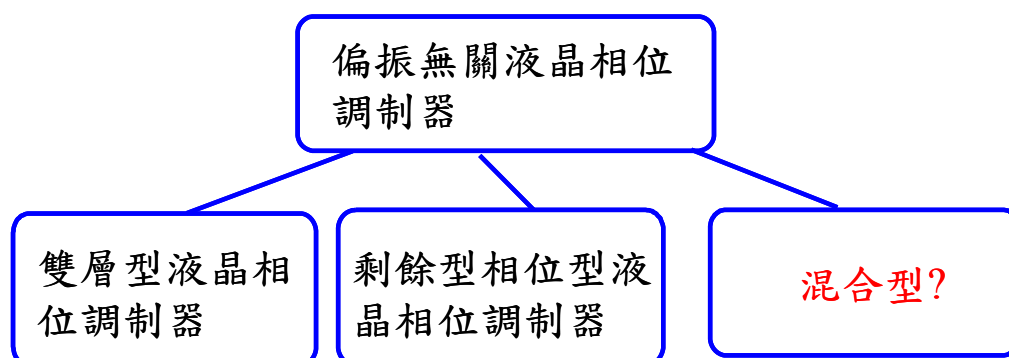


圖 2-12 偏振無關液晶相位調制的種類

目前偏振無關液晶相位調制器可分為兩類，不外乎雙層型或剩餘相位型，雙層型雖然相位調制量大，但是需要花上兩個液晶盒，製作也不容易，而剩餘相位型雖然製作起來相對雙層型還要簡單，但是有相位調制量小、以及需要一個額外偏壓讓光為穿透態的缺點，所以我們想知道是否能夠做出第三類目前沒有人做過，也就是結合了雙層型與剩餘相位型的混合型液晶相位調制器，希望能夠同時具有雙層型的大相位調制、不須額外偏壓，以及剩餘相位型製作起來較為容易的優點。

第 3 章 操作原理和理論

3.1 T-PNLC 操作原理

T-PNLC 機制結合兩種偏振無關液晶相位調制器，圖 3-1(a)為不施加電壓時 T-PNLC 的結構，靠近上下基板(厚度 d_1)的液晶分子相互垂直，為雙層型偏振無關相位調制，中間遠離基板的液晶分子 d_2 具有相同的傾角，隨機地分佈於聚合網絡，為剩餘相位型偏振無關相位調制。當施加一個小電壓 V_1 於液晶盒上，如圖 3-1(b)，液晶分子朝電場方向站直，此時光進入中間層，由於入射光感受到液晶分子的折射率，與聚合物網絡的折射率接近，所以入射光為無散射(scattering-free)的高穿透態，此時若再施加更大的電壓 V_2 ，上下雙層型與中間剩餘相位型的液晶分子會站的更直，如圖 3-1(c)所示，在電壓介於 V_1 與 V_2 之間為高穿透且為偏振無關的純相位調制。

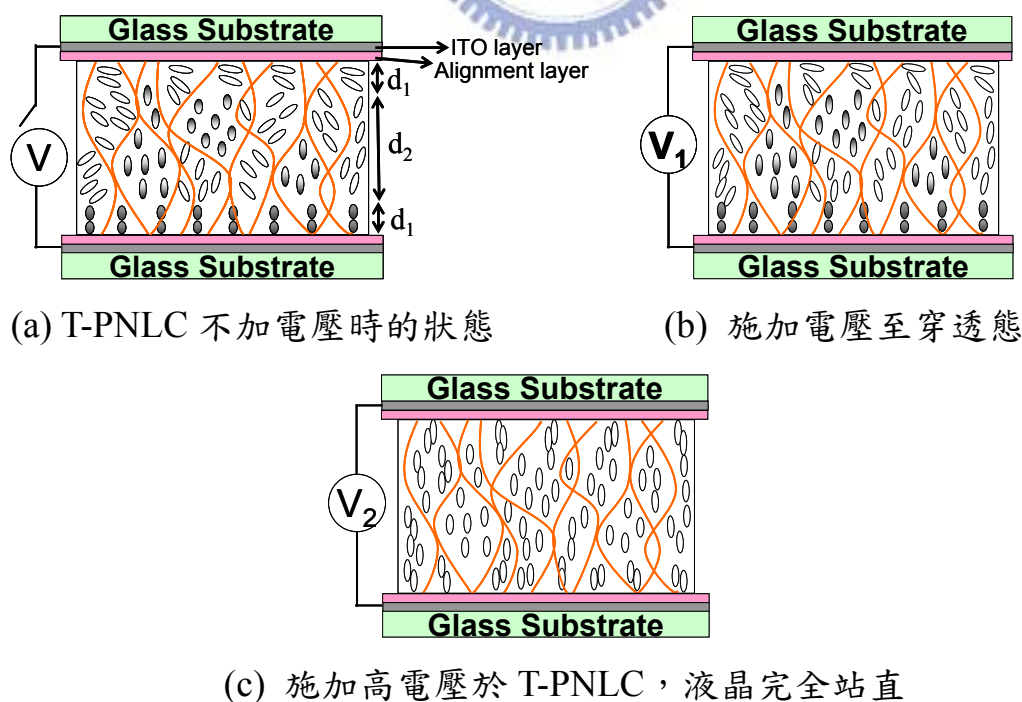


圖 3-1 T-PNLC 的操作機制

3.2 理論探討

3.2.1 雙層型效應

在第二章中，我們介紹過雙層型液晶相位調制器可以分成 LC gels 與 double-layered LC(圖 2-7 與圖 2-8)，本節我們要說明為何雙層型液晶相位調制器是偏振無關相位調制。

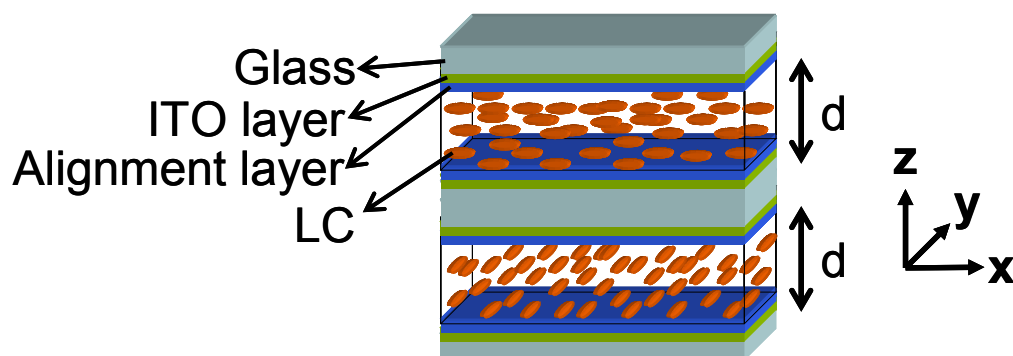


圖 3-2 雙層型結構示意圖

雙層構造液晶相位調制器可簡化成兩個互相垂直的水平配向液晶盒，如圖 3-2 所示，在不加電壓時上下層互為液晶分子排列方向垂直的兩組液晶盒，當一非偏振光正向入射雙層型液晶相位調制器，入射光的電場可表示成

$$\vec{E}(\vec{r}, t, V=0)_{input} = \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t) \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot \hat{y})_j] \quad (3.1)$$

為任意偏振光的線性組合，當光進入到液晶層，每一個偏振光可再分解成兩個 eigen-mode 的線性組合(x 方向偏振及 y 方向偏振)，其中 A_{0x} 與 A_{0y} 為複數，為位置 r 與時間 t 的函數，滿足 $\sqrt{A_{0x}^2 + A_{0y}^2} = 1$ ， $(A_{0x}(\vec{r}, t) \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot \hat{y})_j$ 物理上代表一個線偏振光的方向，而 $a_j(\vec{r}, t)$ 為線偏振光的振幅大小。

不施加電壓下，光經過雙層構造液晶相位調制器後，若不考慮液晶之預傾角，沿 x 軸之偏振光與沿 y 軸之偏振光增加的相位同樣是

$$e^{i\varphi_x(V=0)} = e^{i\varphi_y(V=0)} = e^{ik(n_e+n_o)d} \quad (3.2)$$

因此光經過雙層構造液晶相位調制器之後，電場可表示成

$$\vec{E}(\vec{r}, t, V=0)_{output} = e^{ik(n_e+n_o)d} \cdot \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t)) \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot \hat{y}]_j \quad (3.3)$$

其中 $k=2\pi/\lambda$ 為真空中的波向量(wave vector)， n_e 與 n_o 為 extraordinary wave(e-wave)與 ordinary wave (o-wave)的折射係數，加電壓後，由於液晶指向矢隨外加電場轉動，x 分量與 y 分量的相位調制同樣為

$$e^{i\varphi_x} = e^{i\varphi_y} = e^{ik(n_{eff}(\theta)+n_o)d} \quad (3.4)$$

(光進入液晶盒看到的等效折射係數 n_{eff} 隨液晶分子向 z 軸倒的角度 θ 做變化)

所以通過液晶盒後的電場可表示成

$$\vec{E}(\vec{r}, t, V \gg V_{th})_{output} = e^{ik(n_{eff}(\theta)+n_o)d} \cdot \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t)) \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot \hat{y}]_j \quad (3.5)$$

由(3.5)式與(3.1)式比較，我們可以看出，不同電壓下光通過雙層型液晶相位調制器的偏振方向不變，因此雙層型相位調制之相位移與光的偏振方向無關。當加高電壓時($V \gg V_{th}$)，液晶指向矢沿著電場方向轉動至幾乎站直狀態，所以相位調制同樣為

$$e^{i\varphi_x(V \gg V_{th})} = e^{i\varphi_y(V \gg V_{th})} = e^{ik(n_o+n_o)d} \quad (3.6)$$

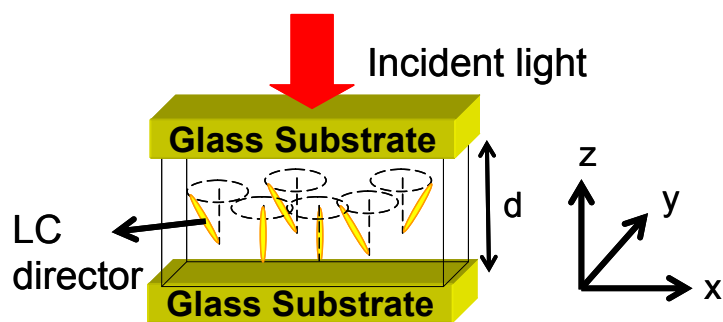
從(3.6)式與(3.2)式，我們得知施加高電壓下光所增加的相位，與不施加電壓下光所增加的相位，之間有一個相位移的差別：

$$\Delta\varphi = \varphi(0V_{rms}) - \varphi(V \gg V_{th}) = \frac{2\pi d(n_e - n_o)}{\lambda} \quad (3.7)$$

因此藉著電控雙層型液晶相位調制器，可以達到調制光相位之目的，並且不改變光的偏振態。

3.2.2 剩餘相位型效應

在第二章中，我們介紹過剩餘相位型液晶相位調制器主要可以分成 PSLC、PDLC、nano-PDLC 與 LC gels(圖 2-9~圖 2-11)，本節我們要說明為何剩餘相位型是偏振無關相位調制。



(a) 剩餘型液晶結構示意圖

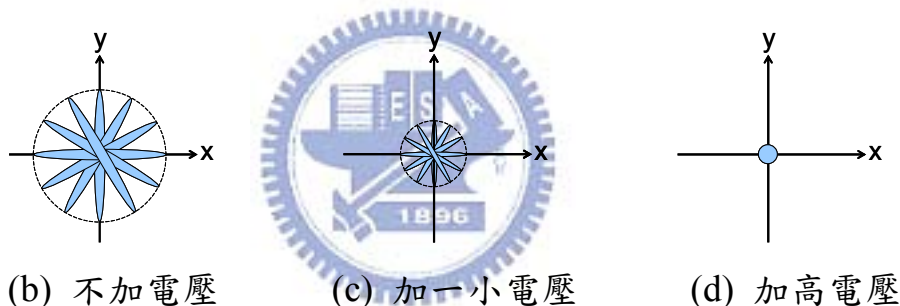


圖 3-3 剩餘相位型液晶相位調制器操作原理

剩餘相位型可以用圖 3-3(a)來示意液晶分子的散佈方式，不加電壓時，液晶盒內所有液晶分子有一個相同傾角，但液晶指向矢如圖 3-3(a)像圓錐軌跡般地隨機分布，從液晶盒上方看下去，液晶分子投影在 x-y 平面上的軌跡如圖 3-3(b)，一道非偏振光入射液晶盒(電場可用(3.1)式表示)，看到液晶分子的折射率可看成一個平均折射率。而平均折射率具有下式的關係

$$n_{ave} = \frac{n_{eff}(\theta) + n_o}{2} \quad (3.8)$$

((3.8)式中 $n_{eff}(\theta)$ 與液晶分子的預傾角有關)

因此非偏振光通過液晶盒後，電場可表示成

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t, V = 0)_{output} &= e^{ik \cdot n_{ave} \cdot d} \cdot \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t) \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot \hat{y})_j] \\ &= e^{ik \cdot n_{ave} \cdot d} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t, V = 0)_{input}\end{aligned}\quad (3.9)$$

當加一個小電壓時，如圖 3-3(c)，各種方向的液晶分子朝電場方向站直，所以各種方向的偏振光看到的折射率為相同的一個平均折射率 n_{ave2} ，因此一道偏振光通過液晶盒後偏振態能保持不變，單純只有光的相位變化。

若施加更高電壓，液晶分子將完全站直玻璃基板，如圖 3-3(d)，此時各偏振光入射液晶盒看到的等效折射率為 n_o ，因此光通過液晶盒後，電場改變為

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t, V \gg V_{th})_{output} &= e^{ik \cdot n_o \cdot d} \cdot \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t) \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot \hat{y})_j] \\ &= e^{ik \cdot n_{ave} \cdot d} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t, V = 0)_{input}\end{aligned}\quad (3.10)$$

比較(3.9)式與(3.10)式，液晶盒在不加電壓與加高電壓之間，輸出光的偏振態不變，且具有一個相位移的變化

$$\Delta\varphi = \varphi(0V_{rms}) - \varphi(V \gg V_{th}) = \frac{2\pi d(n_{ave} - n_o)}{\lambda}\quad (3.11)$$

實驗上，要達成剩餘相位型的結構，需要加入高分子聚合物，因此需要一個額外偏壓，使光進入液晶盒後看到聚合物與液晶分子之間的折射率匹配，光入射液晶盒才具有高穿透率的純相位調制，因此可調制的相位大小比雙層型相位調制小。

3.2.3 混合型液晶相位調制器

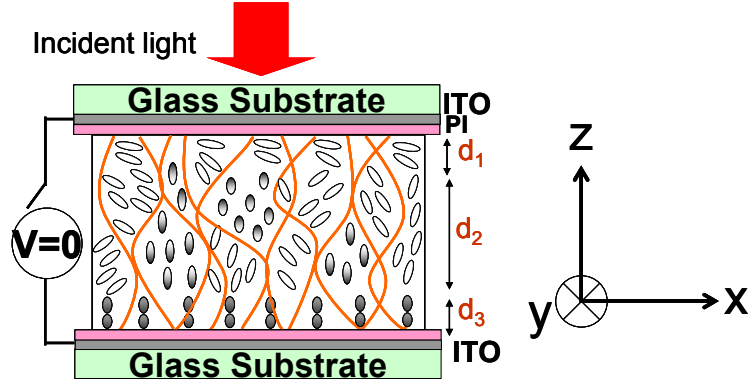


圖 3-4 T-PNLC 結構示意圖型

本論文研究的 T-PNLC 相位調制，結合了雙層型與剩餘相位型，不加電壓於液晶盒時，結構如圖 3-4 所示，當非偏振光(電場可表示為(3.1)式)入射 T-PNLC 液晶盒，並且經過液晶層 d_1 後，可以分成 x 、 y 兩個方向偏振光的 eigen-mode，由於 x 方向偏振的光看到的折射率是 n_e ， y 方向偏振的光看到的折射率是 n_o ，電場可表示成

$$\vec{E}_{d_1}(\vec{r}, t, V=0) = \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t) \cdot e^{ik \cdot n_e \cdot d_1} \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot e^{ik \cdot n_o \cdot d_1} \cdot \hat{y})_j] \quad (3.12)$$

之後光再通過 d_2 液晶層，由於此層為剩餘相位型相位調制，所以可由(3.10)式可推得

$$\vec{E}_{d_2}(\vec{r}, t, V=0) = e^{ik \cdot n_{ave} \cdot d_2} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t, V=0)_{d_1} \quad (3.13)$$

最後光通過 d_3 液晶層而輸出液晶盒，其電場形式為

$$\vec{E}_{output}(\vec{r}, t, V=0) = e^{ik \cdot n_{ave} \cdot d_2} \cdot \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t) \cdot e^{ik(n_e d_1 + n_o d_3)} \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot e^{ik(n_o d_1 + n_e d_3)} \cdot \hat{y})_j] \quad (3.14)$$

(3.14)式中，若 $d_3=d_1$ ，我們可以把輸出光的電場形式簡化成一個簡單的式子

$$\begin{aligned} \vec{E}_{output}(\vec{r}, t, V=0) &= e^{ik(n_{ave} d_2 + (n_e + n_o) d_1)} \cdot \sum_j [a_j(\vec{r}, t) \cdot (A_{0x}(\vec{r}, t) \cdot \hat{x} + A_{0y}(\vec{r}, t) \cdot \hat{y})_j] \\ &= e^{ik(n_{ave} d_2 + (n_e + n_o) d_1)} \cdot \vec{E}_{input}(\vec{r}, t, V=0) \end{aligned} \quad (3.15)$$

加高電壓後，液晶盒內所有的液晶分子完全站直，所以入射光看到液晶的折射率為 n_o ，因此輸出光的電場為

$$\begin{aligned}\vec{E}_{output}(r, t, V \gg V_{th}) &= e^{ik(n_o d_2 + (n_o + n_e) d_1)} \cdot \sum_j [a_j(r, t) \cdot (A_{0x}(r, t) \cdot \hat{x} + A_{0y}(r, t) \cdot \hat{y})_j] \\ &= e^{ik(n_o d_2 + 2n_o d_1)} \cdot \vec{E}_{input}(\vec{r}, t, V = 0)\end{aligned}\quad (3.16)$$

比較(3.15)式與(3.16)式，液晶盒在不加電壓與加高電壓之間，輸出光的偏振態不變，且有一個相位移變化

$$\Delta\varphi = \varphi(0V_{rms}) - \varphi(V \gg V_{th}) = \frac{2\pi((n_e - n_o)d_1 + (n_{ave} - n_o)d_2)}{\lambda}\quad (3.17)$$



第 4 章 實驗方法與量測

4.1 液晶盒樣品製作

本論文使用的空液晶盒是由美相及日本 EHC 生產製造，然後灌入在實驗室調配好的液晶混合物(不加 chiral dopant)。液晶空盒是由兩片 ITO 導電玻璃基板組成，玻璃基板上鍍有水平配向層，且上下配向層摩擦(rubbing)方向為互相垂直，形成 90 度扭轉式向列型液晶盒，簡稱 TN cell。實驗中，我們主要用美相液晶盒，其厚度為 7 μm (光譜儀量測空液晶盒為 5.63 μm)，另外我們也用 EHC 液晶盒來討論不同液晶盒厚度的影響，分別有 5 μm 、7 μm 和 15 μm (光譜儀量測空液晶盒依序為 5.04 μm 、6.62 μm 、14.2 μm)。T-PNLC 的材料是由正型液晶、聚合物單體 M1(bisphenol-A-dimethacrylate)、感光起始劑(photo-initiator)以比例混合而成。

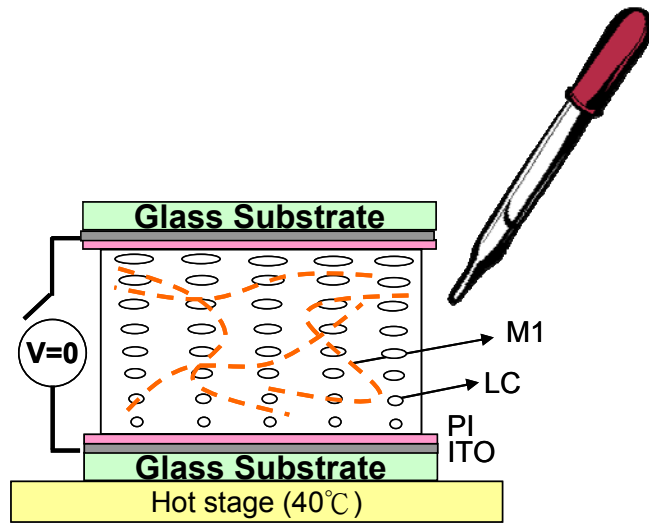
本論文使用的正型液晶($\Delta\epsilon > 0$)為 E7，其各項參數如下：

E7				
Physical Properties				
Clearing Point	58°C			
Optical Anisotropy	Δn	589.3nm	+20°C	0.2255
	n_e	589.3nm	+20°C	1.7472
	n_o	589.3nm	+20°C	1.5217
Dielectric Anisotropy	$\Delta\epsilon$	1.0 kHz	+20°C	14.1
	ϵ_{\parallel}	1.0 kHz	+20°C	19.3
	ϵ_{\perp}	1.0 kHz	+20°C	5.2
Rotational Viscosity	γ_1		+20°C	232.6 mPas
Elastic Constants	K_1		+20°C	11.1pN
	K_2		+20°C	10pN
	K_3		+20°C	17.1pN
	K_3/K_1		+20°C	1.54

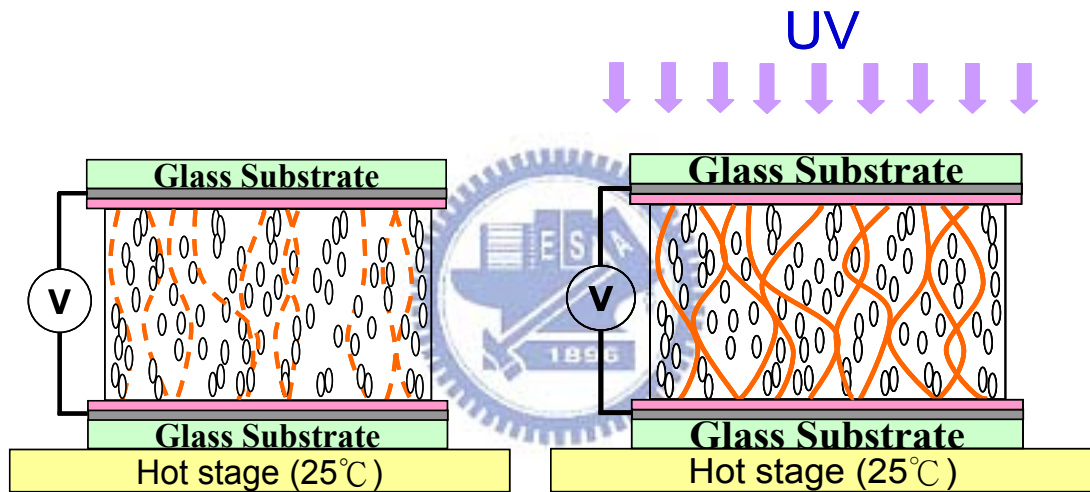
表 4-1 液晶 E7 之參數表

T-PNLC 的製作流程：

- 1) 先把電線焊在空液晶盒(TN cell)的 ITO 上，因為之後在做光聚合的步驟時，T-PNLC 樣品要同時施加一個電壓。
- 2) 將待灌入 T-PNLC 的液晶混合物(液晶 E7:單體 M1:感光起始劑的比例為 94%:5%:1%)與焊好電線的空液晶盒放置在加熱平台上，預熱至溫度為 40°C。
- 3) 將液晶混合物灌入液晶盒中，因為液晶盒是右旋 90 度 TN 型，此時灌入液晶盒的液晶分子會呈現 90 度扭轉，且單體會循著液晶指向矢的方向轉，結構如圖 4-1(a)所示。
- 4) 將灌好液晶混合物的液晶盒降溫至光聚合時的溫度(如：25°C)，並施加電壓在液晶盒上，液晶分子因電場垂直於玻璃基板，而單體循著液晶指向矢的方向分佈，如圖 4-1(b)
- 5) 以紫外光(波長 365nm, 1.27mW/cm²)照射液晶盒 40 分鐘，液晶混合物因相分離作用 (phase separation) 形成聚合物網絡 (polymer-network)，如圖 4-1(c)
- 6) 關掉紫外光及電壓，放置到穩定，因為選用的液晶盒為 TN 型，上下層靠近基板的液晶分子因配向膜的水平配向，會被限制形成一個偏振無關的雙層型液晶相位調制(double-layerd type)，而中間層遠離基板區域的液晶分子，會隨機地倒下分佈於聚合物網絡，形成一個偏振無關的剩餘相位型(residual phase type)液晶相位調制，因此結合了兩種類型的相位調制，最後 T-PNLC 樣品的結構如圖 4-1(d)。

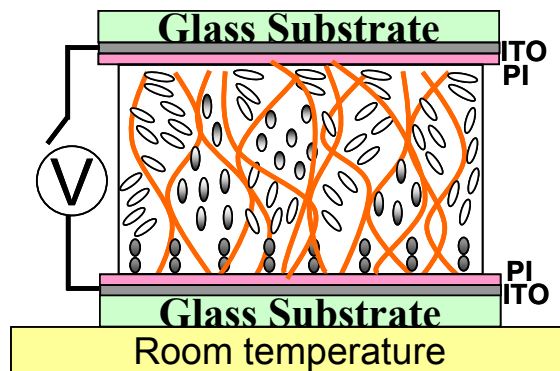


(a) 將材料灌入 TN 型液晶盒



(b) 降溫後施加電壓於液晶盒

(c) 以紫外光照射液晶盒



(d) 關掉紫外光、電壓與加熱台後放置到穩定

圖 4-1 T-PNLC 樣品製作流程

4.2 量測架構

儀器名稱	型號
非偏振光雷射(Unpolarizer He-Ne laser) $\lambda=543.5\text{nm}$	MELLES GRIOT : 05-LGR-173
非偏振光雷射(Unpolarizer He-Ne laser) $\lambda=632.8\text{nm}$	JDSC : 1122
衰減片 (Attenuator)	Newport/FBS-ND05, FBS-ND10
偏振片(Polarizer)	光儀(M.G.)
光偵測器(Detector)	New Focus: Mode2031
放大器 (Amplifier)	FLC A400D
示波器 (Oscilloscope)	Tektronix : TDS3032
LabVIEW 系統	National Instrument
分光鏡(BS)	光儀(M.G.) $\lambda=632.8\text{nm}$
反射鏡(Mirror)	Newport/10D10ER.2
透鏡(Lens)	
DV相機(Camera)	Sony,DCR-HC40

表 4-2 儀器列表

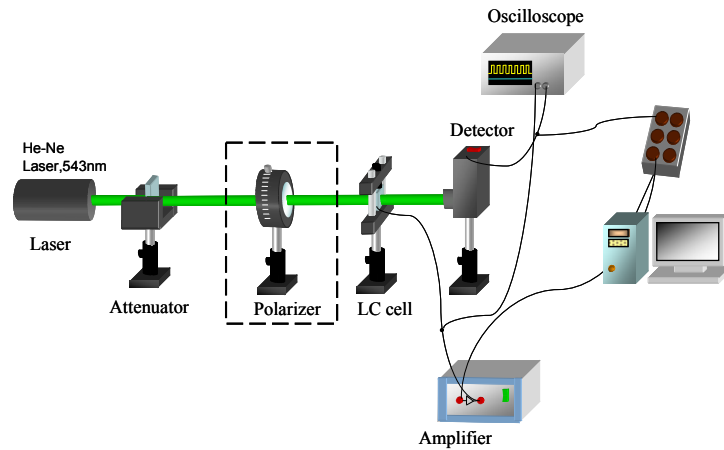


圖 4-2 量測裝置(穿透率對電壓關係)

圖 4-2 為量測液晶盒穿透率對電壓關係的實驗裝置，入射光源是非偏振氦氖雷射(波長=543.5nm)，經過衰減片(Attenuator)將光強度衰減後，正向入射通過液晶盒，最後用光偵測器(detector)接收光強度的訊號。整套系統由 LabVIEW 自動化控制，透過資料擷取卡(DAQ)提供輸入電訊號給 20 倍的電壓放大器，將電壓增益再施加於液晶盒。同時，光偵測器接受的訊號也透過資料擷取卡傳回電腦裡。為了量測 T-PNLC 穿透率對電壓的偏振相關性，額外還會加上一片偏振片(圖 4-2 虛線框框)使入射光為偏振光。另一方面，由於穿透式加電壓後液晶盒的穿透率變化小，反應時間不易量測，因此我們用反射式來取代穿透式量測，如圖 4-3 (入射角為 20 度，這邊用 Stop 代表遠處的牆壁)。

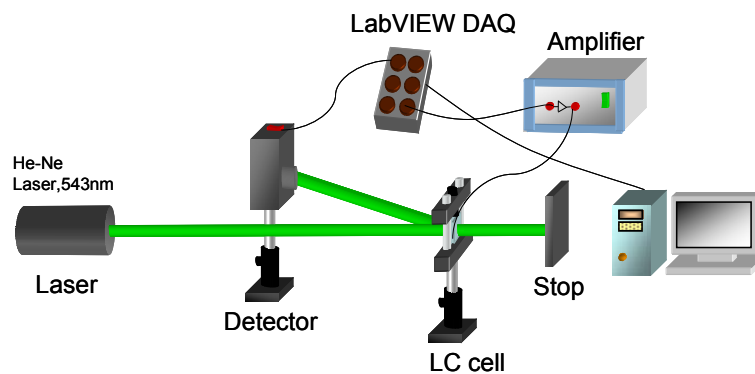


圖 4-3 量測裝置(反應時間量測)

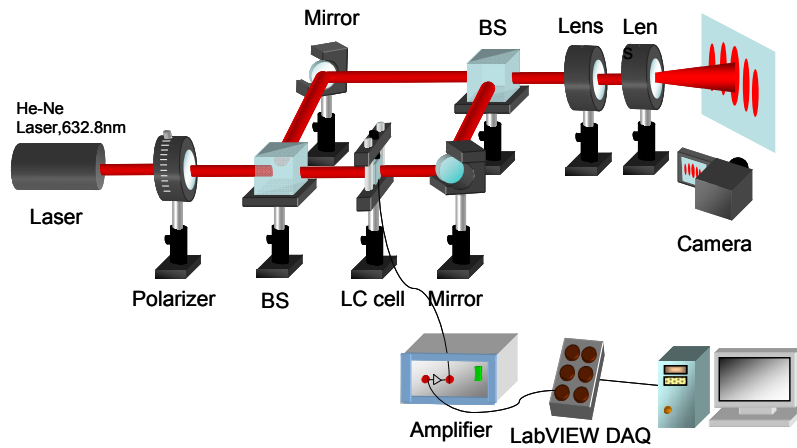
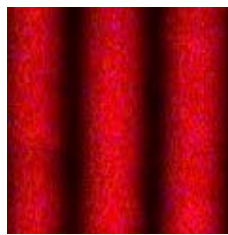


圖 4-4 量測裝置(相位移量測)



(a)不加電壓於 T-PNLC 之干涉條紋



(b)加電壓 $30V_{rms}$ 於 T-PNLC，干涉條紋向右

圖 4-5 麥克詹達干涉儀量測 T-PNLC 觀察到的干涉條紋

實驗架構(圖 4-4)用的是麥克詹達干涉儀(Mach-Zehnder)：首先紅光氬氖雷射光(波長=633nm)經過偏光片後，分光鏡將光分成兩道，一道通過液晶盒，另一道單純在空氣中傳播，再用反射鏡與分光鏡將兩道光作干涉，然後透鏡將干涉條紋放大在屏幕上。當施加電壓在液晶盒時，液晶分子會因電場而轉動，由於光經過液晶盒所看到的等效折射率 $n_{eff}(\theta)$ 會隨著液晶轉的角度而變，所以液晶調制的光相位大小產生變化，其中的相位差造成干涉條紋移動。實驗中，我們以數位相機

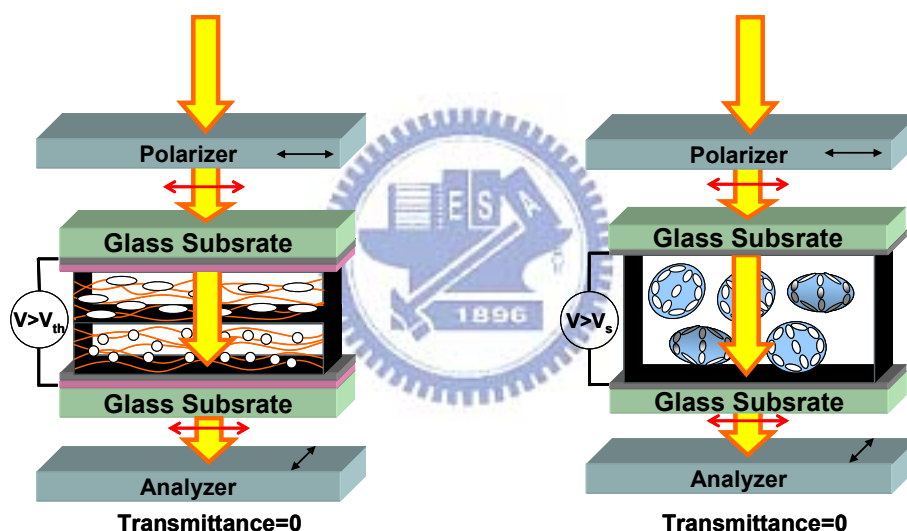
(Sony, DCR-HC40)拍攝干涉條紋後(如圖 4-5(a)、(b))所示，用電腦(Matlab)處理相片，取照片中間部分的光強度分佈圖，將曲線中高頻的雜訊濾除，得到較平滑的曲線，最後計算曲線的偏移而得到相位移的變化。



第 5 章 實驗結果

5.1 光聚合時外加電壓之效應

我們先觀察不同的光聚合時電壓(Curing Voltage)製作之 T-PNLC，在燈箱與偏光顯微鏡下之形態，因為對於一個偏振無關液晶相位調制器(雙層型或剩餘相位型)，如圖 5-1(a)與圖 5-1(b)所示，偏振光經過液晶盒後，偏振態不會改變，只有純相位調制，所以光無法穿過第二片偏振片而呈現暗態，我們要將 T-PNLC 操作在偏振無關相位調制的電壓範圍，需要確認將樣品夾在互相垂直偏振的偏振片下為暗態。



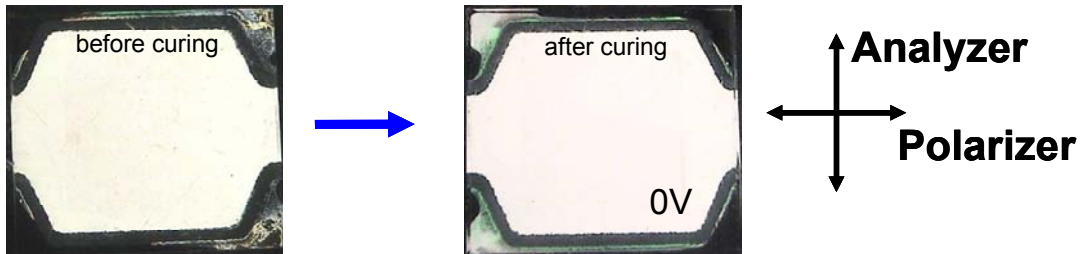
(a)雙層型在 cross polarizer 下觀察(b)剩餘型在 cross polarizer 下觀察

圖 5- 1 偏振無關液晶相位調制器於 cross polarizer 下觀察時為暗態

我們先製作光聚合電壓為 $0V_{rms}$ 、 $2V_{rms}$ 、與 $4V_{rms}$ 條件之 T-PNLC。材料配比為 E7: M1: IRG = 94wt%: 5wt%: 1wt%，液晶盒厚度 $7\mu m$ ，光聚合溫度(Curing temperature)： $25^{\circ}C$ ，紫外光強度： $1.27 mW/cm^2$ 。

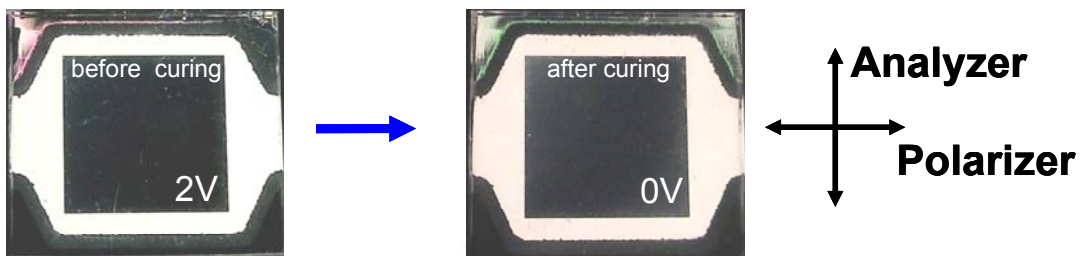
以下是在燈箱與顯微鏡所觀察到的照片：

1) 燈箱下用樣品夾在兩片互相垂直的偏振片觀察的照片：



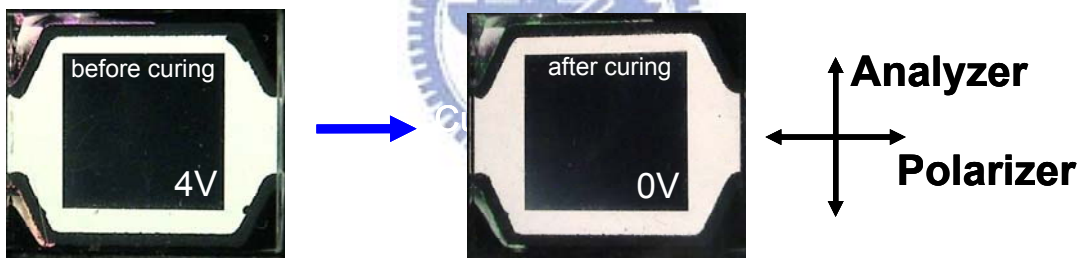
(a) 光聚合前不施加電壓

(b) 光聚合完穩定之照片



(c) 光聚合前施加電壓 $2V_{rms}$

(d) 光聚合完穩定之照片



(e) 光聚合前施加電壓 $4V_{rms}$

(f) 光聚合完穩定之照片

圖 5-2 光聚合前與光聚合後 T-PNLC 之燈箱照片

不同光聚合電壓下，T-PNLC 在光聚合前與光聚合穩定後的燈箱照 (cross polarizer) 如圖 5-2(a)~(f)，我們觀察到在光聚合電壓為 $0V_{rms}$ 的 T-PNLC，製作完之後放在燈箱上觀察(圖 5-2(b))，在垂直偏光片下為白色，有一般 TN 正常白(Normally White)的特性。

當光聚合電壓增加至 $2V_{rms}$ 以上(圖 5-2(c)~圖 5-2(f))，不管在光聚合步驟之前或光聚合穩定之後，在垂直偏光片下電極部分的區域皆為黑

色，代表光聚合前中間層的液晶分子已站直，所以光聚合後，聚合物網絡往垂直玻璃基板方向鍵結，不施加電壓後中間層的聚合物支條對液晶分子有一個垂直方向的拉拔作用，所以液晶分子具有一個大預傾角接近於站直狀態。

(2)顯微鏡觀察樣品之形態：

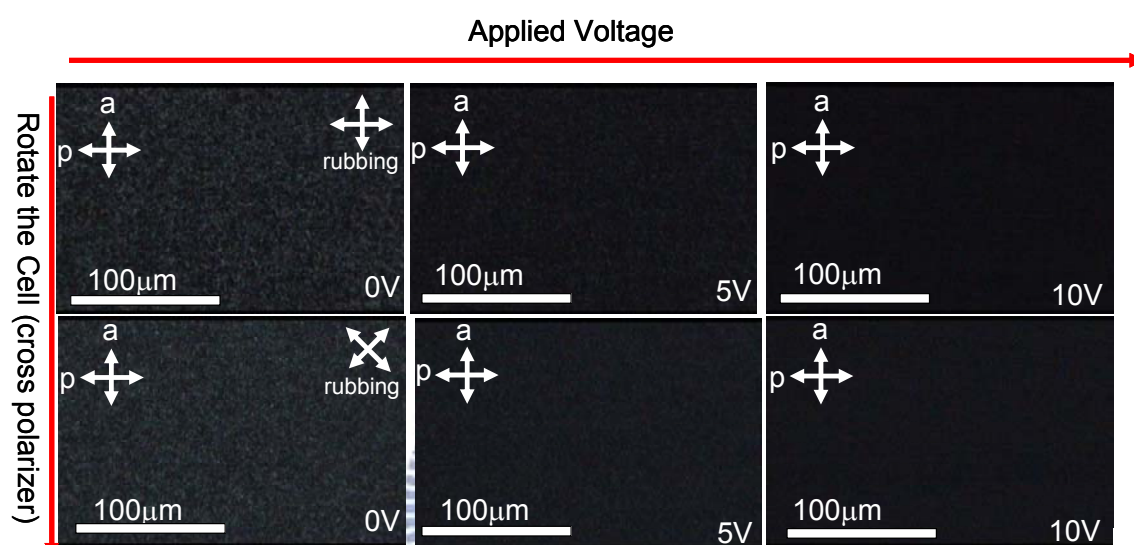


圖 5-3 顯微鏡下以 cross polarizer 觀察 T-PNLC
施加電壓與 cell 旋轉 45 度之型態

圖 5-3 為光聚合電壓為 $2V_{rms}$ 時，偏光顯微鏡觀察樣品之型態，將樣品夾在兩片偏光片之間，不管是施加電壓或旋轉樣品，幾乎呈現暗態，代表光聚合電壓大於 $2V_{rms}$ 後，中間的液晶分子幾乎已經站直。

(附錄 A 附上顯微鏡觀察其他光聚合電壓的 T-PNLC 之型態)

本章我們藉由量測 T-PNLC 的電光特性、相位移大小與偏振相關性，來了解 T-PNLC 是否可以看成雙層型加剩餘相位型的偏振無關相位調制器。

5.1.1 不同外加電壓光聚合之 T-PNLC 的電光效應

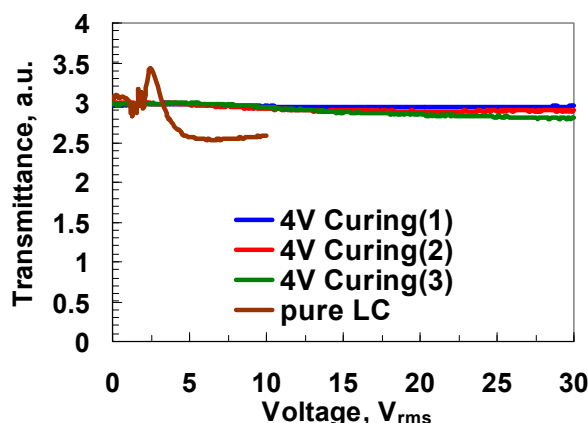
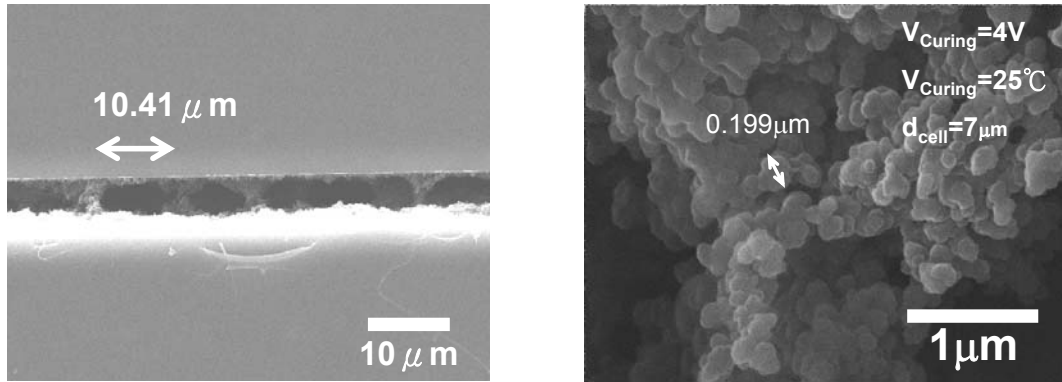


圖 5-4 相同三片樣品之 T-PNLC 的穿透率對電壓關係

首先我們先製作三片光聚合電壓為 $4V_{rms}$ 之 T-PNLC，檢驗實驗的重複性，製作條件為：E7: M1: IRG = 94wt%: 5wt%: 1wt%，液晶盒厚度 $7\mu m$ ，光聚合溫度： $25^{\circ}C$ ，紫外光強度： $1.27mW/cm^2$ 。利用圖 4-2 的實驗架構，以非偏振光量測 T-PNLC 的電光特性，結果如圖 5-4 所示，可以發現三條曲線相當一致，在操作電壓 $0V_{rms}$ 與 $30V_{rms}$ 之間，穿透光強度幾乎不變，我們另外灌入一片不加聚合物之純液晶，目的是為了排除加電壓後，液晶分子轉動產生介面反射及 Fabry-Perot 效應，造成穿透光強度變化。我們發現隨著電壓增加， $4V_{rms}$ 的穿透光強度，皆比純液晶盒之最低穿透光強度還大，所以 $4V_{rms}$ 條件製作的 T-PNLC 屬於高穿透態。

另外，我們用 SEM 去觀察 $4V_{rms}$ 製作之 T-PNLC，如圖 5-5(a) 我們發現聚合物網絡的確出現垂直鍵結的形式，且 domain 大小約 $10\mu m$ ，我們也觀察一顆聚合物球的大小，如圖 5-5(b)，其聚合物球(polymer grain)的直徑約 $0.2\mu m$ ，由於可見光的波長範圍遠小於 domain 的大小，又遠大於一顆聚合物的直徑，所以我們的 T-PNLC 具有低散射優點。



(a) domain 大小約 $10\mu\text{m}$ (b) 聚合物球(polymer grain)約 $0.2\mu\text{m}$

圖 5-5 由 SEM 觀察到光聚合電壓 $4V_{\text{rms}}$ 之 T-PNLC

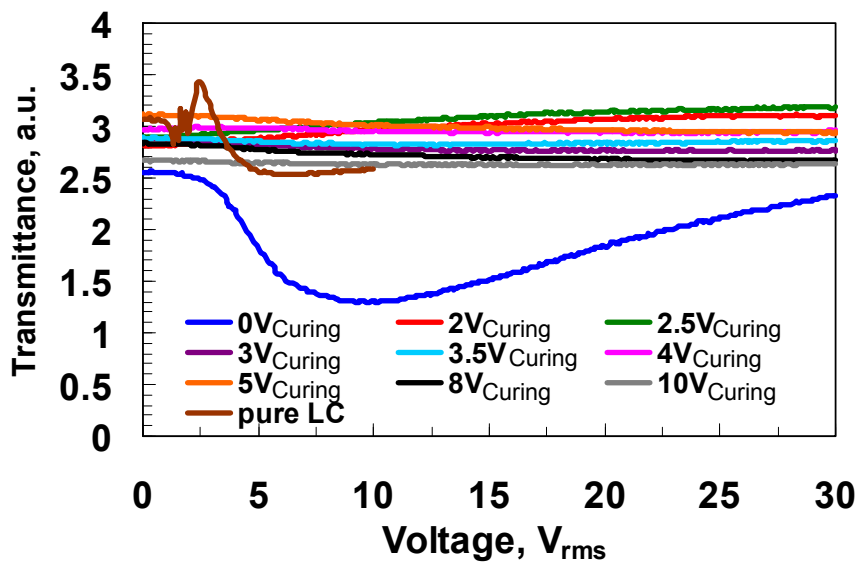


圖 5-6 不同外加電壓光聚合之 T-PNLC 的穿透率對電壓關係

接下來，我們改變不同光聚合時外加電壓，其中光聚合電壓為 $0V_{\text{rms}}$ 、 $2V_{\text{rms}}$ 、 $2.5V_{\text{rms}}$ 、 $3V_{\text{rms}}$ 、 $3.5V_{\text{rms}}$ 、 $4V_{\text{rms}}$ 、 $5V_{\text{rms}}$ 、 $8V_{\text{rms}}$ 、 $10V_{\text{rms}}$ 九種，以非偏振光($\lambda=543\text{nm}$)量測，實驗結果如圖 5-6 所示。在光聚合電壓為 $0V_{\text{rms}}$ 時，T-PNLC 在不加電壓下為一般的 TN 液晶盒，當施加電壓到 $10V_{\text{rms}}$ ，光穿透強度較低，原因可能是液晶分子 n_o 與聚合物網絡折射率 n_p 不同導致。

光聚合電壓大於 $2V_{\text{rms}}$ 後，在操作電壓 $0V_{\text{rms}}\sim 30V_{\text{rms}}$ 之間，光穿透

強度皆比純液晶最低之光穿透強度大，因此光聚合電壓大於 $2V_{\text{rms}}$ 之 T-PNLC 為高穿透態，另外在附錄 A，我們附上量測到的光穿透強度之偏振相關性，由實驗結果顯示，當我們旋轉不同角度的偏振片或施加電壓來量測光穿透強度，T-PNLC 的光穿透強度皆為偏振無關。

反應時間也是相位調制器的重要考量之一，不同光聚合電壓的反應時間如圖 5-7 所示，其中操作電壓的範圍同樣為 $0V_{\text{rms}}\sim 30V_{\text{rms}}$ 。當光聚合電壓越高，聚合物網絡的鍵結方向越垂直於玻璃基板，聚合物支條對液晶分子產生較大的垂直方向拉力，所以液晶分子的上升時間有變快的趨勢。實驗結果顯示，光聚合電壓在 $2V_{\text{rms}}$ 條件下，上升時間約 110ms，當光聚合電壓為等於 $4V_{\text{rms}}$ ，上升時間變快到約 80ms，若光聚合電壓大於 $4V_{\text{rms}}$ ，聚合物網絡已幾乎完全垂直於玻璃方向鍵結，增加光聚合電壓對聚合物網絡不會有太大影響，所以大於 $4V_{\text{rms}}$ 的製作條件下，反應時間沒有太大變化。

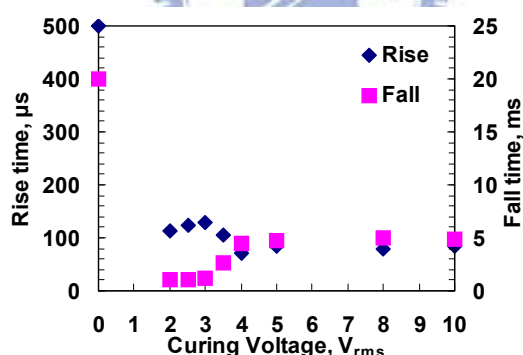


圖 5-7 不同外加電壓光聚合之 T-PNLC 的反應時間

圖 5-7 中我們觀察到，光聚合電壓在 $4V_{\text{rms}}$ 以上時，下降時間約 5ms，當降低光聚合電壓至 $2.5V_{\text{rms}}$ ，下降時間變快到 1.5ms，這是因為在光聚合電壓為 $2.5V_{\text{rms}}$ 時，聚合物網絡開始具有橫向鍵結，使得不加電壓下，液晶分子除了本身的回復力矩還加上聚合物支條橫向的拉力，造成液晶倒下的速度更快一些，但若光聚合時電壓為 $0V_{\text{rms}}$ ，

則上升時間與下降時間將同時變慢，可能是光聚合時不加電壓下 T-PNLC 還是 TN 型液晶，所以液晶除了從站直狀態倒下後，還需要一個旋轉回 90 度 TN 的時間，造成下降時間較慢，且由於加電壓後液晶需要克服聚合物支條橫向的拉力，因此上升時間也變慢。

5.1.2 不同外加電壓光聚合之 T-PNLC 與相位調制大小的關係

5.1.1 節中，我們曾經用三片光聚合電壓為 $4V_{rms}$ 之 T-PNLC，檢驗電光特性之實驗重複性，在本小節，我們先檢驗相位移大小之實驗重複性。量測相位移的實驗裝置如圖 4-4(Mach-Zehnder)，實驗結果為圖 5-8，結果顯示，三片的量測結果相當一致。在操作電壓為 $0V_{rms} \sim 30V_{rms}$ 的電壓下，約有 0.16π 的相位移變化。

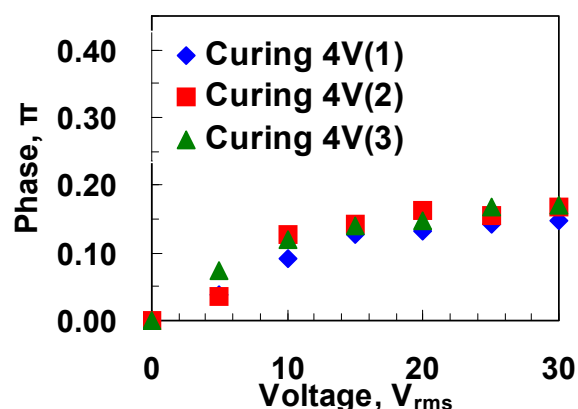


圖 5-8 相同三片光聚合電壓製作之 T-PNLC 的相位移對電壓關係

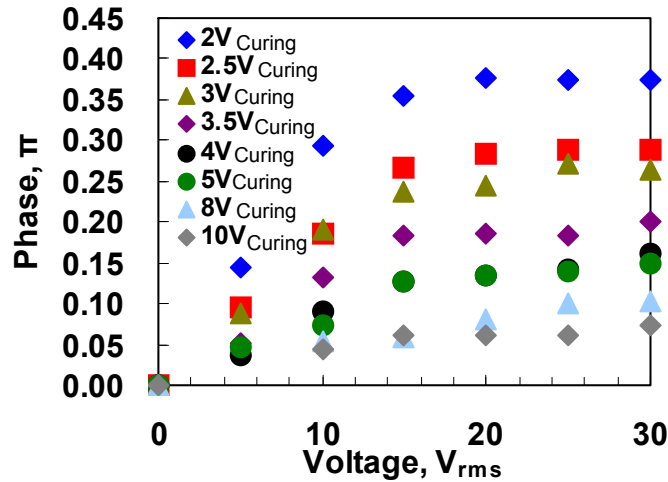
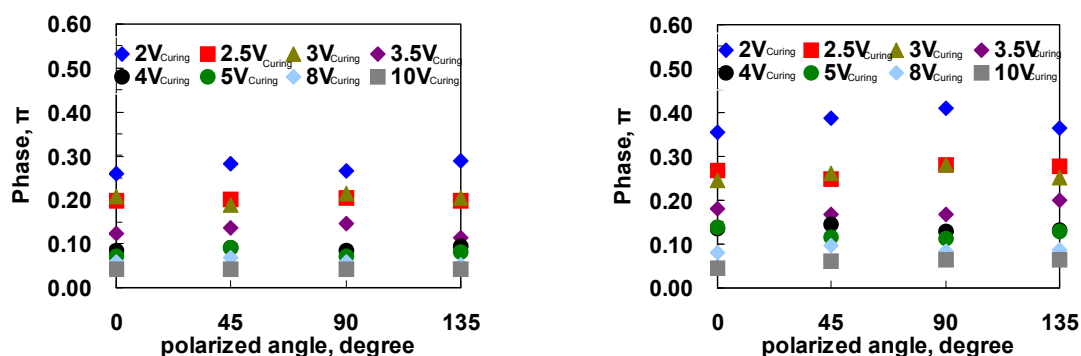


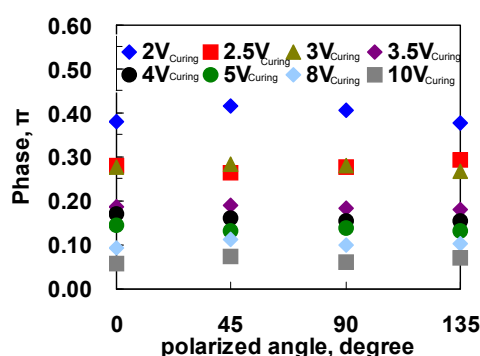
圖 5-9 不同外加電壓光聚合之 T-PNLC 與相位調制大小的關係

在 5.1.1 節，我們討論不同光聚合電壓之 T-PNLC 的電光特性，發現光聚合電壓大於 $2V_{rms}$ 之 T-PNLC 為高穿透態，所以這邊進一步討論大於 $2V_{rms}$ 之 T-PNLC 與相位移大小的關係，如圖 5-9。整體來說，光聚合電壓越高時，相位調制量越低，光聚合電壓 $2V_{rms}$ 最大有 0.37π 的相位調制，而 $10V_{rms}$ 時，相位調制量仍大於 0.05π ，因為光聚合電壓越高，使聚合物網絡往垂直方向鍵結的越多，液晶站的越直，所以相位調制量低。另外，光聚合電壓在 $2V_{rms}$ 與 $5V_{rms}$ 之間，相位移皆大於 0.1π ，跟一般剩餘型相位調制器比較，相位調制量只有在 0.01π 到 0.1π 之間，因此 T-PNLC 還有額外的雙層型相位調制造成相位移超過 0.1π 。

5.1.3 不同外加電壓光聚合之 T-PNLC 與偏振相關性的關係



(a)操作在 10V_{rms} 時之偏振相關性 (b)操作在 20V_{rms} 時之偏振相關性



(c)操作在 30V_{rms} 時之偏振相關性

圖 5-10 不同外加電壓光聚合之 T-PNLC 的偏振相關性

圖 5-10 為不同光聚合電壓時之 T-PNLC 與偏振相關性的關係，在光聚合電壓為 2V_{rms} 條件下，偏振相關性較大，實驗中量得在操作電壓 30V 時，偏光方向 $\theta_{po}=45^\circ$ 與 $\theta_{po}=135^\circ$ 有約 0.04π 的相位移。而光聚合時電壓為 2.5V_{rms} 與 3V_{rms} 之 T-PNLC，不管操作電壓 10V_{rms}、20V_{rms} 或 30V_{rms} 偏振相關性皆較小，且相位移調制量大，比較適合做相位的調制，因為當光聚合電壓為 2.5V_{rms} 或 3V_{rms} 時，T-PNLC 開始接近上下層為雙層型相位調制，中間層為剩餘相位型調制，再增加光聚合電壓，偏振相關性沒有太大影響，反而將使雙層型相位調制的有效厚度減小，影響相位調制的大小。

5.2 光聚合時溫度之效應

5.2.1 不同溫度光聚合之 T-PNLC 的電光特性

本節中，我們實驗不同光聚合時溫度對 T-PNLC 的電光特性及相位移之影響，將已灌好液晶混合物的樣品放置在已設定溫度之溫控台，照紫外光聚合 40 分鐘。製作條件：LC: M1: IRG = 94wt%: 5wt%:1wt%，光聚合時施加電壓為 $2.5V_{rms}$ 的 1kHz 方波，光聚合溫度分別設定為 $15^{\circ}C$ 、 $25^{\circ}C$ 、 $35^{\circ}C$ 、 $45^{\circ}C$ ，紫外光強度為 $1.27 mW/cm^2$ ，液晶盒厚度是 $7\mu m$ 。圖 5-11 為不同光聚合時溫度之 T-PNLC 的光穿透強度對電壓關係圖。當光聚合溫度在 $15^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$ 之間，光穿透强度高且施加電壓後強度幾乎維持不變，當光聚合時溫度增加至 $45^{\circ}C$ ，光穿透強度比純液晶低，具有強散射。圖 5-12(a)、圖 5-12(b) 為光聚合溫度 $45^{\circ}C$ 的 SEM 圖，由圖中顯示，由於光聚合溫度太高，聚合物網絡之聚合物球(polymer grain)會結成一大塊，導致光聚合溫度 $45^{\circ}C$ 條件製作的 T-PNLC，其入射光具有強散射。

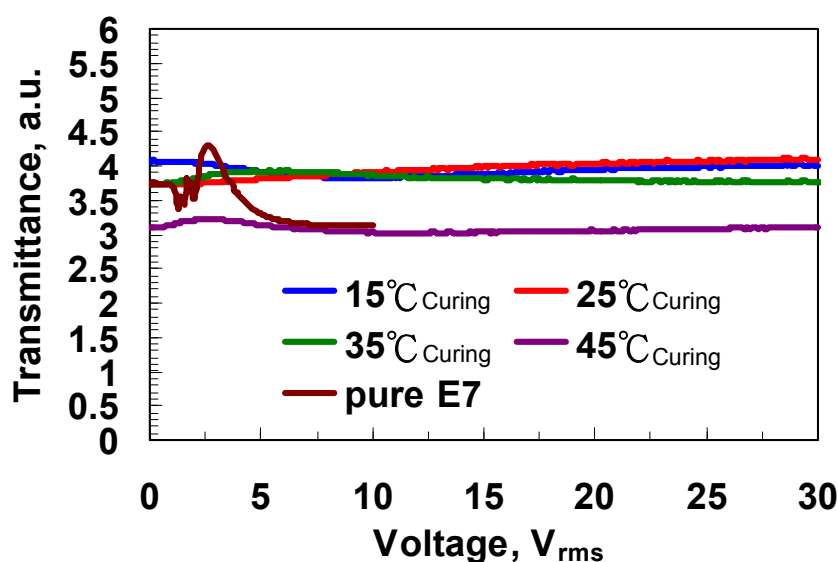
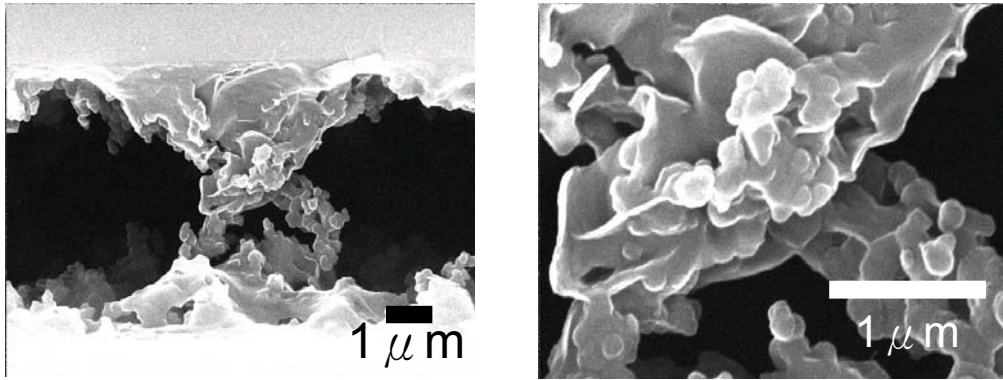


圖 5-11 不同溫度光聚合之 T-PNLC 的電光特性



(a) 聚合物網絡的垂直構造

(b) 聚合物球結成一大塊

圖 5-12 光聚合溫度 45°C 條件製作之 T-PNLC 的 SEM 圖

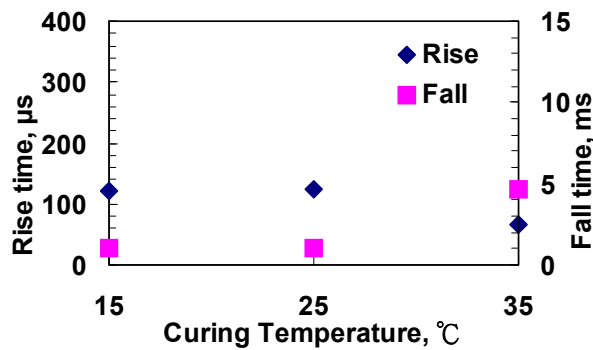


圖 5-13 不同溫度光聚合之 T-PNLC 的反應時間

圖 5-13 為不同光聚合溫度與反應時間的關係，由實驗結果得知，光聚合溫度為 15°C 時，上升時間約 120μs，下降時間約 1ms，當光聚合溫度增加到 35°C，反應時間有微幅變化，上升時間約 80μs，下降時間約 5ms，由於在低溫製作下，聚合物網絡較密，提供的回復力越大，所以不加電壓時液晶的下降時間稍微快，加電壓時液晶分子反而要克服聚合網絡的拉力，所以上升時間稍微變慢。

5.2.2 不同溫度光聚合之 T-PNLC 與相位調制大小的關係

在 5.2.1 節，我們討論不同光聚合溫度之 T-PNLC 的電光特性，當光聚合溫度在 $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 之 T-PNLC 為高穿透態，所以這邊進一步討論光聚合溫度小於 35°C 之 T-PNLC 與相位移大小的關係，如圖 5-14，結果得知，在操作電壓 $5V_{\text{rms}} \sim 15V_{\text{rms}}$ ，光聚合溫度越高，在飽和電壓之前相位移的變化較大，也就是光聚合溫度 35°C 在 $10V_{\text{rms}}$ 已有 0.23π 的相位移變化，而光聚合溫度 15°C 在 $15V_{\text{rms}}$ 才超過 0.23π 的相位移變化，這是因為光聚合溫度越高，則聚合物網絡較疏，液晶受到的錨定能較小，造成液晶分子驅動而旋轉的角度較多，所以相位移變化較大。

在 $30V_{\text{rms}}$ 的操作電壓下，光聚合溫度 15°C 、 25°C 、 35°C 的相位移變化為 0.28π 到 0.3π 之間，變化非常的小，所以改變光聚合溫度，同樣在 $30V_{\text{rms}}$ 的操作電壓下，不同光聚合溫度對 T-PNLC 的總相位移影響較小。

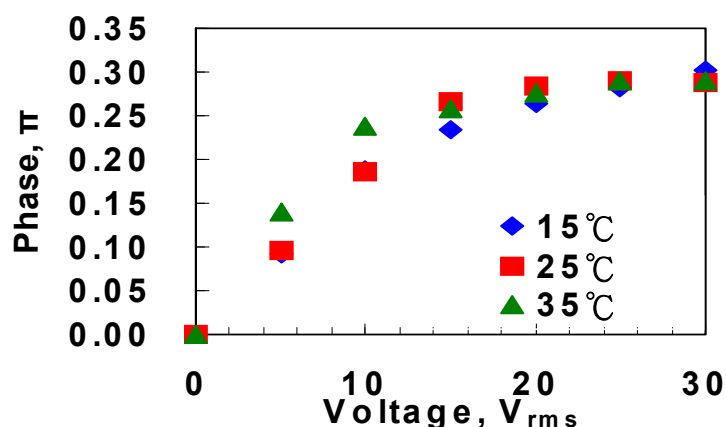
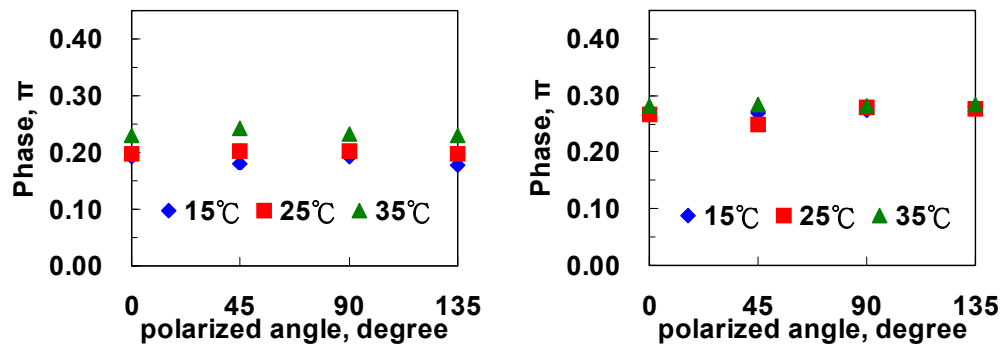
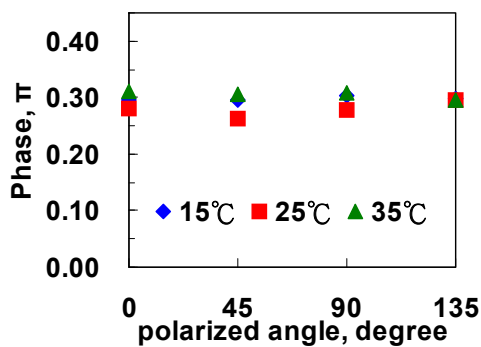


圖 5-14 不同溫度光聚合之 T-PNLC 與相位調制大小的關係

5.2.3 不同溫度光聚合之 T-PNLC 與偏振相關性的關係



(a)操作在 10V_{rms} 時之偏振相關性 (b)操作在 20V_{rms} 時之偏振相關性



(c)操作在 30V_{rms} 時之偏振相關性

圖 5-15 不同溫度光聚合之 T-PNLC 的偏振相關性

圖 5-15 為不同光聚合溫度時之 T-PNLC 與偏振相關性的關係，實驗中量得在光聚合溫度為 15°C~35°C 的 T-PNLC，不管操作電壓 10V_{rms}、20V_{rms} 或 30V_{rms}，皆有很低的偏振相關性。

5.3 改變液晶盒厚度之效應

5.3.1 不同液晶盒厚度之 T-PNLC 的電光特性

本節中，我們實驗不同液晶盒厚度對 T-PNLC 的電光特性影響，將液晶混合物灌好不同液晶盒厚度的樣品放置在已設定溫度之溫控台(選用的空液晶盒為 EHC 提供)，照紫外光聚合 40 分鐘。製作條件：LC: M1: IRG = 94wt%: 5wt%:1wt%，光聚合時施加電壓為 $2.5V_{rms}$ 的 1kHz 方波，液晶盒厚度分別為 $5\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ ，紫外光強度為 1.27 mW/cm^2 。圖 5-16 為不同液晶盒厚度之 T-PNLC 的光穿透強度對電壓關係圖。液晶盒厚度 $5\mu\text{m}$ 與 $7\mu\text{m}$ 的光穿透強度皆在純液晶盒的光穿透強度之間，因此為低散射之高穿透態，而液晶盒厚度增加會造成穿透光強度明顯下降，在液晶盒厚度 $15\mu\text{m}$ 時，由於散射程度強，所以 $15\mu\text{m}$ 製作之 T-PNLC 必須要先加偏壓超過 $30V_{rms}$ 至穿透態，或製作時增加光聚合電壓，才能做為一個偏振無關液晶相位調制器。

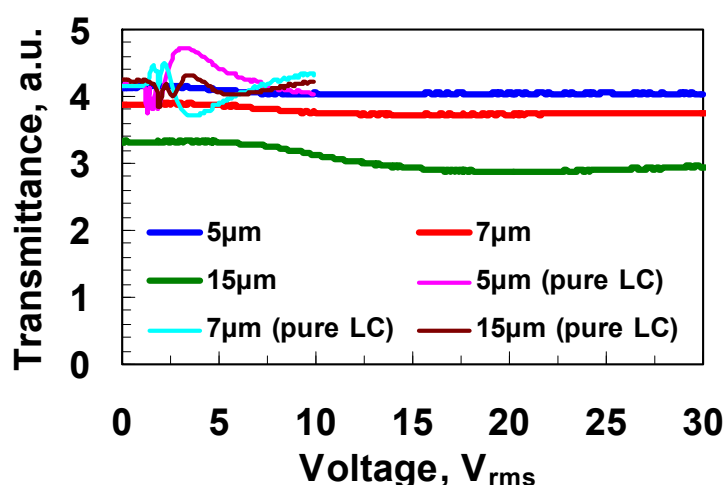


圖 5-16 不同液晶盒厚度之 T-PNLC 的電光特性

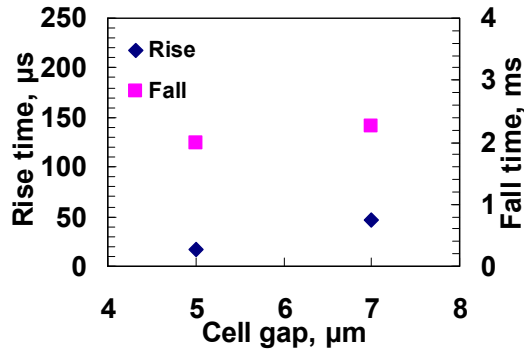


圖 5-17 不同液晶盒厚度之 T-PNLC 的反應時間

圖 5-17 為不同液晶盒厚度之 T-PNLC 的反應時間，我們發現在 $5\mu\text{m}\sim 7\mu\text{m}$ 之內反應時間變化不大，上升時間加下降時間皆在 2ms 左右。

5.3.2 不同液晶盒厚度之 T-PNLC 與相位調制大小的關係

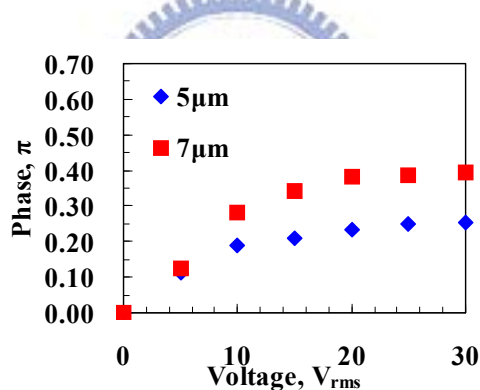
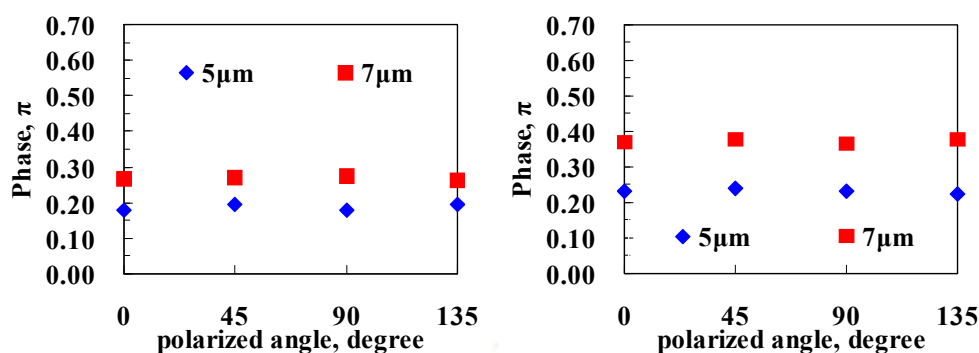


圖 5-18 不同液晶盒厚度之 T-PNLC 與相位調制大小的關係

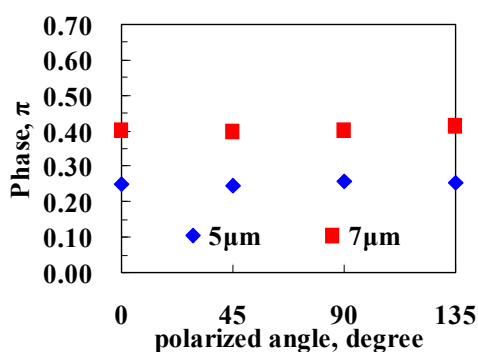
本節討論不同液晶盒厚度之 T-PNLC 與相位移大小的關係，如圖 5-18 所示，當液晶盒厚度增加，相位移變化會明顯增大，實驗結果顯示，操作電壓在 $30V_{\text{rms}}$ 下，液晶盒厚度 $5\mu\text{m}$ 有 0.25π 的相位移變化，將液晶盒改為 $7\mu\text{m}$ ，為 $5\mu\text{m}$ 的 1.4 倍厚，則相位移變化有 0.4π ，增加了將近 1.5 倍。因此，液晶盒厚度增大的確能增加 T-PNLC 的相位移調制量，但從 5.3.1 節中，我們也需要考慮到液晶盒厚度太厚會造成光散射。

5.3.3 不同液晶盒厚度之 T-PNLC 與偏振相關性的關係

圖 5-19(a)~(c)為不同液晶盒厚度之 T-PNLC 與偏振相關性的關係，實驗中量得增加液晶盒厚度，不管操作電壓為 $10V_{rms}$ 、 $20V_{rms}$ 或 $30V_{rms}$ ，偏振相關性皆很低。



(a)操作在 $10V_{rms}$ 時之偏振相關性 (b)操作在 $20V_{rms}$ 時之偏振相關性



(c) 操作在 $30V_{rms}$ 時之偏振相關性

圖 5-19 不同液晶盒厚度之 T-PNLC 的偏振相關性

5.4 斜向入射之相位移與偏振相關性

實際在用液晶相位調制器來做光的相位調制時，由於光在空氣中傳播時本身具有一個發散的角度，正向入射於液晶相位調制時發散的光線實屬斜向入射，因此斜向入射於偏振無關液晶相位調制器，其偏振

無關相位調制對於斜向入射可容忍的角度範圍也相當重要，本節中，我們討論當斜向入射於雙層型與 T-PNLC 的相位調制特性。

5.3.1 斜向入射於雙層構造液晶相位調制器

我們的雙層構造液晶相位調制器構造如圖 5-20 所示，液晶盒由玻璃基板內側鍍上 ITO 導電層，在導電層上再鍍上配向層(Polyimide)，並以摩擦處理配向層。液晶盒上下兩層液晶分子排列互相垂直，液晶盒每層間距(cell gap)為約 $7\mu\text{m}$ ，使用的液 E7($\Delta n=n_e-n_o=0.21$, Merck)。玻璃厚度為 0.7mm 。

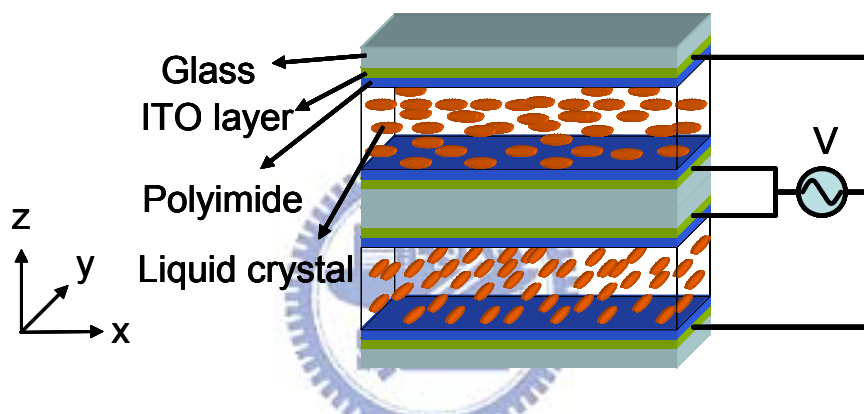


圖 5-20 雙層構造液晶相位調制器結構

我們將量測相位移之實驗裝置(圖 4-4)的偏光片移除使入射至雙層構造液晶相位調制器的光為非偏振光，當入射光與正向夾不同的角度下，相位移對電壓的關係如圖 5-21 所示。實驗結果中，斜向與正向入射的相位移變化不一致，另外當操作電壓為 $0 V_{\text{rms}}$ 至 $10 V_{\text{rms}}$ ，正向入射的相位移變化可達到 4.6π ，若用公式(3.7)來估計，若我們不考慮預傾角，則理論上的相位移變化為 4.64π ，與實驗值接近。

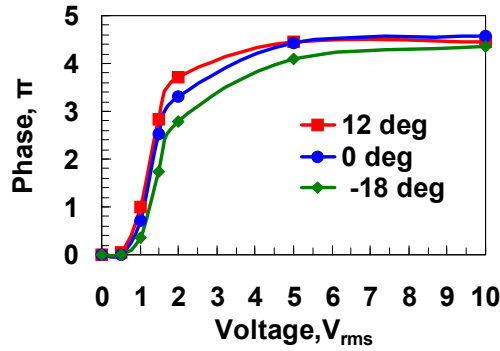
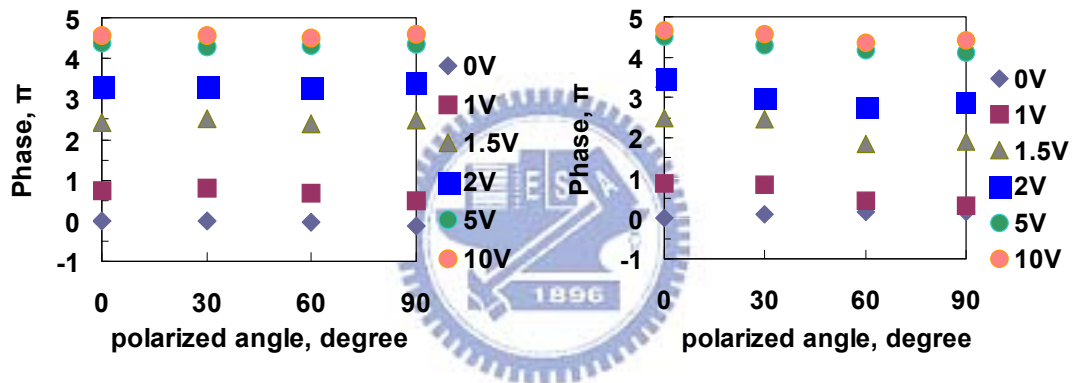


圖 5-21 非偏振光在各入射角的相位移-電壓圖(雙層型相位调制器)

圖 5-22(a)為雙層構造液晶相位调制器於不同的正向入射偏振光在各電壓下的相位移，實驗結果顯示，相位移與偏振方向無關。



(a)正向入射時之偏振相關性

(b)斜向入射時之偏振相關性

圖 5-22 偏振光在各電壓的相位移-偏振方向圖(雙層型相位调制器)

當入射光與正向方向夾角 18 度時，轉動偏光片，雙層構造液晶相位调制器在各電壓下相位移變化如圖 5-22(b)所示。結果顯示，相位移隨光的偏振方向不為定值，與圖 5-22(a)相比改變量較大，當偏振方向由 0 度到 90 度相位移變化可到 0.6π ，因此對斜向入射而言，雙層構造液晶相位调制器是偏振相關的。當電壓在大於臨界電壓 (threshold voltage)、小於飽和電壓之間，偏振相關性較大。

5.3.2 斜向入射於 T-PNLC

本節中，我們討論 T-PNLC 斜向入射之相位移大小與偏振相關性，首先討論用非偏振光測量不同入射角度的相位移特性，如圖 5-23 所示，量測樣品的製作條件為：光聚合電壓 $2.5V_{rms}$ ，光聚合溫度 $25^{\circ}C$ ，液晶盒厚度 $7\mu m$ (美相製)。由實驗結果發現，在同樣操作電壓為 $30V_{rms}$ ，正向入射有 0.28π 的相位移變化，比斜向+12 度入射的相位移變化 0.23π 還多，比斜向-18 度入射的 0.34π 還少，而在正負七度內相位移變化較小，因此，用在雷射指向(laser beam steering)的應用上，對光源的光發散角容忍度約為七度以內，所以一般雷射光都適用。(由於實際上雷射光點為圓形，所以我們將 cell 旋轉 90 度，量測正負七度內的相位移變化，並將結果放在附錄 A，證明 T-PNLC 在上下左右七度內的相位移變化皆較小)。

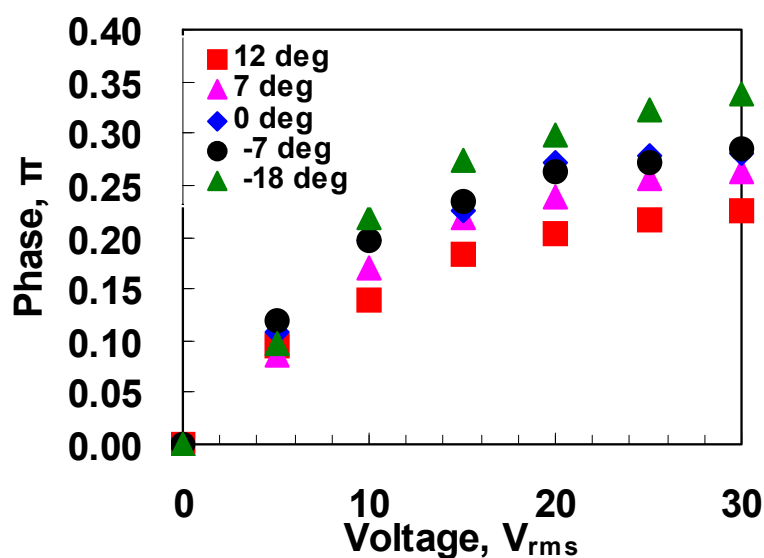
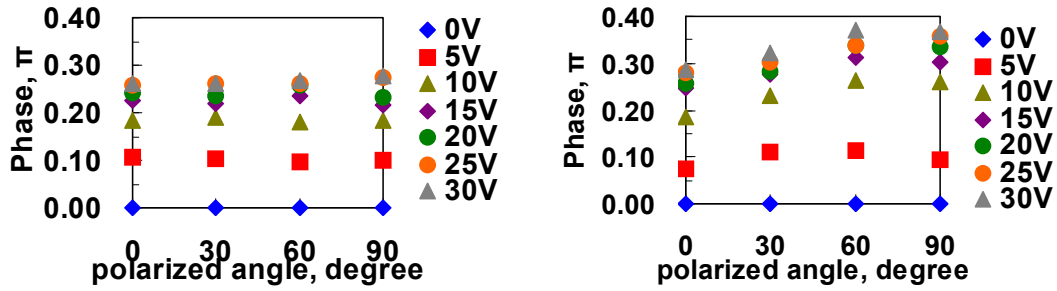


圖 5-23 非偏振光在各入射角的相位移-電壓圖(T-PNLC)

接下來討論 T-PNLC 斜向入射的偏振相關性。圖 5-24(a)為 T-PNLC 於不同的正向入射偏振光在各電壓下的相位移，實驗結果顯示，相位

移與偏振方向無關。

當入射光與正向方向夾角 18 度時，轉動偏光片，T-PNLC 在各電壓下相位移變化如圖 5-24(b)所示。結果顯示，偏振方向 0 度與 90 度相位移變化可到 0.08π ，因此對斜向入射而言，T-PNLC 是偏振相關的。



(a)正向入射時之偏振相關性

(b)斜向入射時之偏振相關性

圖 5-24 偏振光在各電壓的相位移-偏振方向圖(T-PNLC)

最後，圖 5-25 為同樣操作電壓在 $30V_{rms}$ 下，不同角度的入射光之偏振相關性，根據實驗結果，我們提出 T-PNLC 的模型，並做一些光學分析，可用來計算 T-PNLC 中雙層型與剩餘相位型所佔的厚度及液晶的平均預傾角、以及其他各項參數，理論與分析結果則留在第六章討論(附錄 A 另外補上 45 度角線偏振光於斜向入射的相位移特性)。

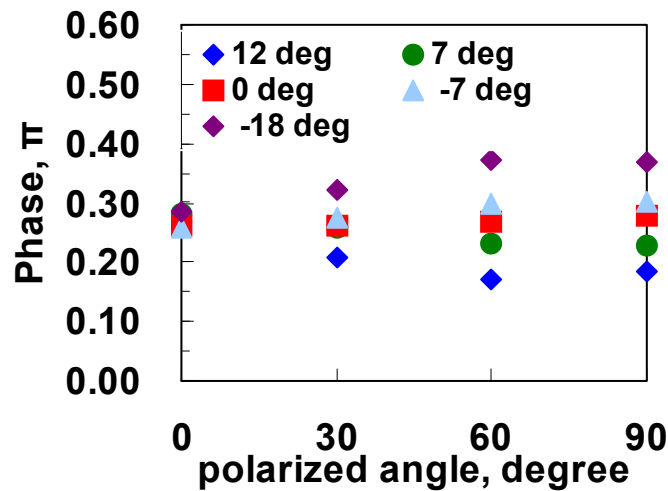


圖 5-25 當 $V=30V_{rms}$ ，偏振光在各入射角的相位移-偏振方向圖

第 6 章 實驗結果討論

6.1 結果整理

根據第五章的實驗結果，我們將各項參數，包括光聚合電壓、光聚合溫度、液晶盒厚度對 T-PNLC 的相位移大小與偏振相關性的影響整理成表格，其中偏振相關性定義為

$\frac{\langle |\phi_{po} - \langle \phi \rangle| \rangle}{\langle \phi \rangle} \times 100\%$ ， $\langle \phi \rangle$ 為相位移

的平均， ϕ_{po} 為各種偏振態的相位移大小， $\langle |\phi_{po} - \langle \phi \rangle| \rangle$ 為取各種

$\phi_{po} - \langle \phi \rangle$ 的絕對值後再做一次平均。表格如下：

液晶盒：美相生產 光聚合溫度：25°C Cell gap: 7 μ m

光聚合電壓	高穿透態	上升時間 (0~30V)	下降時間 (0~30V)	相位移大小 (0~30V)	偏振相關性 30V
0V	X	>500 μ s	>20ms		
2V	0~30V	111.9 μ s	1.002ms	0.39 $\pi \pm 0.016\pi$	4.1%
2.5V	0~30V	123.1 μ s	1.059ms	0.28 $\pi \pm 0.008\pi$	3.0%
3V	0~30V	129.0 μ s	1.222ms	0.28 $\pi \pm 0.007\pi$	2.5%
3.5V	0~30V	104.9 μ s	2.650ms	0.19 $\pi \pm 0.005\pi$	2.4%
4V	0~30V	71.27 μ s	4.418ms	0.16 $\pi \pm 0.006\pi$	4.1%
5V	0~30V	83.4 μ s	4.704ms	0.14 $\pi \pm 0.007\pi$	5%
8V	0~30V	79.04 μ s	4.970ms	0.1 $\pi \pm 0.004\pi$	4.3%
10V	0~30V	84.71 μ s	4.916ms	0.07 $\pi \pm 0.007\pi$	9.6%

表 6-1 不同光聚合電壓對各項參數影響之整理

液晶盒：美相生產 光聚合電壓： $2.5V_{rms}$ Cell gap: $7\mu m$

光聚合溫度	高穿透態	上升時間 (0~30V)	下降時間 (0~30V)	相位移大小 (0~30V)	偏振相關性 30V
15°C	0~30V	121.7 μs	1.083ms	$0.3\pi \pm 0.003\pi$	1%
25°C	0~30V	123.1 μs	1.059ms	$0.28\pi \pm 0.008\pi$	3.0%
35°C	0~30V	66.69 μs	4.678ms	$0.3\pi \pm 0.007\pi$	2.3%
45°C	X	X	X	X	X

表 6-2 不同光聚合時溫度對各項參數影響之整理

液晶盒：日本 EHC 生產 光聚合電壓： $2.5V_{rms}$ 光聚合溫度： $25^\circ C$

液晶盒厚度	高穿透態	上升時間 (0~30V)	下降時間 (0~30V)	相位移大小 (0~30V)	偏振相關性 30V
5 μm	0~30V	17.36 μs	1.999ms	$0.25\pi \pm 0.004\pi$	1.4%
7 μm	0~30V	46.27 μs	2.252ms	$0.4\pi \pm 0.005\pi$	1.2%
15 μm	X	X	X	X	X

表 6-3 不同液晶盒厚度對各項參數影響之整理

由實驗結果中，我們得知 T-PNLC 的相位移大小主要由光聚合電壓所控制，當光聚合電壓超過 $4V_{rms}$ ，可調制相位移越小，且偏振相關沒有明顯減小，反應時間(上升時間+下降時間)維持在 4ms~5ms 左右，而光聚合電壓減小到 $2V_{rms}$ ，雖然可調相位移大，反應速度快，但偏振相關性較高。由於光聚合電壓 $2.5V_{rms}$ 來製作 T-PNLC 可同時兼顧反應速度(1~1.5ms)、相位移大小(0.28π)與偏振相關性(<4%)，因此對偏振無關液晶相位調制器而言，實用性較大。

對於不同光聚合溫度，雖然 T-PNLC 在 $15^\circ C \sim 35^\circ C$ 之間的相位移調制量皆在 0.28π 與 0.3π 之間，但 $15^\circ C$ 與 $25^\circ C$ 製作 T-PNLC 有較快的反應時間。

增加液晶盒厚度可增加相位移大小，但厚度太厚(如 $15\mu\text{m}$)會造成強散射，還需要調整一些參數，像是增加光聚合電壓或增加偏壓至 T-PNLC 為穿透態，才可達到偏振無關相位調制。

6.2 T-PNLC 光學分析與模擬

在本節中，我們提出 T-PNLC 模型，並用光學分析斜向入射光之相位移大小，最後根據斜向入射與正向入射實驗結果來計算 T-PNLC 內雙層型區域與剩餘相位型區域的液晶分子之平均預傾角、等效厚度、相位調制量等各項參數，幫助我們更加了解 T-PNLC。

入射光為 TM 波---不加電壓下($V=0$)：

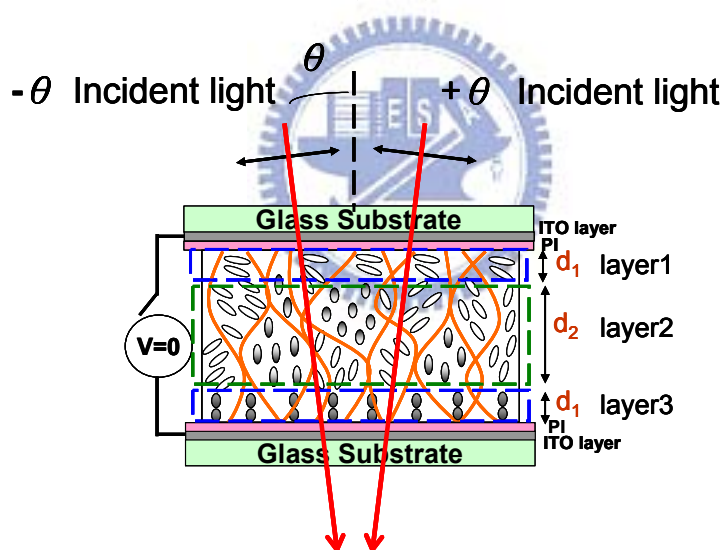


圖 6-1 正負角斜向入射的 TM 光入射於不施加電壓之 T-PNLC

T-PNLC 的上下層靠近玻璃基板的液晶分子由於配向層的錨定能形成雙層型相位調制，中間層液晶分子則具有一個相同預傾角隨機地倒在聚合物網絡中，形成剩餘相位型調制，先考慮兩道入射角分別為 $+\theta$ 與 $-\theta$ 之斜向入射光，如圖 6-1 所示，當兩道入射光為 TM 波時， $+\theta$ 角的入射光與 $-\theta$ 角的入射光經過 T-PNLC 的相位移變化分別為

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},+\theta_{\text{Layer1}}}(\theta_{\text{pre}}) \cdot d_{\text{Layer1},+\theta}(\theta_{\text{pre}}, d_1) + \phi_{\text{Layer2}} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o \cdot d_{\text{Layer3}} \quad (6.1)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},-\theta_{\text{Layer1}}}(\theta_{\text{pre}}) \cdot d_{\text{Layer1},-\theta}(\theta_{\text{pre}}, d_1) + \phi_{\text{Layer2}} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o \cdot d_{\text{Layer3}} \quad (6.2)$$

(6.1)式與(6.2)式的第一項代表光經過第一層雙層型區域(layer1)所增加之相位，第二項代表光經過第二層剩餘相位型區域(layer2)入射光所增加之相位，第三項代表光經過第三層雙層型區域(layer3)入射光所增加之相位。

其中 $+\theta$ 角的入射光進入第一層雙層型區域所看到液晶之等效折射率 $n_{\text{eff},+\theta_{\text{Layer1}}}$ 與 $-\theta$ 角的入射光看到之等效折射率 $n_{\text{eff},-\theta_{\text{Layer1}}}$ 不同，且 $n_{\text{eff},+\theta_{\text{Layer1}}}$ 與 $n_{\text{eff},-\theta_{\text{Layer1}}}$ 個別跟 $+\theta$ 角和 $-\theta$ 角的入射光在第一層雙層型區域之折射角有關，而要計算入射光進入第一層雙層型區域的折射角，就必須先知道雙層型區域內液晶分子的預傾角，所以 $n_{\text{eff},+\theta_{\text{Layer1}}}$ 與 $n_{\text{eff},-\theta_{\text{Layer1}}}$ 為預傾角 θ_{pre} 的函數。另外 $+\theta$ 角和 $-\theta$ 角的入射光在第一層雙層型區域所行經的距離 $d_{\text{Layer1},+\theta}$ 與 $d_{\text{Layer1},-\theta}$ ，也與光在第一層雙層型區域的折射角度(為 θ_{pre} 的函數)和厚度 d_1 有關，所以 $d_{\text{Layer1},+\theta}$ 為預傾角 θ_{pre} 和厚度 d_1 的函數。

當 $+\theta$ 角的 TM 入射光與 $-\theta$ 角的 TM 入射光到達第二層剩餘相位型區域，由於剩餘相位型內之液晶分子具有一個相同的傾角，且隨機分佈在聚合物網絡中，因此 $+\theta$ 角入射光與 $-\theta$ 角入射光所增加的相位相同，這邊簡寫為 ϕ_{Layer2} 。

最後 $+\theta$ 角的 TM 入射光與 $-\theta$ 角的 TM 入射光到達第三層雙層型區域，看到液晶分子的等效折射率為 n_o ，所以光在第三層雙層型區域行經之距離皆為 d_{Layer3} 。

入射光為 TM 波---施加高電壓後($V \gg V_{th}$) :

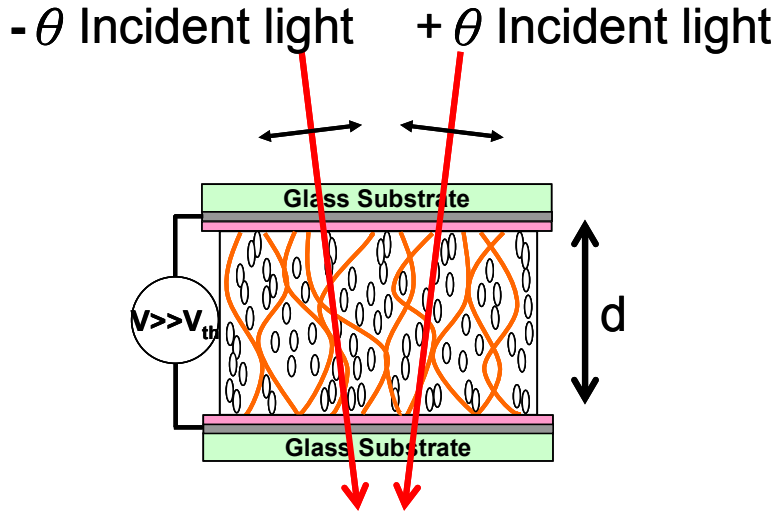


圖 6-2 正負角斜向入射的 TM 光入射於施加高電壓之 T-PNLC

當施加一個高電壓於 T-PNLC，如圖 6-2 所示，由於三層內(雙層型區域+剩餘相位型區域)的液晶分子完全站直，因此+ θ 角的入射光與- θ 角的入射光經過 T-PNLC 的相位移變化同樣為

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}(V \gg V_{th}) \cdot d \quad (6.3)$$

入射光為 TM 波---不加電壓與施加高電壓之相位差：

將(6.1)式與(6.2)式分別減去(6.3)式，我們可以得到在不加電壓與施加高電壓之間，+ θ 角的 TM 入射光與- θ 角的 TM 入射光經過 T-PNLC 的相位移變化各別為：

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,+\theta_{Layer1}}(\theta_{pre}) \cdot d_{Layer1,+\theta}(\theta_{pre}, d_1) + \phi_{Layer2} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o \cdot d_{Layer3} - \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}(V \gg V_{th}) \cdot d \quad (6.4)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,-\theta_{Layer1}}(\theta_{pre}) \cdot d_{Layer1,-\theta}(\theta_{pre}, d_1) + \phi_{Layer2} + \frac{2\pi}{\lambda} n_o \cdot d_{Layer3} - \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}(V \gg V_{th}) \cdot d \quad (6.5)$$

我們再將(6.4)式減去(6.5)式，我們發現+ θ 角的 TM 入射光與- θ 角的 TM 入射光在同樣不施加電壓操作下，已具有一個相位移變化：

$$\frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{eff},+\theta_{\text{Layer1}}}(\theta_{\text{pre}}) \cdot d_{\text{Layer1},+\theta}(\theta_{\text{pre}}, d_1) - n_{\text{eff},-\theta_{\text{Layer1}}}(\theta_{\text{pre}}) \cdot d_{\text{Layer1},-\theta}(\theta_{\text{pre}}, d_1)) \quad (6.6)$$

在實驗中，我們可以量出(6.6)式之相位移大小，我們可以藉由預先假設第一層雙層型區域內液晶分子之平均預傾角 θ_{pre} ，即可求出雙層型區域的厚度 d_1 ，由於 2 倍 d_1 不能超過液晶盒厚度，因此可能的預傾角 θ_{pre} 有第一道限制。

再由雙層型區域的厚度 d_1 與其預傾角 θ_{pre} 經由正向入射(3.7)式 $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pre}}) - n_o)$ 求出雙層型區域貢獻的相位移，由於此數值必須符合小於實驗中量測之不加電壓與施加高電壓之間正向入射的總相位移大小，因此可能的預傾角 θ_{pre} 有第二道限制。

求出正向入射的相位移大小後，由實驗量測操作在高電壓下，將正向入射之總相位移減去計算出來的雙層型區域提供之相位移，我們可以經由公式(3.8)與公式(3.11)求出剩餘相位型區域中，液晶分子的平均預傾角與此區貢獻的相位移大小，由於剩餘相位型液晶相位調制器之相位移大小，實驗中不會超過 0.1π ，因此可能的預傾角 θ_{pre} 還具有第三道限制。

根據預傾角 θ_{pre} 有三道的限制，我們最後可以得到雙層型區域液晶分子的平均預傾角、相位移大小及雙層型區域的厚度，另外也能得知剩餘相位型區域液晶分子的平均預傾角、相位移大小及剩餘相位型區域的厚度。

入射光為 TE 波

當入射光為 TE 波，不加電壓下如圖 6-3， $+\theta$ 角的入射光與 $-\theta$ 角的入射光經過 T-PNLC 的相位移變化同樣為

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_o \cdot d_{Layer1} + \phi_{Layer2} + \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} \cdot d_{Layer3} \quad (6.7)$$

其中 d_{Layer1} 為光經過第一層雙層型區域之距離， ϕ_{Layer2} 為光經過第二層剩餘相位型區域增加之相位， d_{Layer3} 為光經過第三層雙層型區域之距離，而看到的 n_{eff} 與第三層雙層型區域液晶分子之預傾角有關。

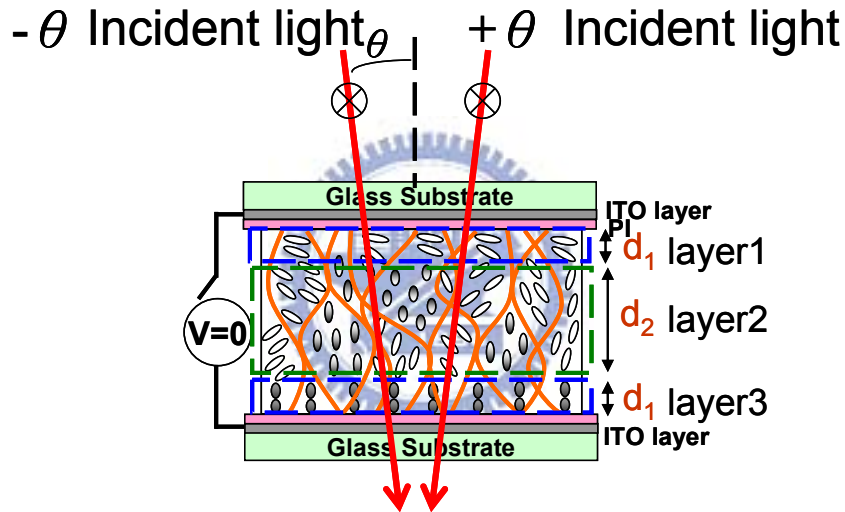


圖 6-3 正負角斜向入射的 TE 光入射於不施加電壓之 T-PNLC

當加高電壓後，液晶分子完全站直，如圖 6-4 所示，此時 $+\theta$ 角的入射光與 $-\theta$ 角的入射光經過 T-PNLC 的相位移變化同樣為

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}(V \gg V_{th}) \cdot d \quad (6.8)$$

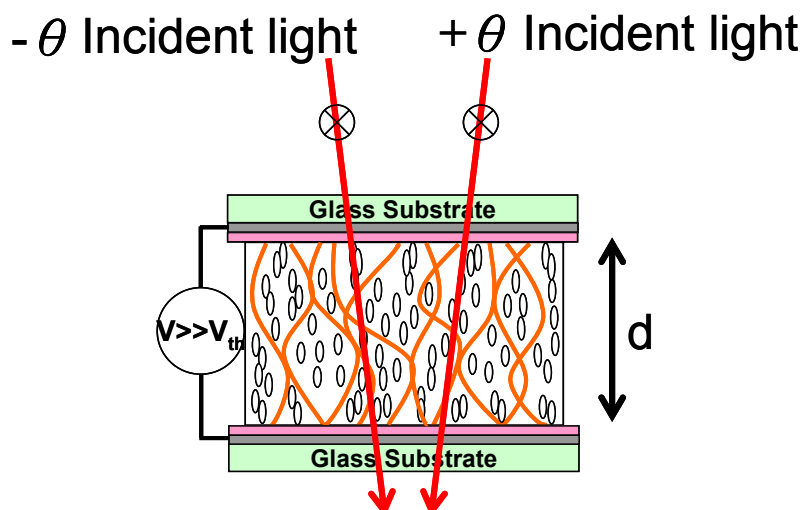


圖 6-4 正負角斜向入射的 TE 光入射於施加高電壓之 T-PNLC

因此，在不加電壓與加高電壓之間， $+\theta$ 角的入射光與 $-\theta$ 角的入射光經過 T-PNLC 的相位移變化同樣為

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_o \cdot d_{Layer1} + \phi_{Layer2} + \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} \cdot d_{Layer3} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} (V \gg V_{th}) \cdot d \quad (6.9)$$

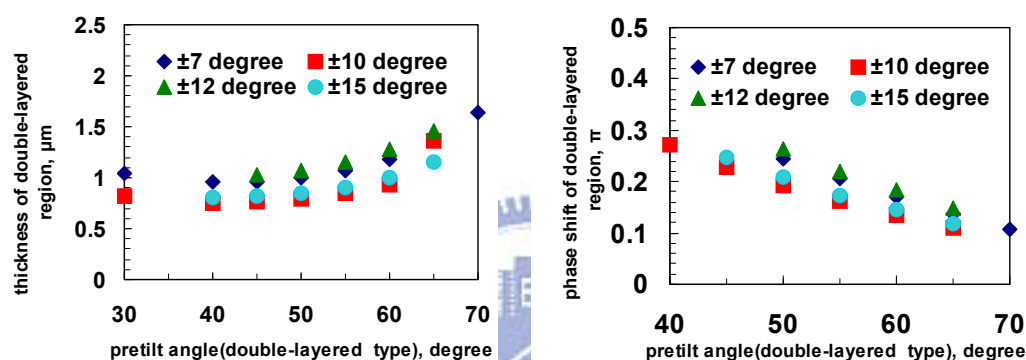
所以 $+\theta$ 角的 TE 入射光與 $-\theta$ 角的 TE 入射光在同樣不加電壓下，沒有相位移的變化。

從第五章最後的實驗結果(圖 5-25)中，同樣操作在 $30V_{rms}$ 之高電壓下(相位移參考點為 $0V_{rms}$)，我們可發現當入射光偏振方向為 0 度角時，不同角度的入射光相位移大小皆相同，所以入射光偏振方向 0 度為 TE 波，而當入射光偏振方向為 90 度角時， $+\theta$ 角的入射光與 $-\theta$ 角的入射光經過 T-PNLC 具有一個相位移變化，所以偏振方向 90 度之入射光為 TM 波，所以下一節我們用實驗中量到操作在 $30V_{rms}$ 之高電壓下， $\pm\theta$ 角入射之 TM 波具有的相位移變化來作分析。

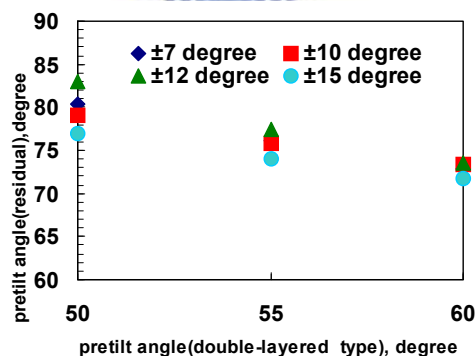
6.3 結果分析

我們用製作條件為：光聚合電壓 $2.5V_{\text{rms}}$ 、光聚合溫度 25°C 、液晶盒厚度 $7\mu\text{m}$ 的 T-PNLC，量測 4 組斜向入射 TM wave 之相位移，和正向入射相位移，來計算 T-PNLC 的內部各項參數：

首先假設雙層型區域內，液晶分子之所有可能的預傾角來計算雙層型區域的厚度，經過第一道預傾角的限制，可以縮小雙層型區域液晶分子可能的預傾角至 30 度~70 度，如圖 6-5(a)所示：



(a) 模擬雙層型區域的厚度 (b) 正向入射光之雙層型相位移模擬



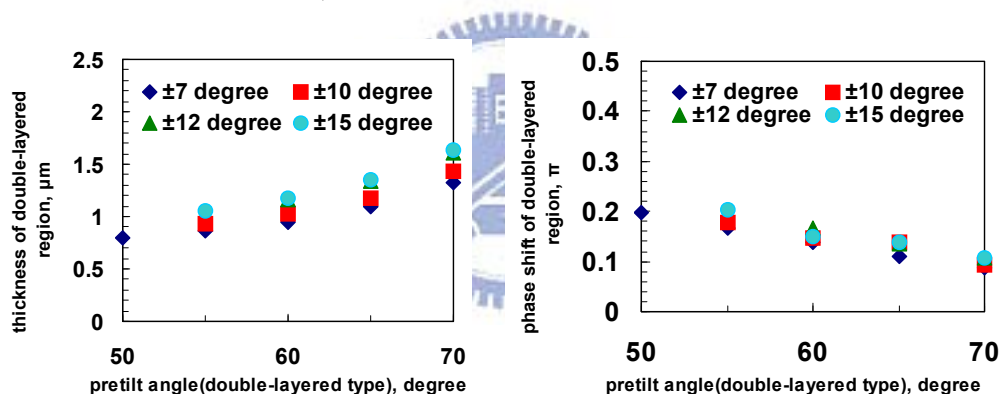
(c) 模擬剩餘相位型區域液晶分子的預傾角

圖 6-5 模擬計算光聚合電壓 $2.5V_{\text{rms}}$ 製作之 T-PNLC 的各項參數

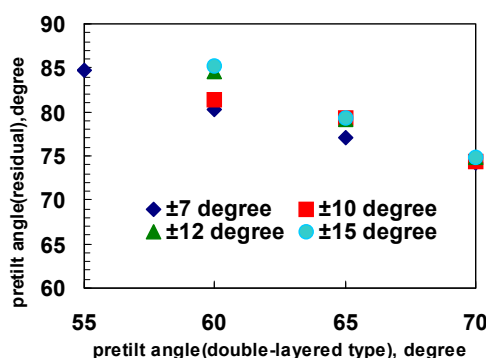
計算出第一層雙層型區域可能的厚度後，可以計算雙層型區域貢獻的相位調制大小，再經過第二道預傾角的限制，可以再度縮小雙層型區域液晶分子可能的預傾角至 40 度~70 度，如圖 6-5(b)所示：

最後由雙層型區域貢獻的相位移大小，可以計算剩餘相位型區域液晶分子的預傾角，經由第三道預傾角的限制，最後我們得到雙層型區域液晶分子的預傾角約 50~60 度，如圖 6-5(c)。反推雙層型區域的厚度約 $0.9\mu\text{m}\sim 1.1\mu\text{m}$ ，也得知剩餘相位型區域液晶分子的預傾角約 73~83 度。我們發現模擬計算出來的預傾角大，原因主要是在製作 T-PNLC 時有施加一個電壓，因此製作完 T-PNLC 後液晶分子具有高預傾角，另外也由於 T-PNLC 具有高預傾角的緣故，臨界電壓也比較低。

我們再以製作條件為：光聚合電壓 $4V_{\text{rms}}$ 、光聚合溫度 25°C 、液晶盒厚度 $7\mu\text{m}$ 的 T-PNLC，量測 4 組斜向入射 TM wave 之相位移，和正向入射相位移，來計算 T-PNLC 的內部各項參數：



(a) 模擬雙層型區域的厚度 (b) 正向入射光之雙層型相位移模擬



(c) 模擬剩餘相位型區域液晶分子的預傾角

圖 6-6 模擬計算光聚合電壓 $4V_{\text{rms}}$ 製作之 T-PNLC 的各項參數

同樣我們先假設所有可能的預傾角計算第一層雙層型區域厚度，如圖 6-6(a)。再由第一層雙層型區域厚度計算雙層型區域貢獻的正向入射光之相位調制量，如圖 6-6(b)，由雙層型區域的相位調制量再計算出剩餘相位型之預傾角，如圖 6-6(c)所示，最後我們得到雙層型區域液晶分子的預傾角約 60~70 度，反推雙層型區域的厚度 $1\mu\text{m}\sim 1.5\mu\text{m}$ ，也得知剩餘相位型區域液晶分子的預傾角約 73~83 度。

我們發現光聚合電壓 $4V_{\text{rms}}$ 條件下製作之預傾角比光聚合電壓 $2.5V_{\text{rms}}$ 的預傾角還高，這是因為光聚合電壓越高，會造成聚合物網絡較垂直玻璃基板方向鍵結，使液晶分子的預傾角更大，所以我們提出的 T-PNLC 模擬模型，由光聚合電壓 $2.5V_{\text{rms}}$ 與 $4V_{\text{rms}}$ 的模擬結果來看，相當符合實驗的現象。



第 7 章 結果與展望

我們開發出一種偏振無關相位調制器 T-PNLC，其機制結合了雙層型偏振無關液晶相位調制與剩餘型偏振無關液晶相位調制，其電控相位移大小介於剩餘相位型與雙層型之間，且操作之前不需額外偏壓，與剩餘型相位調制器相比，T-PNLC 具有相位調制量大之優勢，而與雙層型相位調制器相比，T-PNLC 製作過程相對簡單許多，且反應時間一般較為快速。

論文中我們研究光聚合電壓、光聚合溫度、液晶盒厚度及光入射角等因素對電光特性及相位移特性之影響，要增加 T-PNLC 之電控相位移大小，可藉由降低光聚合電壓、增加液晶盒厚度，但光聚合電壓太低會導致相位移與偏振方向相關，液晶盒厚度太厚會導致光穿透強度衰減。實驗中，當液晶盒厚度為 $7\mu\text{m}$ ，其相位調制器在施加 $30 V_{\text{rms}}$ 電壓下可達到 0.28π 之相位變化，液晶反應速度快 $\sim 1.5\text{ms}$ ，且為偏振無關相位調制，若需要進一步提高 T-PNLC 之反應時間，則可選擇降低光聚合溫度來製作。另外我們的 T-PNLC 在入射光與正向夾角正負 7 度內，其電控相位與光的偏振方向無關。但是，當入射光與正向方向夾角變大時($>$ 正負 7 度)，T-PNLC 相位移與光的偏振方向相關性變大，由實驗結果顯示，當入射光與正向方向夾角 18 度且固定電壓在 $2V_{\text{rms}}$ 時，轉動偏光片，相位移可偏差到 0.08π 。在 Laser beam steering 應用上，雷射光束的發散角大多小於正負 7 度，因此，T-PNLC 對於一般 Laser beam steering 的應用上，可說是與光的偏振方向無關。

對於斜向入射於 T-PNLC 的實驗中，我們提出一個以光學分析 T-PNLC 模型的方法，可以得知 T-PNLC 中雙層型區域與剩餘相位型區域所佔的厚度、液晶的平均預傾角及雙層型區域與剩餘相位型區域

提供的相位調制大小。由模擬計算的結果，我們發現製作 T-PNLC 由於光聚合時需要外加一個電壓，使 T-PNLC 中雙層型區域與剩餘相位型區域的液晶分子在光聚合之後，已具有一個大預傾角度(>50 度)，因此臨界電壓低(<5V_{rms})。

實驗過程中，我們發現一些問題及現象，需更深入的研究：

- (1) 可調制相位移大小還不夠大，雖然可應用在微液晶透鏡，但要應用到液晶透鏡裡相位移調制量至少需要 2π 。
- (2) 在紫外光照射 T-PNLC 時，其相分離的過程和機制還不明，需要再深入研究。
- (3) 不同單體濃度、不同紫外光強度對 T-PNLC 電光特性、相位移大小與偏振相關性的影響還尚未討論。
- (4) 我們使用的液晶盒皆為右旋 TN，若再加入具有左旋性的分子，是否能再提升 T-PNLC 的相位移大小，需要進一步實驗證明。

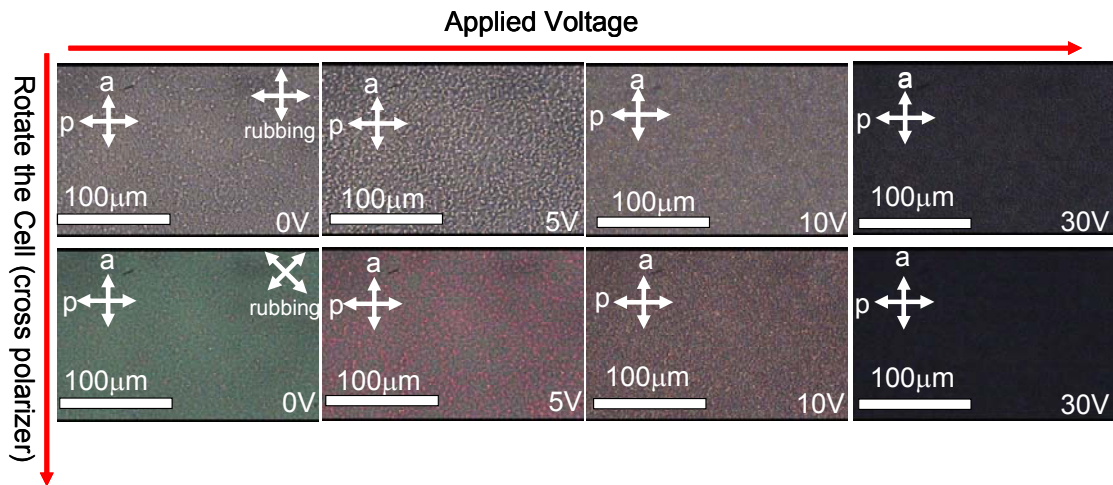
由於偏振無關液晶相位調制不需額外偏振片，光效率高，且能應用在液晶透鏡、電控光柵、雷射指向、空間相位調制器，甚至是 3D 立體影像的顯現，在光電領域的應用層面廣，所以偏振無關液晶相位調制器為將來重要的研究項目，日後若能再提升 T-PNLC 液晶相位調制器的相位調制量，並且維持相位移與偏振無關，必定能對光電領域帶來一大突破。

參考文獻

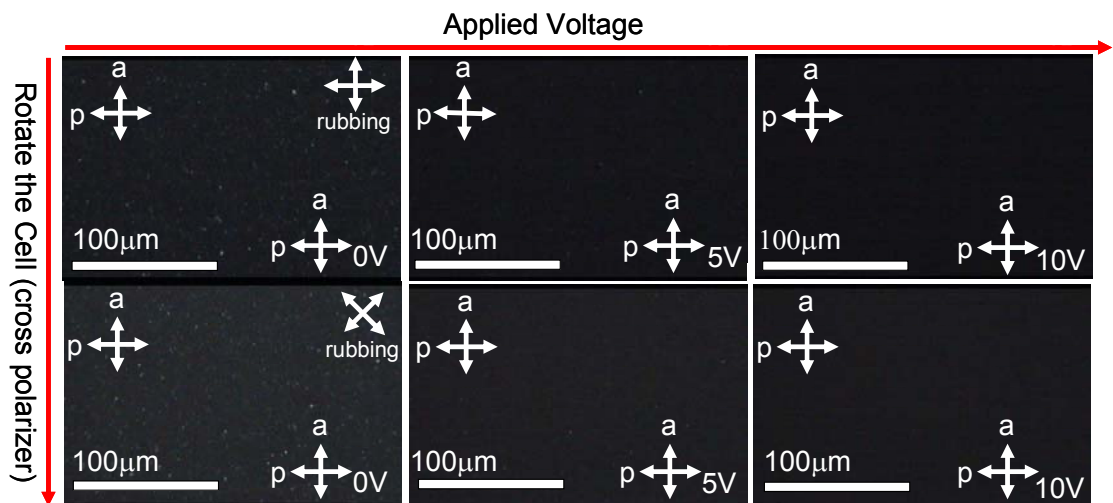
- [1]H. Ren, Y. H. Fan, S. Gauza, and S.T. Wu, “Tunable-focus flat liquid crystal spherical lens”, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 4789 (2004)
- [2]Y. H. Lin, H. Ren, K. H. Fang-Chiang, W. K. Choi, S. Gauza, X. Zhu, and S.T. Wu, “Tunable-focus cylindrical liquid crystal lenses”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 243(2005).
- [3]H. Ren, Y. H. Fan, and S. T. Wu, “Prism grating using polymer-stabilized liquid crystal”, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3168 (2003).
- [4]Gregory Kreymerman, “Liquid crystal diffractive phase grating as light modulator for projection display”, *Optical Engineering* **45**, 116202 (2006)
- [5]McManamon P.F., T.A. Dorschner, D.L. Corkum, L.J. Friedman, D.S. Hobbs, M Holz, S. Liberman, H.Q. Nguyen, D.P. Resler, R.C.Sharp, and E.A. Watson, “Optical phased array technology”, *Proceedings of the IEEE* **84**, 268 (1996)
- [6]Y. H. Fan, Y. H. Lin, H. Ren, and S. Gauza, “Fast-response and scattering-free polymer network liquid crystals for infrared light modulators”, *Appl. Phys. Lett.* **84** 1233 (2004).
- [7]Y. H. Wu, Y. H. Lin, Y. Q. Lu, H. Ren, Y. H. Fan, J. R. Wu, and S. T. Wu, “Submillisecond response variable optical attenuator based on sheared polymer network liquid crystal” *Opt. Express* **12**, 6377 (2004)
- [8]J. L. West, Guoqiang Zhang, Yurii Reznikov, and Anatoliy Glushchenko, “Fast Birefringent Mode of Stressed Liquid Crystal” , *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 031111 (2005)
- [9]Y. H. Lin, H. Ren, and S. T. Wu, “Liquid Crystals Today”, **17**, 2 (2008)
- [10]P. G. de Gennes, and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, (Clarendon Press, Oxford 1993)

- [11]P. Yeh, and C. Gu, *Optics of liquid crystal displays*, (Wiley Interscience, 1999)
- [12]D. K Yang, and S. T. Wu, *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* (Wiley Interscience, 2005)
- [13]H. Ren, Y. H. Lin, and S. T. Wu, “Polarization-independent and fast-response phase modulators using double-layered liquid crystal gels”, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 061123(2006)
- [14]Y. H. Lin, H. Ren, Y. H. Wu, Y. Zhao, J. Fang, Z. Ge, and S. T. Wu, “Polarization-independent liquid crystal phase modulator using a thin polymer-separated double-layered structure”, *Opt. Express* **13**, 8746 (2005)
- [15]Y. H. Lin, H. Ren, Y. H. Fan, Y. H. Wu, and S. T. Wu
“Polarization-independent and fast-response phase modulation using a normal-mode polymer-stabilized cholesteric texture”, *J. Appl. Phys.* **98**, 043112 (2005)
- [16]H. Ren, Y. H. Lin, Y. H. Fan, and S. T. Wu, “Polarization-independent phase modulation using a polymer-dispersed liquid crystal”, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 141110 (2005)
- [17]H. Ren, Y. H. Lin, C. H. Wen, and S. T. Wu
“Polarization-independent phase modulation of a homeotropic liquid crystal gel”, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 191106 (2005)

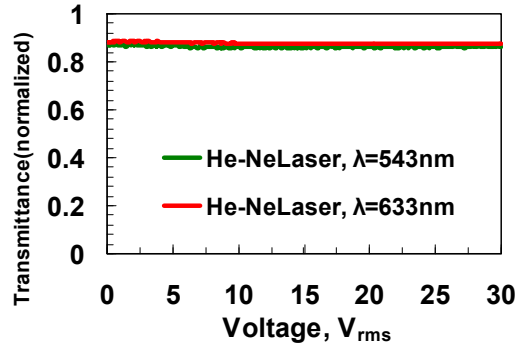
附錄 A



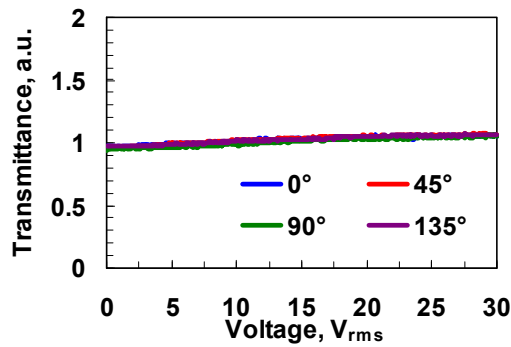
圖表 A-1 顯微鏡觀察光聚合電壓 $0V_{\text{rms}}$ 下製作之 T-PNLC 的型態，當旋轉樣品或加電壓可以看到有顏色變化，代表此條件製作之 T-PNLC 為偏振相關，且不加電壓時有 TN 正常白 (Normally White) 的現象，另外也可以看出由於添加聚合物網絡而出現一區一區 domain 的構造。



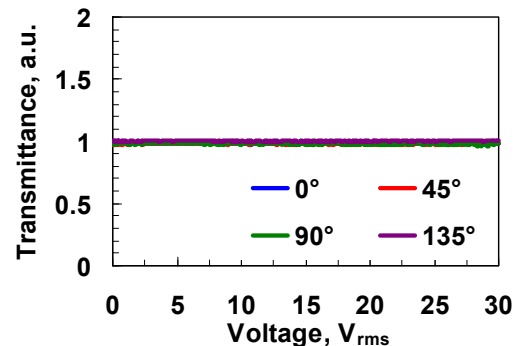
圖表 A-2 顯微鏡觀察光聚合電壓 $4V_{\text{rms}}$ 下製作之 T-PNLC 的型態，當旋轉樣品或加電壓結果皆為暗態，代表此時 T-PNLC 為偏振無關，且液晶幾乎為站直的狀態。



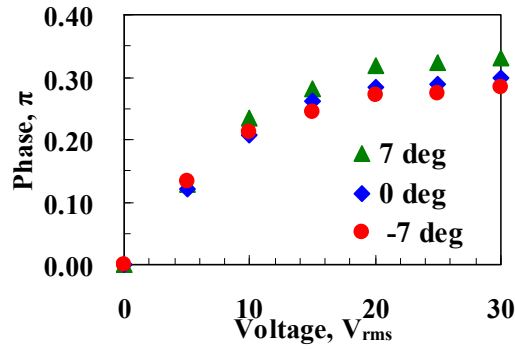
圖表 A-3 光聚合電壓 $2.5V_{rms}$ 下，分別用綠光氦氖雷射與紅光氦氖雷射量測 T-PNLC 的穿透率對電壓之關係圖，其中綠光與紅光個別用不加液晶盒 detector 量到的光強度做 Normalized，實驗結果顯示，兩曲線幾乎一致，代表在紅光到綠光範圍內，波長不影響 T-PNLC 的穿透率大小。



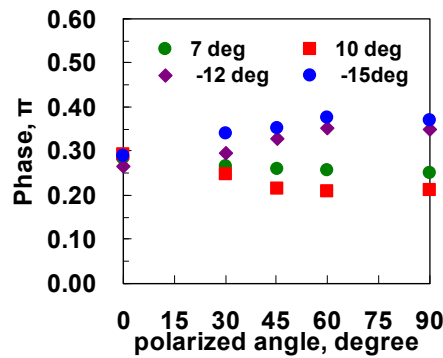
圖表 A-4 光聚合電壓 $2.5V_{rms}$ 下製作之 T-PNLC 的穿透光強度對電壓關係圖，其中穿透率不隨施加電壓或入射光偏振態而變



圖表 A-5 光聚合電壓 $4V_{rms}$ 下製作之 T-PNLC 的穿透光強度對電壓關係圖，其中穿透率不隨施加電壓或入射光偏振態而變



圖表 A-6 我們將 cell 旋轉 90 度，量測正負七度內非偏振光的相位移變化，結果顯示 T-PNLC 在上下七度內的相位移變化較小。



圖表 A-7 當 $V=30V_{rms}$ ，偏振光在各入射角的相位移-偏振方向圖(樣品製作條件為光聚合電壓 $2.5V_{Curing}$ 、光聚合溫度 $25^{\circ}C$ 、液晶盒厚度 $7\mu m$)，可看出 45 度線偏振光的相位調制大小介於 0 度與 90 度之間。