

國立交通大學

理學院應用科技學程

碩士論文

電控變焦液晶透鏡之特性探討

A Study of Electrically Tunable-Focusing
Liquid Crystal Lenses

研究生：蔡威弘

指導教授：林怡欣 助理教授

中華民國九十九年六月

電控變焦液晶透鏡之特性探討

A Study of Electrically Tunable-Focusing Liquid Crystal Lenses

研 究 生：蔡威弘

Student：Wei-Hung Tsay

指導教授：林怡欣 助理教授

Advisor：Prof. Yi-Hsin Lin

國 立 交 通 大 學

理學院應用科技學程

碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Applied Science and Technology

College of Science

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Degree Program of Applied Science and Technology

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

電控變焦液晶透鏡之特性探討

研究生：蔡威弘

指導教授：林怡欣 助理教授

國立交通大學理學院應用科技學程

摘要

我們探討電控變焦液晶透鏡的電光特性，其電控變焦的原理為利用一個從邊緣到中央漸弱的不均勻電場，使液晶旋轉排列成梯度分佈，產生空間中拋物線的折射率分佈，不同的電壓造成不同的拋物線曲度，達到透鏡變焦的效果。本論文首先介紹液晶材料的物理參數，接下來透過液晶透鏡的文獻，瞭解液晶透鏡的基本分類與圓孔電極液晶透鏡的歷史演進，並選擇最基礎的圓孔電極結構之液晶透鏡進行電控焦距、反應時間與溫度效應的探討，尤其是溫度效應在文獻上討論甚少。由實驗結果得知在 25°C 至 60°C 之間，可以利用溫度來改善反應時間，且不影響變焦範圍。

A Study of Electrically Tunable-Focusing Liquid Crystal Lenses

Student: Wei-Hung Tsay

Advisor: Prof. Yi-Hsin Lin

Degree Program of Applied Science and Technology

College of Science

National Chiao Tung University



Abstract

We study the electro-optic properties of electrically tunable-focusing liquid crystal (LC) lenses. A spatially inhomogeneous electric field which decreases gradually from the edge to the center makes the gradient-rotation distribution of LC molecules to produce parabolic distribution of refractive indices. The principle of electrically tunable-focusing is that the curvature of the distribution of refractive indices can be changed by applied voltages. In this thesis, we introduce the physical parameters of LC materials and survey literatures of LC lenses. Then, we select a LC lens with hole-patterned electrode to study the focal length, response time, and temperature effect of the LC lens. From the experimental results, we can improve the response time by increasing temperature and the focusing properties remain similar between the temperature of 20°C and 60°C.

誌謝

邊工作邊讀書的三年碩士學程，一路走來相當辛苦，能夠堅持到最後，需要感謝很多關心和支持我的人。

首先誠摯感謝林怡欣老師的指導，不僅教導我們做研究的態度與方法，還有做人處事的道理，特別是在我工作失意與挫折之後，給予鼓勵，提供許多經驗讓我參考，並且教導我如何善用自已的優缺點，努力振作，重新規畫人生。也謝謝師丈吳勇勳博士的關心和鼓勵。

最感謝妻子宋幸茹，無論遇到什麼困難，都一直陪在我身邊，不斷地給予支持，甚至最後扛起家計，打理一切生活，無怨無悔地付出，為的就是讓我能專心完成論文。

感謝實驗室的同學們分享寶貴的知識，特別是弘峻學長，協助我解決許多實驗方面的問題。感謝雨時、宏山，每次與你們討論總有新的想法。感謝威志、春祥、青樺、炯寬、俊霖、庭玉、宗翰、俊宏、鈺智、明璿、致維、詩雅、歆茹、文柔，為苦悶的生活帶來歡笑。

感謝父母親、岳父母無限的關懷與叮嚀。感謝弟弟威至在我十分疲倦時擔任返鄉的司機。感謝同學愛堂、維瑩、建文和冠博給予精神上的支持、鼓勵。

特別感謝陳永富老師在課堂上給予許多關於學習的啟發與建議。要感謝的人太多，無法在此一一謝過，僅以這本論文和你們分享。

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	IX
第 1 章 簡介	1
1.1 液晶簡介[1].....	1
1.1.1 液晶種類與分子結構[2-3].....	1
1.1.2 液晶之物性	3
1.2 液晶透鏡簡介	6
1.2.1 液晶透鏡的種類.....	7
1.2.2 圓孔電極之液晶透鏡的歷史演進.....	12
1.3 研究動機	16
第 2 章 理論與模擬	18
2.1 液晶分子在電場下的轉動	18
2.2 焦距計算	22
2.3 反應時間	26
2.4 溫度效應[32, 38-39]	28

2.5	液晶透鏡模擬與分析	31
2.5.1	2DimMOS 模擬	31
2.5.2	計算與分析	33
第 3 章	實驗架設與量測	36
3.1	樣品準備	36
3.2	實驗架設與量測	37
第 4 章	實驗結果與分析討論	40
4.1	折射率分佈	40
4.2	電控焦距	43
4.2.1	不同孔徑之液晶透鏡比較	43
4.2.2	不同液晶層厚度之液晶透鏡比較	45
4.3	反應時間	46
4.3.1	實驗結果	46
4.3.2	分析與討論	47
4.4	溫度效應	50
4.4.1	溫度對最短焦距的影響	50
4.4.2	溫度對反應時間的影響	51
4.4.3	結果與討論	52
第 5 章	結論與未來展望	54
	參考文獻	57

圖目錄

圖 1-1	5CB 液晶分子結構(○：H、●：C、●：N)	2
圖 1-2	假想棒狀液晶分子	2
圖 1-3	液晶分子排列結構的種類	3
圖 1-4	向列型液晶指向	4
圖 1-5	液晶的三種形變	4
圖 1-6	e-ray 與 o-ray 經過液晶分子所看到的折射率	5
圖 1-7	有效折射率	6
圖 1-8	凸透鏡聚焦示意圖	7
圖 1-9	GRIN 透鏡聚焦示意圖	7
圖 1-10	液晶透鏡的分類	8
圖 1-11	彎曲電極與透鏡形狀的液晶層之液晶透鏡結構圖[6]	8
圖 1-12	模態控制液晶透鏡之結構圖[9]	9
圖 1-13	模態控制液晶透鏡之等效電路[9]	10
圖 1-14	圓孔電極液晶透鏡之結構圖[11]	10
圖 1-15	彎曲電極的液晶透鏡之結構圖[15]	11
圖 1-16	透鏡形狀液晶層的液晶透鏡之結構圖[18]	11
圖 1-17	梯度分佈的 PNLC 之液晶透鏡製作原理[20]	12
圖 1-18	圓孔電極的液晶透鏡之歷史演進[11-14, 21-22]	12
圖 1-19	可移動焦點的液晶透鏡結構圖[12]	13

圖 1-20	雙層液晶的透鏡結構[13]	14
圖 1-21	雙驅動電壓液晶透鏡之結構圖[14]	14
圖 1-22	四層液晶層的液晶透鏡之結構圖[21]	15
圖 1-23	1.5 倍光學變焦系統架構圖[22]	16
圖 2-1	圓孔電極的液晶透鏡之結構圖(a)上視圖(b)剖面圖	18
圖 2-2	液晶層電位分佈示意圖	19
圖 2-3	電場分佈示意圖	19
圖 2-4	電場迫使液晶旋轉的示意圖	19
圖 2-5	液晶層跨壓與液晶分子旋轉最大角度圖	21
圖 2-6	不均勻電場下，液晶分子的轉動分佈	22
圖 2-7	拋物線折射率分佈示意圖	22
圖 2-8	折射率為 n_c 的薄透鏡	24
圖 2-9	液晶透鏡穿透分佈的亮暗條紋	25
圖 2-10	二次曲線方程式 Fitting	26
圖 2-11	雙折射率與溫度的關係圖	29
圖 2-12	黏滯係數與溫度的關係圖	30
圖 2-13	彈性係數與溫度的關係圖	30
圖 2-14	τ_0 與溫度的關係圖	31
圖 2-15	2DimMOS 的模擬視窗	32
圖 2-16	x-z 平面的液晶層(a)未施加電壓(b)運算過程(c)運算停止	33

圖 2-17	y 方向的相位延遲分佈模擬.....	34
圖 2-18	x 方向的相位延遲分佈模擬.....	34
圖 2-19	電壓對 x-y 方向焦距的關係圖.....	35
圖 2-20	在電壓 $90V_{rms}$ 下，液晶的指向排列	35
圖 3-1	樣品結構圖	37
圖 3-2	兩穿透軸正交的偏光片下觀察液晶透鏡之實驗架設.....	38
圖 4-1	不同電壓下，樣品#2 的穿透度分佈之亮暗條紋.....	41
圖 4-2	y 方向的相位延遲分佈實驗結果.....	42
圖 4-3	x 方向的相位延遲分佈實驗結果.....	42
圖 4-4	樣品#2 的模擬與實驗比較圖.....	43
圖 4-5	不同孔徑大小的液晶透鏡，電壓對焦距曲線之模擬結果圖.....	44
圖 4-6	不同孔徑大小的液晶透鏡，電壓對焦距曲線之實驗結果圖.....	45
圖 4-7	不同液晶層厚度的液晶透鏡，電壓對焦距曲線之比較.....	45
圖 4-8	不同孔徑之液晶透鏡的反應時間.....	46
圖 4-9	不同液晶層厚度之液晶透鏡的反應時間.....	47
圖 4-10	麥克詹達干涉儀架設圖	48
圖 4-11	干涉條紋	49
圖 4-12	溫度對最短焦距的實驗結果.....	51
圖 4-13	溫度對下降時間的實驗結果.....	52
圖 5-1	液晶透鏡與柯克三合鏡.....	56

表目錄

表 3-1	液晶材料參數表	36
表 3-2	樣品的尺寸	37
表 3-3	儀器列表	38
表 4-1	不同孔徑大小的液晶透鏡之最短焦距與操作電壓	45
表 4-2	量測反應時間的操作方式	46
表 4-3	液晶透鏡之干涉量測結果	50



第1章 簡介

1.1 液晶簡介[1]

液晶是一種介於固體與液體之間的物質，分子有方向性排列且具雙折射率。在 1888 年，液晶初次被奧地利植物學家 Friedrich Reinitzer 發現，他觀察自己合成的安息香酸膽石醇隨溫度升降所產生的相變化現象，不同於一般物質，溫度升至 145°C 時固態轉變成液態卻呈現糊狀，到了 179°C 仍為液態但變透明。後來德國物理學者 Lehmann 用 POM (Polarized Optical Microscope) 觀察，確定此物質是有方向性排列的組織且具有雙折射率特性。

1.1.1 液晶種類與分子結構[2-3]

液晶依生成因素可分為兩類，溶致型液晶(Lyotropic Liquid Crystal)和熱致型液晶(Thermotropic Liquid Crystal)。前者大多存在生物體中，溶入適當的溶劑後，會因濃度變化而形成液晶態。後者則是隨溫度變化而形成液晶態，由於電光特性佳，經常用於基礎研究與應用，例如最常見的液晶顯示器(Liquid Crystal Display，簡稱 LCD)。

一般常用的液晶分子為圖 1-1 的 5CB (5 Carbons & Benzenes) 結構，至少 2 個以上的苯環結構組成分子的硬段，產生光軸，5 碳鏈的部份組成軟段，因此可將整個液晶分子假想成圖 1-2 的棒狀。

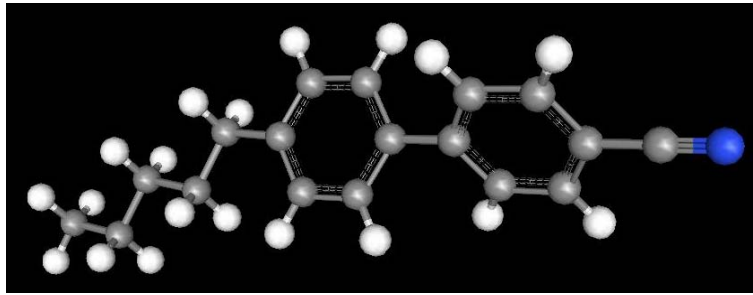


圖 1-1 5CB 液晶分子結構(○：H、●：C、●：N)

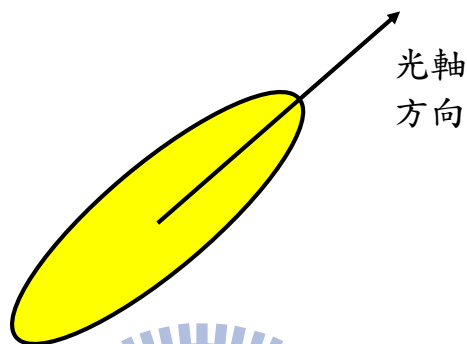


圖 1-2 假想棒狀液晶分子

若是依液晶分子排列結構來分類，基本上可分為：(1)向列型、(2)層列型與(3)膽固醇型，如圖 1-3 所示。向列型液晶(Nematic Liquid Crystal)分子大致上朝同一方向平行排列，但分子質心任意分佈，光軸方向即是分子排列的平均方向。層列型液晶(Smectic Liquid Crystal)分子除了平行排列之外，多了層層排列的規則性。膽固醇型液晶(Cholesteric Liquid Crystal)又稱為旋光向列型液晶(Chiral Nematic Liquid Crystal)，每一層分子排列如同向列型液晶，只是各分子的光軸繞著與光軸垂直的方向旋轉，形成有旋光特性的結構。

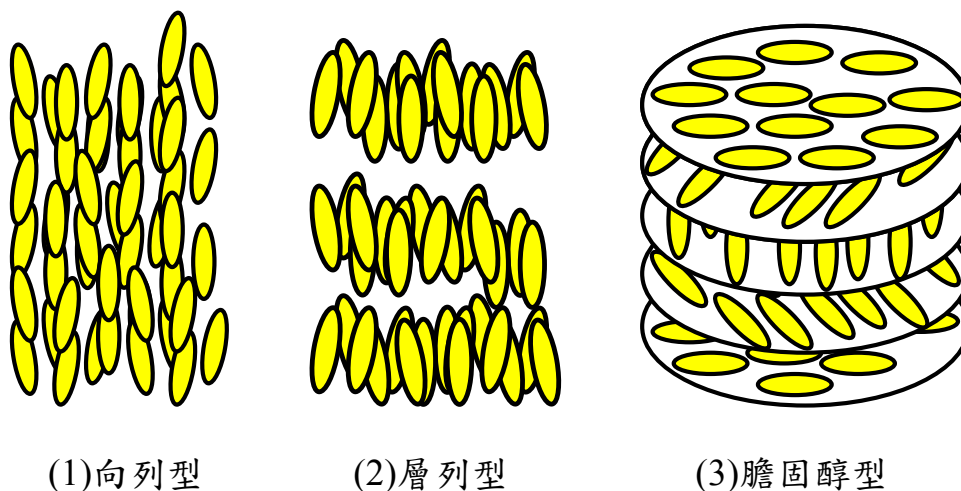


圖 1-3 液晶分子排列結構的種類

向列型液晶與其它二類比較，因分子間作用力小、黏度也較小且易於轉動，故向列型液晶材料應用較廣泛。

1.1.2 液晶之物性

(1)秩序參數：

液晶是有方向性排列的組織，為了描述其排列的整齊程度，可以使用秩序參數 S

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle \quad (1-1)$$

θ 為液晶分子與平均方向的夾角，如圖 1-4 所示， n 為液晶分子平均指向(Director)。 $S=0$ ，分子等方向性排列； $S=1$ ，分子則是完美地朝同一方向排列。

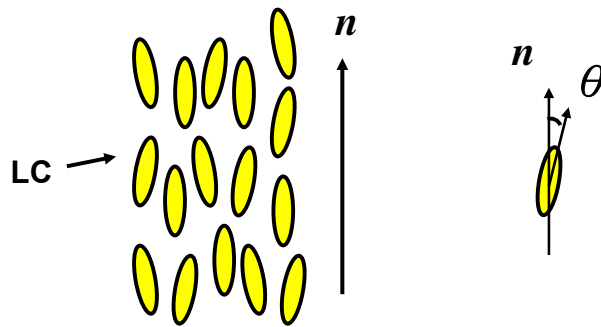


圖 1-4 向列型液晶指向

(2)彈性連續體理論：

理想的向列型液晶分子朝同一方向排列，但是在實際的情況下，受到配向層、外加電場等外界影響，液晶分子排列會產生具有彈性回復力的形變，由於這樣的形變是分子點對點的連續變化，可視為彈性的連續體，分為三種形變：(1)展曲(Splay)、(2)扭曲(Twist)與(3)彎曲(Bend)，如圖 1-5 所示。

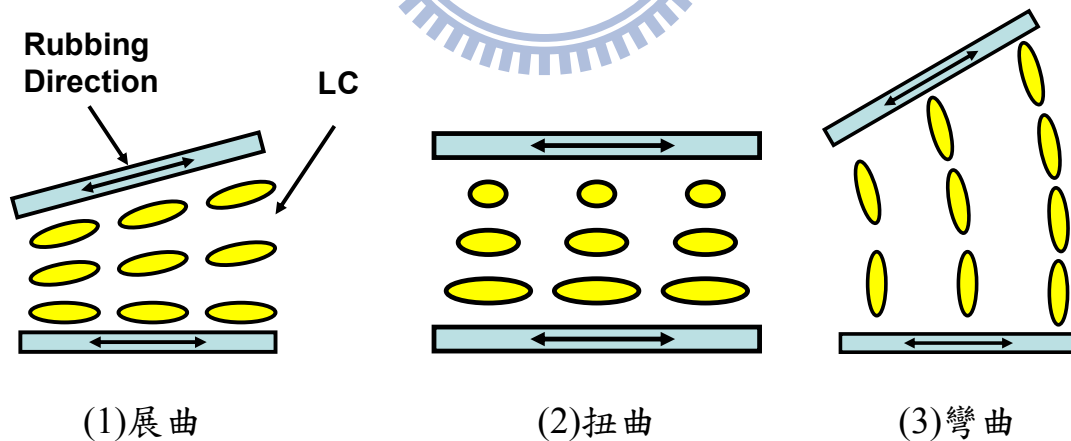


圖 1-5 液晶的三種形變

此三種形變的彈性係數(Elastic Constants)分別以 k_{11} 、 k_{22} 與 k_{33} 表示。

(3)介電異方性(Dielectric Anisotropy)：

當外加電場時，液晶排列產生形變，光學性質也產生變化，主要

是受到介電異方性所影響。分子光軸與電場方向平行時，介電常數為 $\varepsilon_{//}$ ，與電場方向垂直時為 ε_{\perp} ，其介電異方性可表示

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp} \quad (1-2)$$

$\Delta\varepsilon > 0$ 稱為正型液晶， $\Delta\varepsilon < 0$ 稱為負型液晶。

(4) 雙折射率(Birefringence)：

液晶分子為單軸晶體(Uniaxial Crystal)，折射率呈現橢圓分佈，有兩個不同的折射率 n_e 和 n_o ， n_e 為異常光(Extraordinary Ray，簡稱 e-ray，其電場振動方向與分子光軸平行)看到的折射率， n_o 為通常光(Ordinary Ray，簡稱 o-ray，其電場振動方向與分子光軸垂直)看到的折射率，如圖 1-6 所示，因此液晶的雙折射率 Δn 為

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (1-3)$$

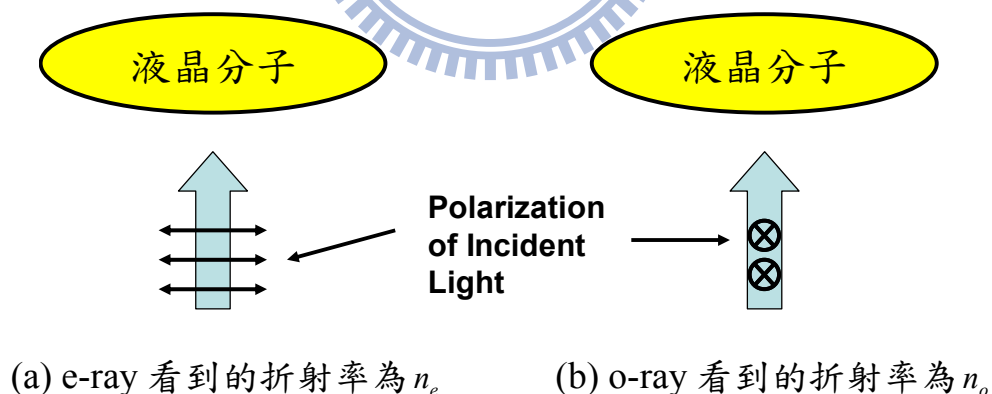


圖 1-6 e-ray 與 o-ray 經過液晶分子所看到的折射率

當入射光偏振方向與液晶光軸夾一個角度 θ 時，可以藉由(1-4)式計算出有效折射率 $n_{eff}(\theta)$ ，如圖 1-7 所示

$$n_{eff}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}} \quad (1-4)$$

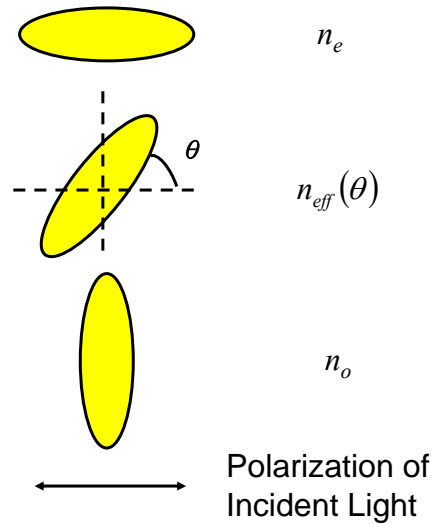


圖 1-7 有效折射率

(5)旋轉黏滯係數(Rotational Viscosity Coefficient)：

液晶分子於動態旋轉時，會受到反向黏滯阻力，與旋轉角速度 $\frac{d\theta}{dt}$ 成正比，此比例常數為分子旋轉的黏滯係數 γ_1 ，而黏滯阻力對液晶產生的力矩 τ_v 可表示成

$$\tau_v = -\gamma_1 \frac{d\theta}{dt} \quad (1-5)$$

1.2 液晶透鏡簡介

我們先來瞭解固態透鏡(Solid Lens)聚焦的基本原理，圖 1-8 為凸透鏡(Convex Lens)聚焦的示意圖，凸透鏡折射率為 n ，半徑為 r ，厚度為 $d(r)$ ，由中心向邊緣逐漸減少，入射光通過透鏡後，與中心的光線產生相位差(Phase Difference) $\Delta\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} nd(r)$ ，使波前(Wavefront)彎曲向焦點收斂而聚焦[4]。

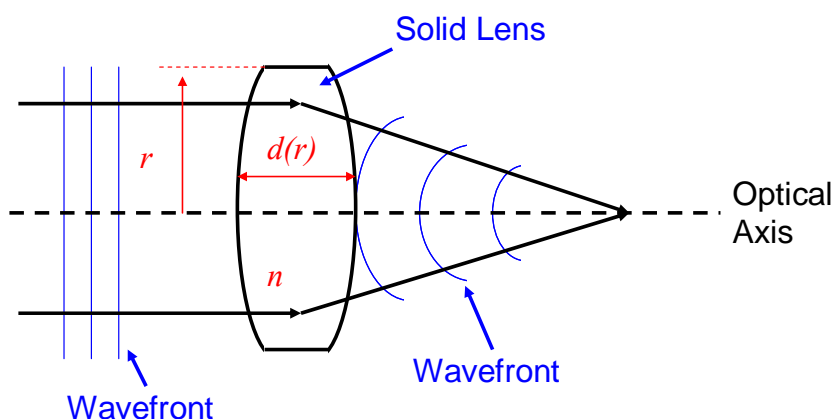


圖 1-8 凸透鏡聚焦示意圖

固態透鏡除了利用厚度差產生相位差之外，也能利用折射率差來產生相位差，如圖 1-9 所示，GRIN (Gradient Refraction Index)透鏡厚度固定為 d ，半徑為 r ，折射率 $n(r)$ ，由中心向邊緣逐漸減少，入射光通過透鏡後，與中心的光線產生相位差 $\Delta\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}dn(r)$ ，使波前彎曲向焦點收斂而聚焦[5]。以上兩種聚焦的方式，液晶透鏡皆有採用。

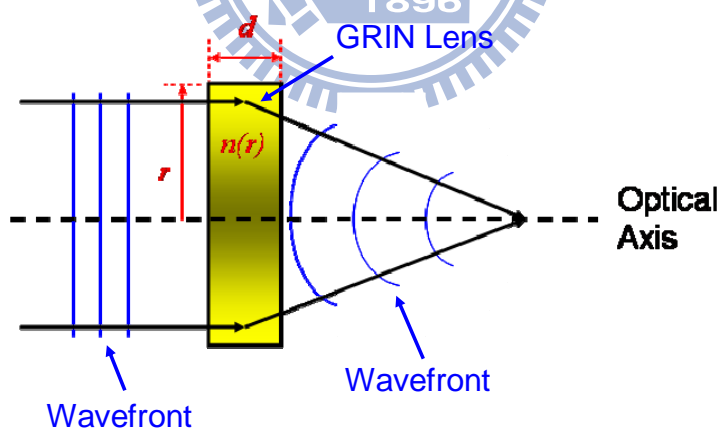


圖 1-9 GRIN 透鏡聚焦示意圖

1.2.1 液晶透鏡的種類

使液晶透鏡產生透鏡聚焦效果的方式有許多種，基本上可依電極產生均勻或不均勻電場，以及液晶層形狀是否均勻可分成四類，圖 1-10

為液晶透鏡的分類。

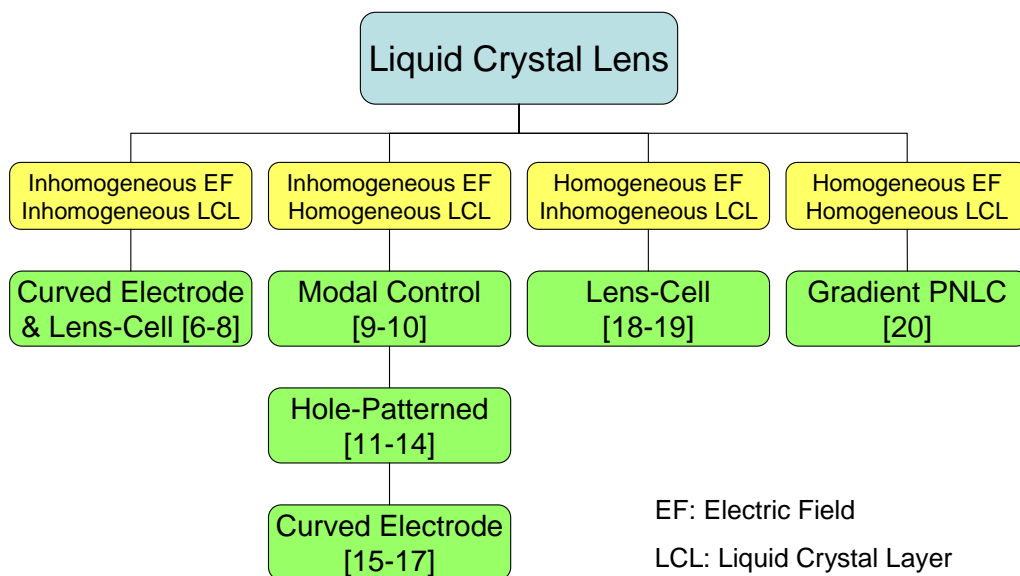


圖 1-10 液晶透鏡的分類

第一類：不均勻電場和不均勻液晶層的液晶透鏡結構是採用彎曲的電極(Curved Electrode)和透鏡形狀的液晶層(Lens-Cell)，如圖 1-11 所示。

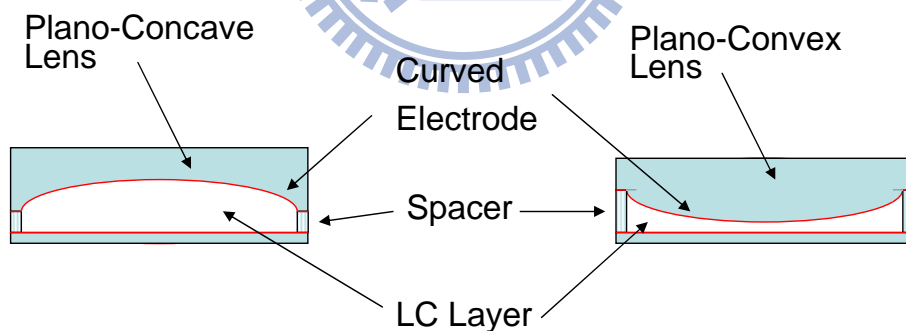


圖 1-11 彎曲電極與透鏡形狀的液晶層之液晶透鏡結構圖[6]

因為上玻璃基板與液晶層形狀的關係，本身就有透鏡效果，所以液晶透鏡的有效焦距 f_{eff} 為上玻璃基板焦距 f_g 與液晶層焦距 f_{LC} 的組合

$$f_{eff} = \left(\frac{1}{f_{LC}} + \frac{1}{f_g} \right)^{-1} \quad (1-6)$$

由於此液晶透鏡本身就有透鏡效果以致變焦範圍小，而電極在液晶層

上、下，距離近，所以操作電壓低，但是彎曲的電極不容易摩擦(Rubbing)，液晶難排列整齊。

第二類：不均勻電場和均勻液晶層的液晶透鏡可分為三種：(1)模態控制(Modal Control)、(2)圓孔電極(Hole-Patterned)與(3)彎曲電極(Curved Electrode)。基本的操作原理是利用不均勻電場，使液晶轉動角度呈現梯度分佈，產生空間中拋物線的折射率分佈。

(1)圖 1-12 為模態控制液晶透鏡之結構圖，此液晶透鏡主要是利用高阻抗電極(High Resistance Electrode)產生不均勻的電場，高阻抗電極，可視為無數小電阻所組成，如圖 1-13 所示，當施加電壓於環狀電極(Annular Electrode)，透過高阻抗電極，電位會向中心逐漸減小，形成近似拋物線不均勻的電場，使液晶轉動角度呈現梯度分佈，產生空間中拋物線的折射率分佈。

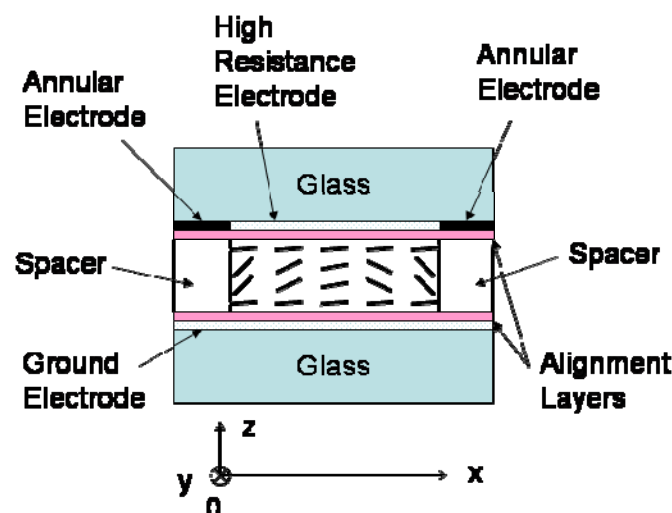


圖 1-12 模態控制液晶透鏡之結構圖[9]

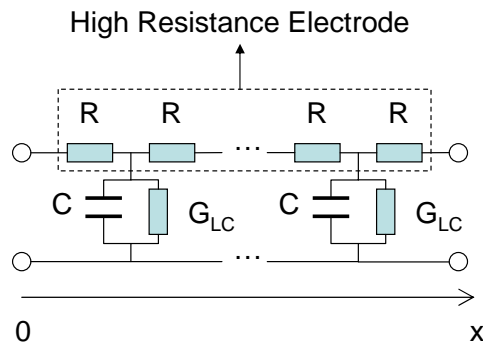


圖 1-13 模態控制液晶透鏡之等效電路[9]

(2)圓孔電極的液晶透鏡在上、下電極之間夾著絕緣玻璃與液晶層，上電極為鋁電極(Aluminum Electrode)，中央有一個被蝕刻掉的圓孔，下電極為整片 ITO 電極，如圖 1-14 所示。施加電壓後，圓孔範圍區域會產生不均勻電場，使液晶轉動角度呈現梯度分佈，產生空間中拋物線的折射率分佈。

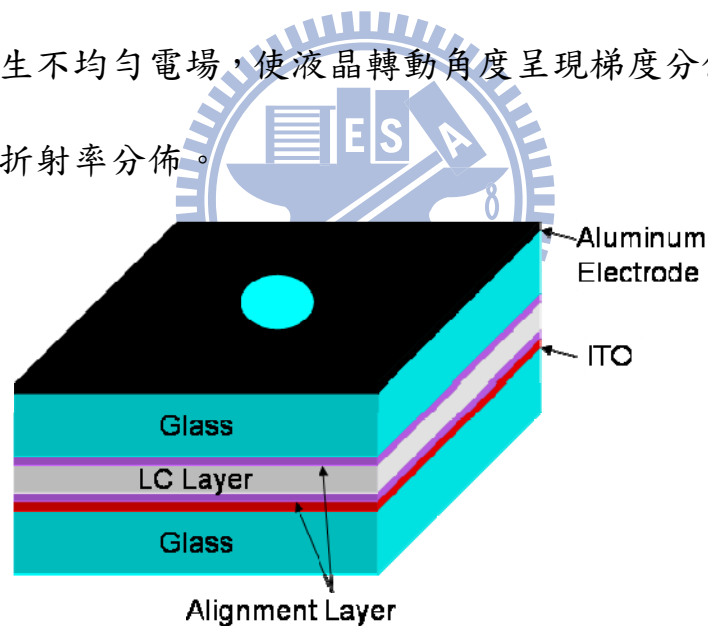


圖 1-14 圓孔電極液晶透鏡之結構圖[11]

(3)彎曲電極的液晶透鏡結構如圖 1-15，上基板使用平凹玻璃，凹面鍍有 ITO 電極且填入與玻璃幾乎相同折射率的聚合物(Polymer)，再蓋上一塊玻璃，形成平面的上基板，下電極為整片 ITO 電極。施加電壓時，彎曲的電極會產生不均勻的電場，使液晶轉動角度呈現梯度

分佈，產生空間中拋物線的折射率分佈。

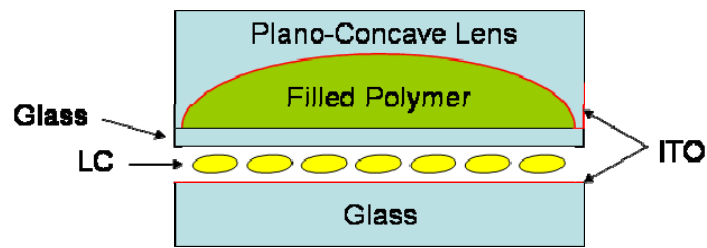


圖 1-15 彎曲電極的液晶透鏡之結構圖[15]

第三類：均勻電場和不均勻液晶層液晶透鏡結構採用平行電極與透鏡形狀的液晶層，一般用於製作微小液晶透鏡陣列，如圖 1-16 所示，液晶層為平凸透鏡形狀，因此在不加電壓時，便有透鏡效果，但是當電壓大到足夠使 PNLC (Polymer-Network Liquid Crystal) 站直，此時 PNLC 的折射率與聚合物的折射率幾乎相等，光線不會被聚焦。

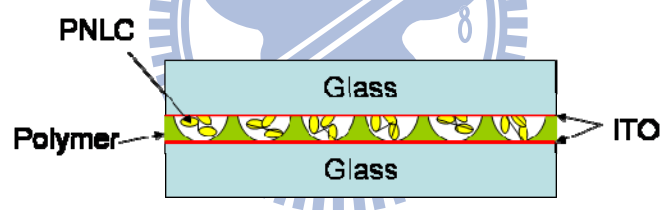


圖 1-16 透鏡形狀液晶層的液晶透鏡之結構圖[18]

第四類：均勻電場和均勻液晶層的液晶透鏡採用平行電極與梯度分佈的聚合物網絡液晶(Gradient Polymer Network Liquid Crystal，簡稱 Gradient PNLC)。梯度分佈的 PNLC 是利用一個遮光率漸變的光罩 (Photomask)，當 UV 光(UV Light)照射時，強度從中央最大值逐漸向邊緣減弱，使聚合物網絡(Polymer Network)在光聚合作用之後，中央聚合物網絡濃度高，邊緣的聚合物網絡濃度低，濃度高的網絡聚合對液晶分子產生較大的拉力，使液晶不易轉動，臨界電壓(Threshold

Voltage)較邊緣高，因此當施加電壓時，邊緣液晶轉動角度大而中央的液晶轉動角度小，產生折射率分佈。此外，液晶透鏡的電極在液晶層上、下側，距離近，所以操作電壓低。

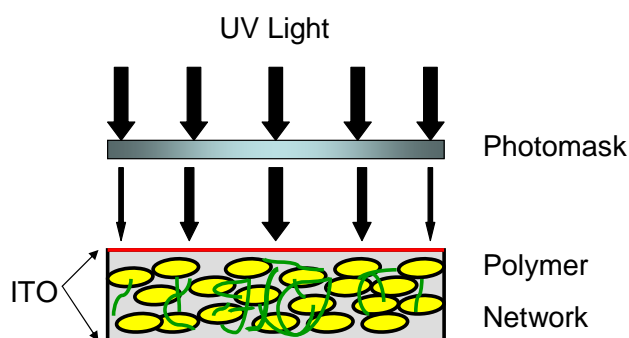


圖 1-17 梯度分佈的 PNLC 之液晶透鏡製作原理[20]

比較上述各種結構之液晶透鏡，若要製作大孔徑且變焦範圍大的液晶透鏡適合使用第二類結構。其中三種結構相較之下，圓孔電極較彎曲電極結構簡單且較模態控制結構成本低，因為少了高阻抗電極製作，所以圓孔電極結構的液晶透鏡是較容易量產的，下一章節將會介紹圓孔電極之液晶透鏡的發展歷史。

1.2.2 圓孔電極之液晶透鏡的歷史演進

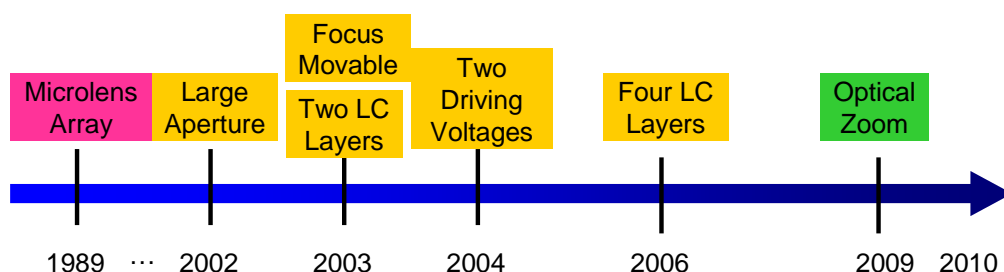


圖 1-18 圓孔電極的液晶透鏡之歷史演進[11-14, 21-22]

圖 1-18 為圓孔電極的液晶透鏡之歷史演進，圓孔電極的液晶透鏡

在文獻上有相當多的研究，功能不斷進步，接下來簡介它的發展史。

1989 年，日本的 T. Nose 與 S. Sato 首次提出圓孔電極結構，用於製作微透鏡陣列(Microlens Array，直徑約 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ mm)。2002 年，Mao Ye 與 S. Sato 提出大孔徑(直徑約 1 ~ 10mm)的圓孔電極之液晶透鏡，如圖 1-14 所示，簡單地利用圓孔直徑大小(Aperture Size)與液晶層厚度(Cell Gap)兩個結構參數搭配，可製作出任意尺寸的液晶透鏡，成為後續圓孔電極發展的基礎。2003 年，Mao Ye 與 S. Sato 提出可將焦點離軸移動的技術，結構如圖 1-19 所示，上電極仍為圓孔電極，下電極則改用透明的 ZnO 摻雜 In_2O_3 [12]，增加阻抗值，左右邊緣加上兩個子電極(Subelectrodes) A 和 B。當施加偏壓於子電極，會在液晶層產生傾斜的電場，使折射率分佈偏移，改變焦點位置。

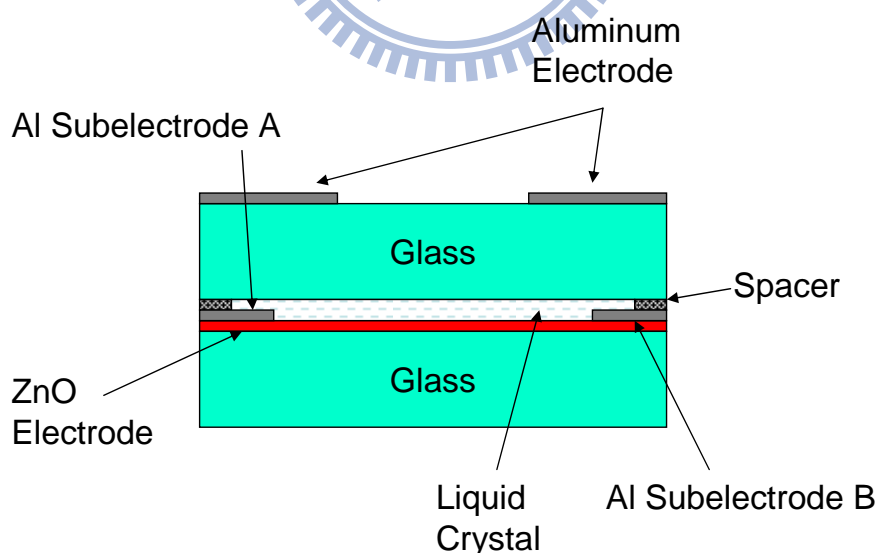


圖 1-19 可移動焦點的液晶透鏡結構圖[12]

同年，同一組人再提出雙層液晶層(Two LC Layers)的透鏡結構，如圖 1-20 所示，以玻璃與鋁電極隔開兩個液晶層，他們的摩擦方向

(Rubbing Direction)互相垂直，可將任意偏振態的入射光聚焦，做到無需偏光片的液晶透鏡。

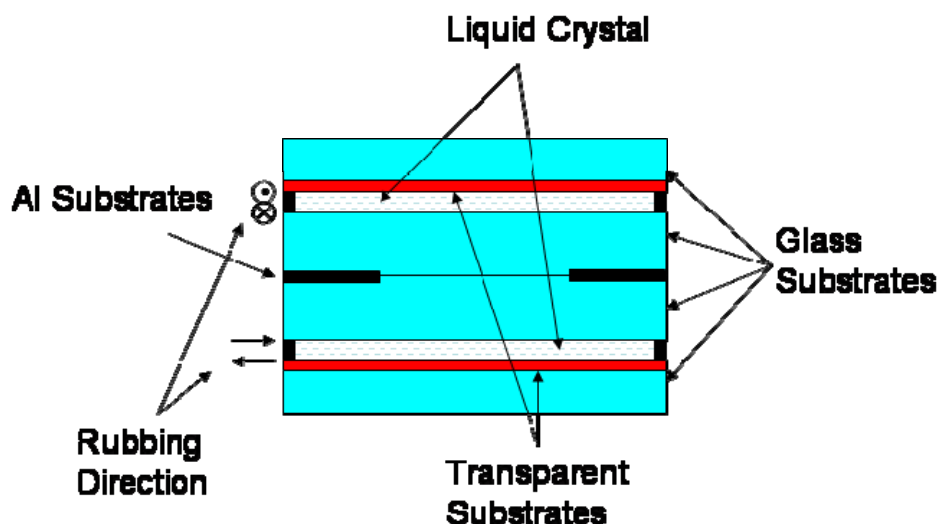


圖 1-20 雙層液晶的透鏡結構[13]

2004 年，Mao Ye、Bin Wang 與 S. Sato 提出雙驅動電壓(Two Driving Voltages)的液晶透鏡，在原本圓孔電極結構之上，加一片薄玻璃(Thin Glass Slab)作為絕緣，然後再加一整片 ITO 電極，如圖 1-21 所示，利用此電極控制圓孔中央的電壓來調整折射率分佈的曲線，維持影像的品質。

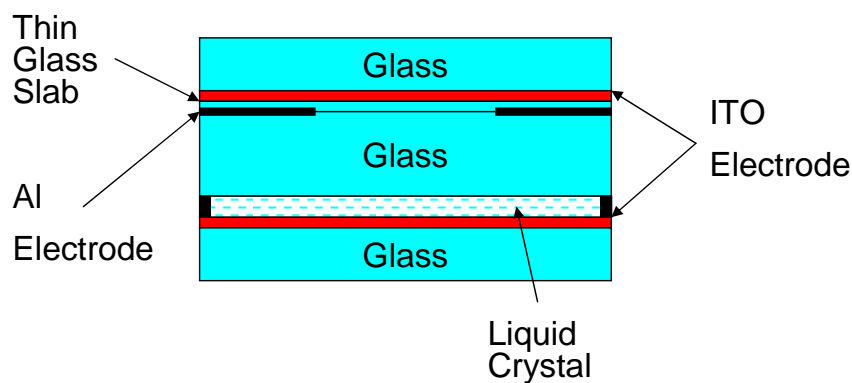


圖 1-21 雙驅動電壓液晶透鏡之結構圖[14]

此外，與圓孔電極搭配，調整電壓可達到正、負透鏡切換的功能，大幅增加變焦範圍。2006 年，Mao Ye、Bin Wang 與 S. Sato 提出四層液晶層堆疊的液晶透鏡，如圖 1-22 所示，因為液晶層摩擦方向(Rubbing Direction)垂直，所以無需偏振片，可將任意偏振態的入射光聚焦，加上兩層液晶層增加了相位差(Phase Difference)，使液晶透鏡聚焦的能力增加，變焦範圍增大。

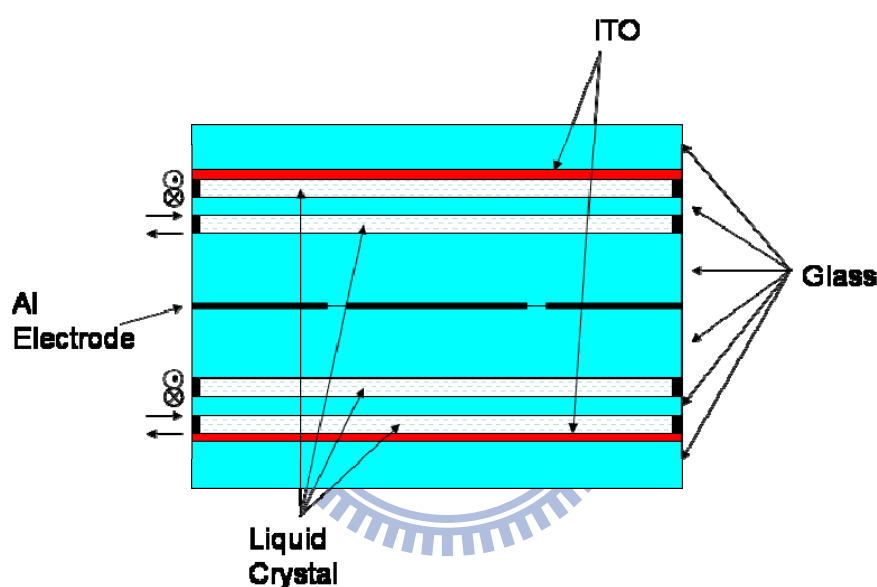


圖 1-22 四層液晶層的液晶透鏡之結構圖[21]

2009 年，Mao Ye 等人利用兩片四層液晶層的液晶透鏡(LC Lens 1 和 LC Lens 2)與一片固定焦距的玻璃透鏡(Glass Lens)，實現了一組 1.5 倍光學縮放(1.5X Optical Zoom)系統，如圖 1-22 所示。一片液晶透鏡作為變倍組(Variator)，另一片則為補償組(Compensator)，在各物件距離相等且維持 $f_0 = f_1 + f_2$ 的關係下，得到 1.5 倍的縮放比率(Zoom Ratio) [22]。

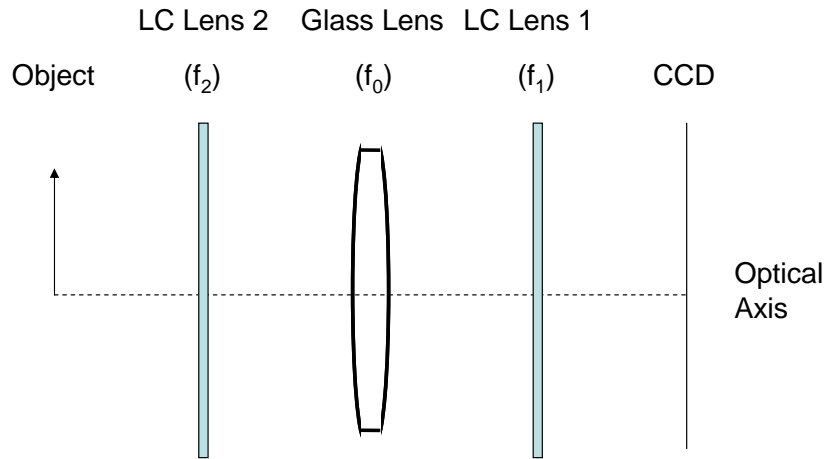


圖 1-23 1.5 倍光學變焦系統架構圖[22]

1.3 研究動機

透鏡是多數光學系統不可獲缺的光學元件，在光學系統趨向微型化的潮流下，傳統的光機結構面臨許多尺寸與成本的限制和挑戰。此方面液晶透鏡提供了更佳的選擇，因為它輕薄、沒有動件且低成本，尤其是台灣的面板產業技術十分成熟，加上微小鏡頭設計與模組產業的精密水準，完整的供應鏈更是提供液晶透鏡量產以及應用發展的絕佳條件。液晶透鏡的應用範圍廣泛，不僅有機會取代現有的光機結構，例如：光碟機讀寫頭(Pickup Head) [7, 23]、對焦(Auto-Focusing)系統[25-26]、光鉗(Optical Tweezer) 3D 操縱的移動平台[26-28]等，還能加入 3D 顯示器(3D Display)的新技術[29-30]，提供 2D/3D 切換的功能。

在各種液晶透鏡結構之中，若要製作大孔徑、變焦範圍大、結構簡單、低成本且易量產的液晶透鏡，圓孔電極的液晶透鏡是最佳的選

擇。此外，環境溫度會影響液晶的各種物理參數，如彈性係數、雙折射率、旋轉黏滯係數、介電異方性等，文獻上對液晶透鏡的溫度效應探討甚少，有兩篇相關的論文 [6, 23]，所使用的液晶透鏡均利用到最大的雙折射率進行實驗與討論，但是圓孔電極的液晶透鏡未充份利用最大的雙折射率，因此我們希望藉由實驗來瞭解溫度對圓孔電極液晶透鏡的影響性。

在本文中，首先介紹液晶的物理特性與液晶透鏡的文獻回顧，接著我們使用 Prof. Sato 的圓孔電極之液晶透鏡[11]來探討它的電控焦距、反應時間與溫度效應，最後由實驗結果得知在 25°C 至 60°C 之間，可以利用溫度增加來改善反應時間，且不影響變焦範圍。



第2章 理論與模擬

2.1 液晶分子在電場下的轉動

單一圓孔電極是指液晶透鏡的上電極有一個被蝕刻掉的圓孔(直徑為 w)，如圖 2-1(a)所示，下電極仍為整片的 ITO 電極(Indium Tin Oxide Electrode)，施加電壓之後，圓孔範圍內會形成不均勻的電場分佈。從液晶透鏡的剖面圖來看，上電極在上玻璃的外側，而下電極在下玻璃的內側面向液晶層(Liquid Crystal Layer)，配向層(Alignment Layer)的摩擦(Rubbing)沿 x 方向，上、下玻璃中間夾著厚度 d 的液晶層，如圖 2-1(b)所示。不加電壓時，液晶排列與水平配向液晶盒(Homogeneous Cell)相同。

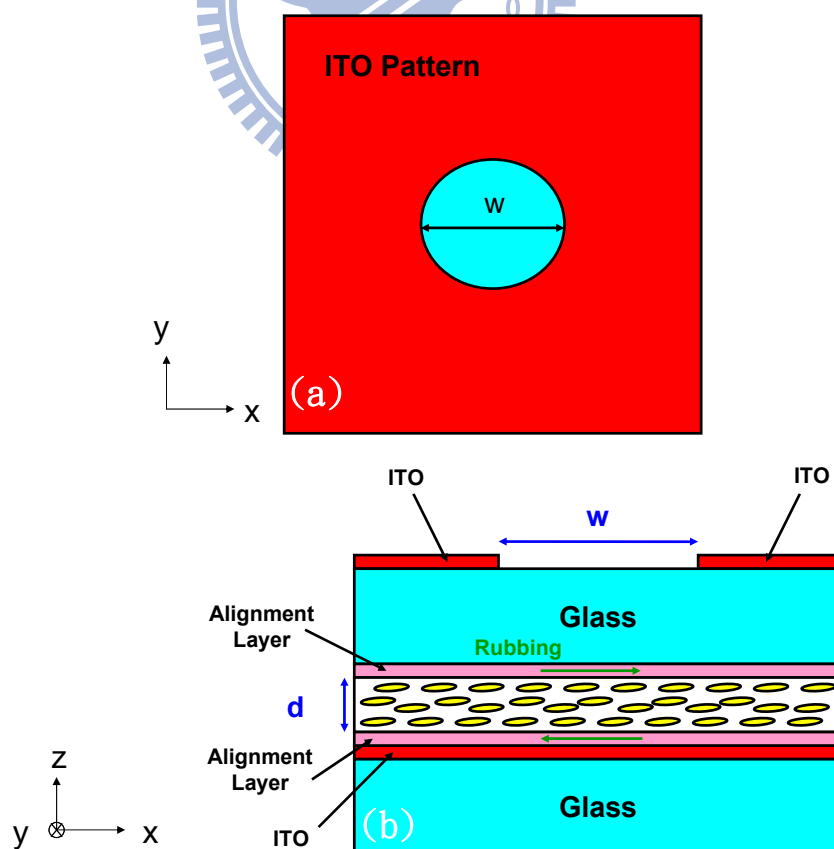


圖 2-1 圓孔電極的液晶透鏡之結構圖(a)上視圖(b)剖面圖

如圖 2-2 為液晶層電位分佈示意圖，電位分佈呈現開口向上的拋物線狀，中間弱，邊緣強。因此，我們能進一步推出不均勻電場分佈的情形，如圖 2-3 所示。有玻璃作為介電層，使液晶層中央的電力線被分散開且與下電極近乎垂直。

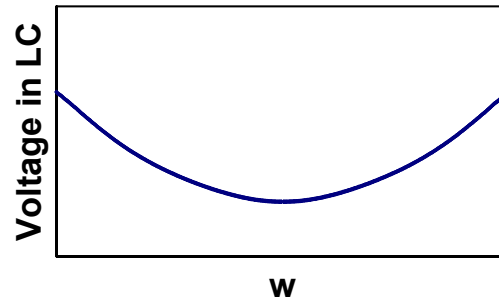


圖 2-2 液晶層電位分佈示意圖

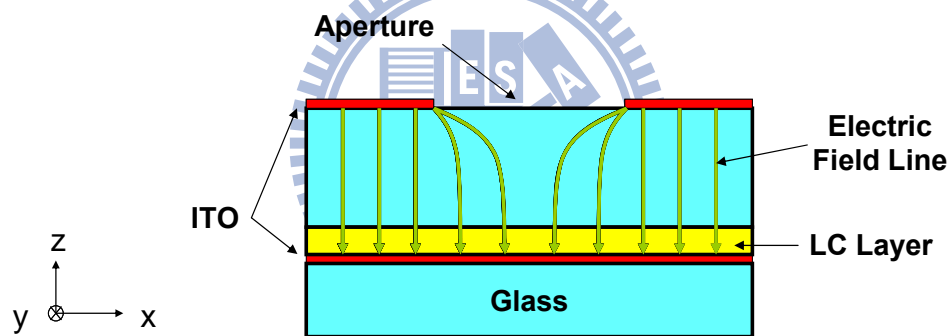


圖 2-3 電場分佈示意圖

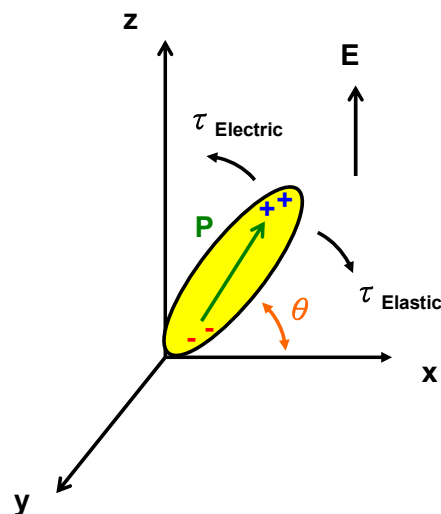


圖 2-4 電場迫使液晶旋轉的示意圖

如圖 2-4 所示，當施加電場 E 時，液晶分子的電子雲會感應出電偶極 P [31]

$$\bar{P} = \varepsilon_0 \chi_e \bar{E} \quad (2-1)$$

電場 E 會對液晶分子產生轉動的力矩 $\tau_{Electric}$

$$\tau_{Electric} = PE \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta \quad (2-2)$$

考慮一個外加電場的水平配向液晶盒(Homogeneous Cell)，在忽略扭曲項的前提下，其彈性自由能密度為[7]

$$F_{Elastic} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 (k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \quad (2-3)$$

故單位體積的彈性力矩 $\tau_{Elastic}$ 可表示成

$$\begin{aligned} \tau_{Elastic} &= \frac{dF_{Elastic}}{d\theta} \\ &= (k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \left(\frac{d^2 \theta}{dz^2} \right) + (k_{33} - k_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \end{aligned} \quad (2-4)$$

利用電場力矩與彈性力矩平衡，得二階微分方程

$$\begin{aligned} &(k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \left(\frac{d^2 \theta}{dz^2} \right) + (k_{33} - k_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \\ &= \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (2-5)$$

解此微分方程可得到電壓與液晶最大轉角的關係式[32-33]

$$\frac{V_{LC}}{V_{th}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 + \xi \eta} \int_0^{\pi/2} \sqrt{\frac{1 + \kappa \eta \sin^2 \psi}{(1 + \xi \eta \sin^2 \psi)(1 - \eta \sin^2 \psi)}} d\psi \quad (2-6)$$

其中，

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \quad (2-7)$$

$$\xi = \epsilon_{//} / \epsilon_{\perp} - 1 \quad (2-8)$$

$$\kappa = k_{33} / k_{11} - 1 \quad (2-9)$$

$$\eta = \sin^2 \theta_m \quad (2-10)$$

其中 V_{LC} 為液晶層跨壓， θ_m 為液晶層中間的液晶分子最大的旋轉角度， V_{th} 為液晶轉動所需的臨界電壓(Threshold Voltage)， ϵ_0 為真空介電常數(Permittivity of Free Space)。當知道液晶的材料參數就可以藉由(2-6)式估計施加電壓 V_{LC} 於液晶層時，液晶旋轉的最大角度 θ_m 。

將液晶材料參數代入(2-6)式，利用數值方法計算出液晶層跨壓與液晶旋轉最大角度的關係，如圖 2-5 所示。當 $V_{LC} > V_{th}$ 時，液晶開始旋轉，我們觀察到，電壓增加的初期，液晶旋轉角度變化大，後期變化漸小。

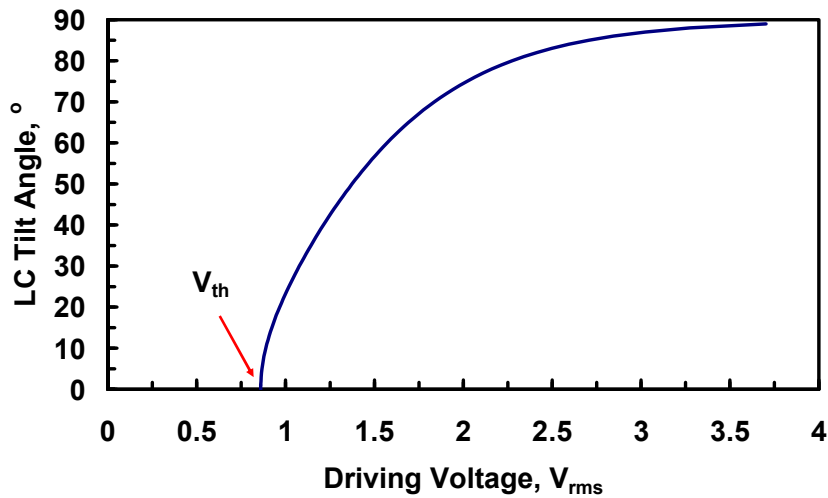


圖 2-5 液晶層跨壓與液晶分子旋轉最大角度圖

由圖 2-2，已知液晶層的跨壓呈現開口向上的拋物線分佈，中間的電壓較弱，液晶小角度旋轉，而邊緣電壓較強，液晶旋轉角度較大，液晶排列成梯度分佈，如圖 2-6 所示， $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$ 。

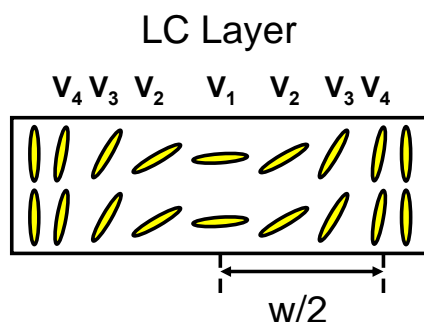


圖 2-6 不均勻電場下，液晶分子的轉動分佈

我們知道圓孔電極產生不均勻的電場使液晶旋轉角度呈現梯度分佈，透過(1-4)式可以瞭解不同的液晶轉角對應不同的折射率而形成拋物線的折射率分佈。只要改變電壓，液晶排列轉角改變，則改變了折射率分佈的曲度，達到變焦的目的。

2.2 焦距計算

計算液晶透鏡焦距的方式有三種，如下列說明：

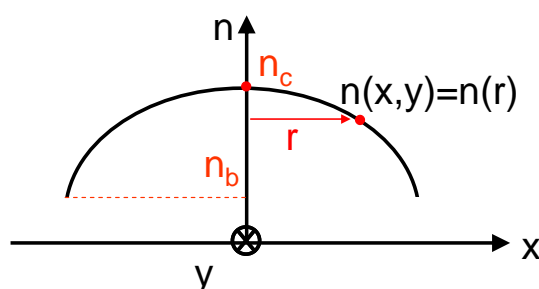


圖 2-7 拋物線折射率分佈示意圖

方法一[34]：電場驅動液晶旋轉產生折射率的分佈，在形成透鏡效果的狀況下，折射率沿圓孔半徑 r 方向的分佈為拋物線分佈，圖 2-7 所示，假設折射率分佈的二次方程式為

$$n(r) = A + Br^2 \quad (2-11)$$

利用邊界條件(Boundary Condition)

$$r = 0, \quad n(0) = n_c, \quad \Rightarrow A = n_c \quad (2-12)$$

$$r = w/2, \quad n(w/2) = n_b, \quad \Rightarrow B = \frac{4(n_b - n_c)}{w^2} = -\frac{4\delta n}{w^2} \quad (2-13)$$

其中 $\delta n = n_c - n_b$ ， n_c 為對應圓孔中央的折射率， n_b 為對應圓孔邊緣的折射率，因此折射率的拋物線方程式為

$$n(r) = n_c - \frac{4\delta n}{w^2} r^2 \quad (2-14)$$

液晶層厚度為 d ，當光線經過液晶層，其相位延遲表示為

$$\phi(r) = kn(r)d \quad (2-15)$$

k 為入射光的波向量 (Wave Vector)，將 $\phi(r)$ 代入穿透函數 (Transmittance Function) [35]

$$t_{LC}(r) = e^{j\phi(r)} = e^{\left[(jkd) \left(n_c - \frac{4\delta n}{w^2} r^2 \right) \right]} = e^{jkn_c d} \times e^{\left[(-jkd) \left(\frac{4\delta n}{w^2} r^2 \right) \right]} \quad (2-16)$$

另外，取一均勻折射率 n_c 、中央厚度 d 和焦距 f 的薄透鏡(Thin Lens) (如圖 2-8 所示)之穿透函數[25]

$$t_{Thin}(r) = e^{jkn_c d} \times e^{-j\frac{k}{2f} r^2} \quad (2-17)$$

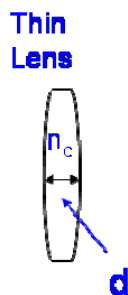


圖 2-8 折射率為 n_c 的薄透鏡

將兩者進行相位改變之比較，可得到液晶透鏡的焦距與圓孔直徑、液晶層厚度和折射率的關係

$$\frac{1}{2f} = \frac{d \cdot 4\delta n}{w^2} \Rightarrow f = \frac{w^2}{8d\delta n} \quad (2-18)$$

一般我們無法直接觀察或量測 δn 而直接計算焦距，此公式較常用於設計液晶透鏡時作為參考。如果充份利用液晶的雙折射率 $\Delta n (n_e - n_o)$ ，可以獲得最短的焦距 f_{\min}

$$f_{\min} = \frac{w^2}{8d\Delta n} \quad (2-19)$$

方法二[36]：將液晶透鏡夾於正交的偏光片中間，摩擦(Rubbing)方向與偏光片夾 45 度角，當光線經過第一片偏光片後呈線性偏振光，在行經液晶層時，會分成 n_e 與 n_o 兩個偏振方向的特徵值(Eigenmodes)，因 n_e 遇到的折射率較大，導致行進速度較慢，與 n_o 之間產生相位延遲(Phase Retardation)而改變偏振態。當穿透液晶層的光線為線性偏振且方向與第二片偏光片平行時，光線完全通過而呈現亮態。反之，線性偏振且方向與第二片偏光片垂直時，光線完全無法通

過而呈現暗態，若是光線為圓偏振或橢圓偏振，則光線會部份穿透。
因此我們能在第二片偏光片後面觀察到光線穿透分佈的亮暗條紋，如
圖 2-9 所示，相鄰的亮紋之相位差為 2π 。

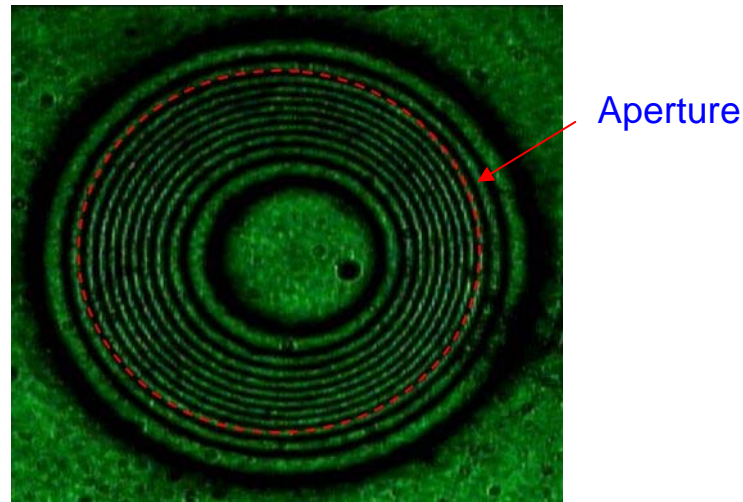


圖 2-9 液晶透鏡穿透分佈的亮暗條紋

計數圓孔範圍內的亮紋數 N 便能知道中央與邊緣的相位差

$$\Delta\Phi = N \cdot 2\pi \quad (2-20)$$

而光線經過液晶透鏡，中央與邊緣的相位差可表示為

$$\Delta\Phi = \frac{\delta nd}{\lambda} \cdot 2\pi \quad (2-21)$$

由相等的兩個方程式可得到 $\delta nd = N\lambda$ ，代入(2-18)式改寫液晶透鏡焦距

$$f = \frac{w^2}{8N\lambda} \quad (2-22)$$

此公式適用於觀察穿透分佈的亮暗條紋，可以根據條紋數，快速知道
液晶透鏡在不同電壓下的焦距變化。

方法三[14]：在已獲得折射率分佈的情況下，以邊緣為基準(設 $\Phi_b = 0$)，利用下列式子將之轉成相位延遲(Phase Retardation)分佈

$\Delta\Phi(r)$ ，如圖 2-10 所示

$$\Delta\Phi(r) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot [n(r) - n_b] \quad (2-23)$$

再利用二次曲線方程式(Quadratic Equation) Fitting，得到

$$\Phi(r) = ar^2 + br + c \Rightarrow \Phi(r) = a \left[r - \left(-\frac{b}{2a} \right) \right]^2 - \frac{D}{4a} \quad (2-24)$$

其中 $a < 0$ 、 $D = b^2 - 4ac > 0$ ，若相位延遲的分佈以 $r=0$ 為中心，左右對稱， $b \rightarrow 0$ 、 $\Phi(0) = -\frac{D}{4a}$ ，則(2-24)式可改寫成

$$\Delta\Phi(r) = \Phi(r) - \Phi(0) \cong ar^2 \quad (2-25)$$

與(2-17)式進行相位改變之比較，得

$$-\frac{k}{2f} = -\frac{1}{2\lambda f} \cdot 2\pi = a \cdot 2\pi \Rightarrow f = \frac{-1}{2a\lambda} \quad (2-26)$$

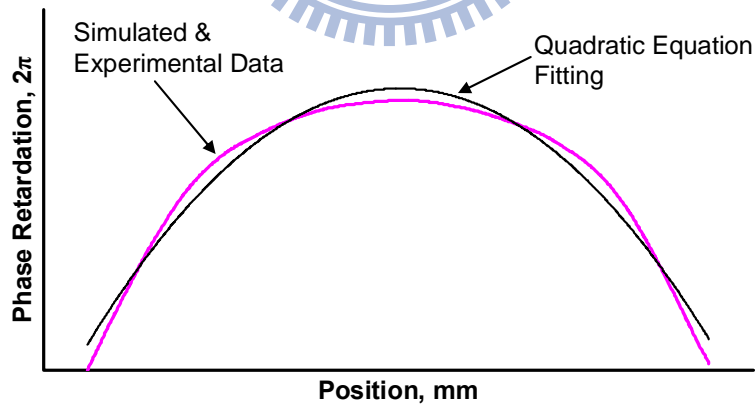


圖 2-10 二次曲線方程式 Fitting

2.3 反應時間

目前有關於液晶透鏡的文獻裡並沒有明確的反應時間的理論計

算，我們仍引用水平配向的液晶盒(Homogeneous Cell)的動態響應來描述[37]。液晶轉動的過程中，除了受到彈性力矩的反向拉力之外，還會受到黏滯力矩的反向阻力，在不考慮慣性效應(Inertial Effect)與引流效應(Backflow Effect)之下，描述其動態響應的 Erickson-Leslie 方程式可改寫成[32]

$$\begin{aligned} & (k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + (k_{33} - k_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta \\ & = \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} \end{aligned} \quad (2-27)$$

解此微分方程可得液晶的回復時間(Relaxation Time)常數 τ_0 、上升時間(Rising Time) τ_{Rise} 與下降時間(Decay Time) τ_{Decay}

$$\tau_0 = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 k_{11}} \quad (2-28)$$

$$\tau_{Rise} = \frac{\tau_0}{\left[\left(\frac{V}{V_{th}} \right)^2 - 1 \right]} \quad (2-29)$$

$$\tau_{Decay} = \frac{\tau_0}{\left[\left(\frac{V_b}{V_{th}} \right)^2 - 1 \right]} \quad (2-30)$$

V 為液晶層跨壓， V_b 是液晶回復至最後狀態的電壓。本論文操作液晶透鏡時，最後狀態均為 $V_b = 0$ ，因此 $\tau_{Decay} = \tau_0$ 。

反應時間定義為上升時間與下降時間的總和，式子如下：

$$\tau = \tau_{Rise} + \tau_{Decay} = \tau_0 \left[\frac{(V/V_{th})^2}{(V/V_{th})^2 - 1} \right] \quad (2-31)$$

由於很難知道整個液晶層電的電壓分佈，所以若在同電壓下，我們可以只考慮 τ_0 的變化，來瞭解反應時間的快慢。

2.4 溫度效應[32, 38-39]

溫度會影響許多液晶材料重要的物理參數，可分為兩部份：(1)光學部份與(2)動態響應部份，如下描述。

(1)光學部份：

主要是溫度對液晶雙折射率的效應，間接影響電控焦距的曲線， Δn 與溫度(T)的關係式如下：

$$\Delta n(T) = (\Delta n)_0 \times S(T) \quad (2-32)$$

$$S(T) = \left(1 - \frac{T}{T_C} \right)^\beta \quad (2-33)$$

S 為秩序參數(Order Parameter)， $(\Delta n)_0$ 為 $S=1$ 時所測得的雙折射率， T 為環境溫度， T_C 為液晶相轉移溫度(Clearing Point)， β 是材料參數，因不同液晶材料而異，本論文假設 β 為 0.25，將液晶材料參數代入(2-33)式，可以求出 $(\Delta n)_0 = 0.4063$ 與 $\Delta n(T)$ 的模擬計算，圖 2-11 顯示液晶的雙折射率對溫度的敏感，60°C 的雙折射率較 20°C 時下降約 0.1，在接近相轉移溫度(80°C)時，雙折射率驟減。

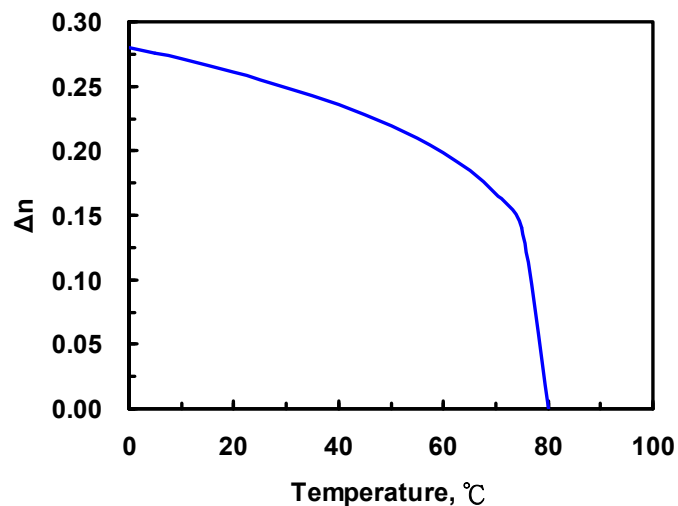


圖 2-11 雙折射率與溫度的關係圖

(2)動態響應部份：

根據(3-27)式，可以知道相關的液晶參數有旋轉黏滯係數 γ_1 、彈性係數 k_{11} 與介電異方性 $\Delta\epsilon$ ，均會受到溫度所影響，特別是旋轉黏滯係數 γ_1 和彈性係數 k_{11} 會直接影響液晶回復的時間常數。

旋轉黏滯係數於液晶動態響應中扮演重要角色，與液晶分子的分子結構、組成皆有關聯，它與溫度的關係式如下：

$$\gamma_1(T) = bS(T) \cdot e^{\frac{E_a}{k_B T}} = b \left(1 - \frac{T}{T_C} \right) \cdot e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad (2-34)$$

b 為比例常數， E_a 為液晶分子旋轉的活化能， k_B 為波茲曼常數。假設 $E_a = 0.4eV$ ，將液晶材料參數代入(2-34)式可求出 $b = 4.5 \times 10^{-5}$ 與 $\gamma_1(T)$ 的模擬計算，如圖 2-12 所示，旋轉黏滯係數會隨溫度上升而迅速減小。

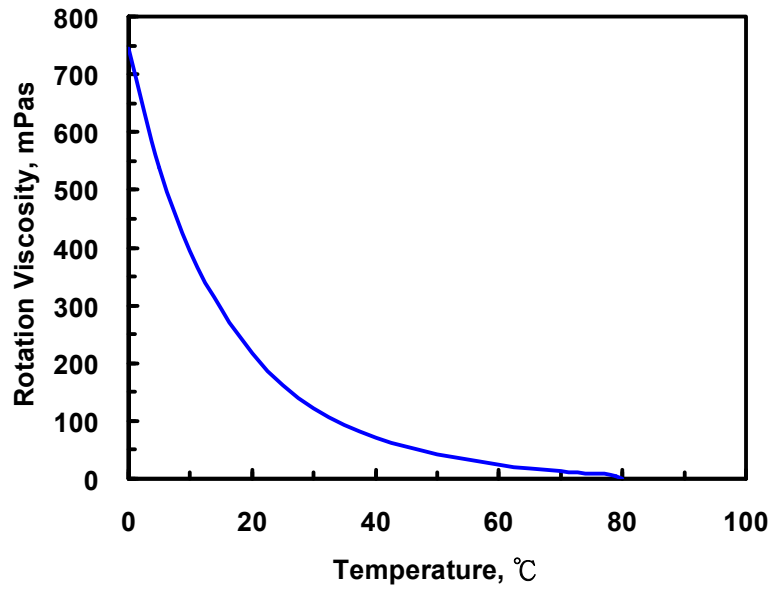


圖 2-12 黏滯係數與溫度的關係圖

彈性係數影響著液晶元件的臨界電壓(Threshold Voltage)與反應時間，與溫度的關係式如下：

$$k_{11}(T) = aS(T)^2 = a \left(1 - \frac{T}{T_C} \right)^{2\beta} \quad (2-35)$$

a 為比例常數。利用表 3-1 的參數與(2-35)式可求出 $a = 17.4$ 與 $k_{11}(T)$ 的模擬計算，如圖 2-13 所示，

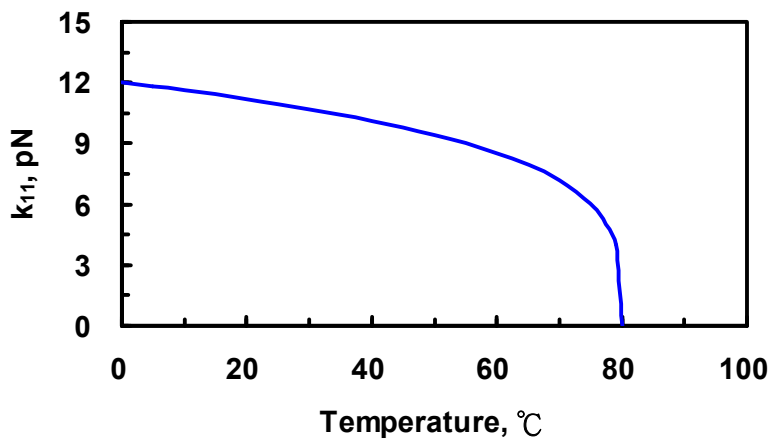


圖 2-13 彈性係數與溫度的關係圖

由(2-34)式及(2-35)式可以推導出液晶的回復時間常數 τ_0 與溫度 T 的關係式如下：

$$\tau_0 = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 k_{11}} = \frac{b \cdot e^{\frac{E_a}{k_B T}}}{a \left(1 - \frac{T}{T_C}\right)^\beta} \cdot \frac{d^2}{\pi^2} \quad (2-36)$$

其中 τ_0 之分子數值會隨溫度上升呈現指數下降，相較分母下降來得快。將液晶材料參數代入(2-36)式，模擬計算液晶透鏡的回復時間常數 τ_0 ，預測回復時間常數 τ_0 會隨溫度上升而快速下降，如圖 2-14 所示。

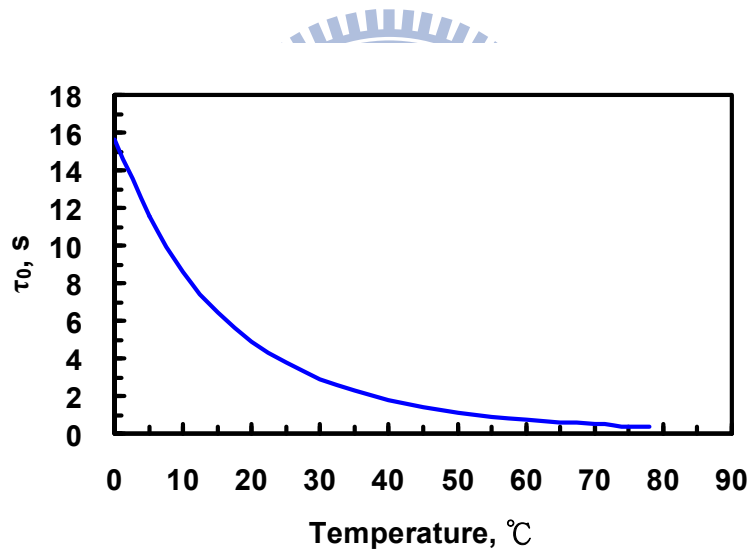


圖 2-14 τ_0 與溫度的關係圖

2.5 液晶透鏡模擬與分析

2.5.1 2DimMOS 模擬

2DimMOS 是一套微軟作業系統環境下計算液晶顯示器電光特性 (Electro-Optical Properties) 的模擬軟體，利用有限元素法 (Finite

Element Method，簡稱 FEM)的方法來計算電位分佈與液晶指向(Director)的變化。本節將使用 2DimMOS 來模擬液晶透鏡，觀察液晶的形態(Deformation)變化，協助我們瞭解液晶透鏡之特性。

首先畫入液晶透鏡之結構，畫面顯示 y-z 方向的 2 維平面，最上面為光線穿透度(Transmittance)分佈，在設定液晶透鏡前後各加一片偏光片，偏光片穿透軸互相垂直且液晶層的摩擦方向(Rubbing Direction)與偏光片夾 45 度角，可模擬出亮暗條紋的分佈，如圖 2-15 所示。紅色的部份為上電極(Top Electrode)，綠色部份為下電極(Lower Electrode)，橘色的部份為玻璃，藍色部份為液晶層(Liquid Crystal Layer)，液晶層裡黃色的部份是模擬液晶分子，綠色線為等電位線(Equipotential Line)。

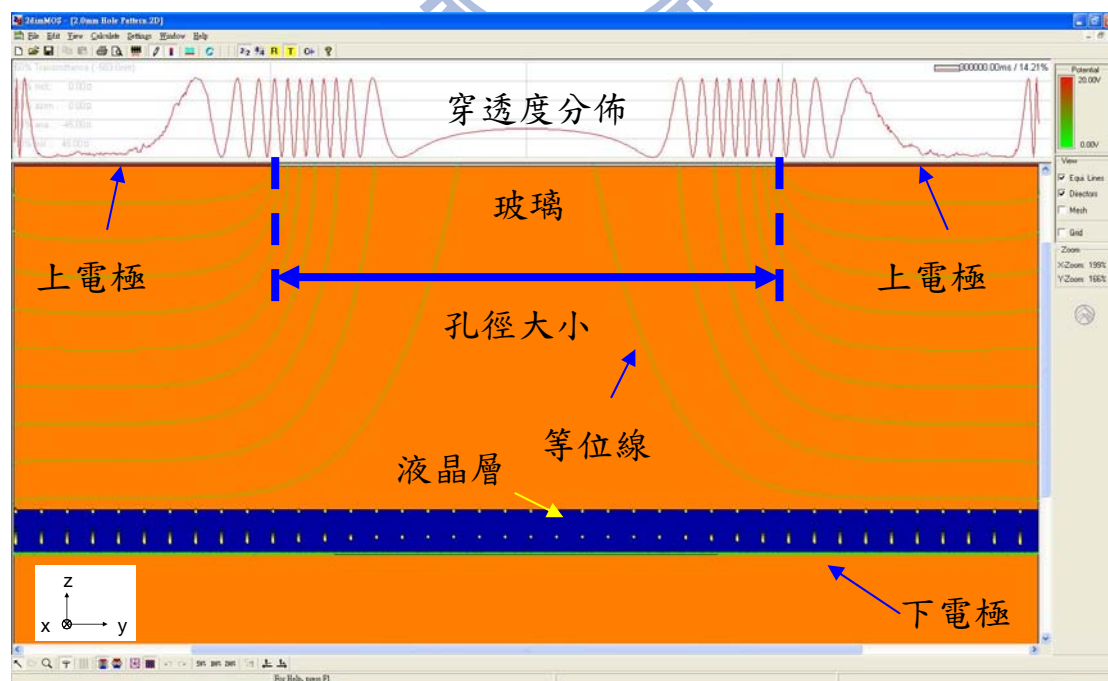


圖 2-15 2DimMOS 的模擬視窗

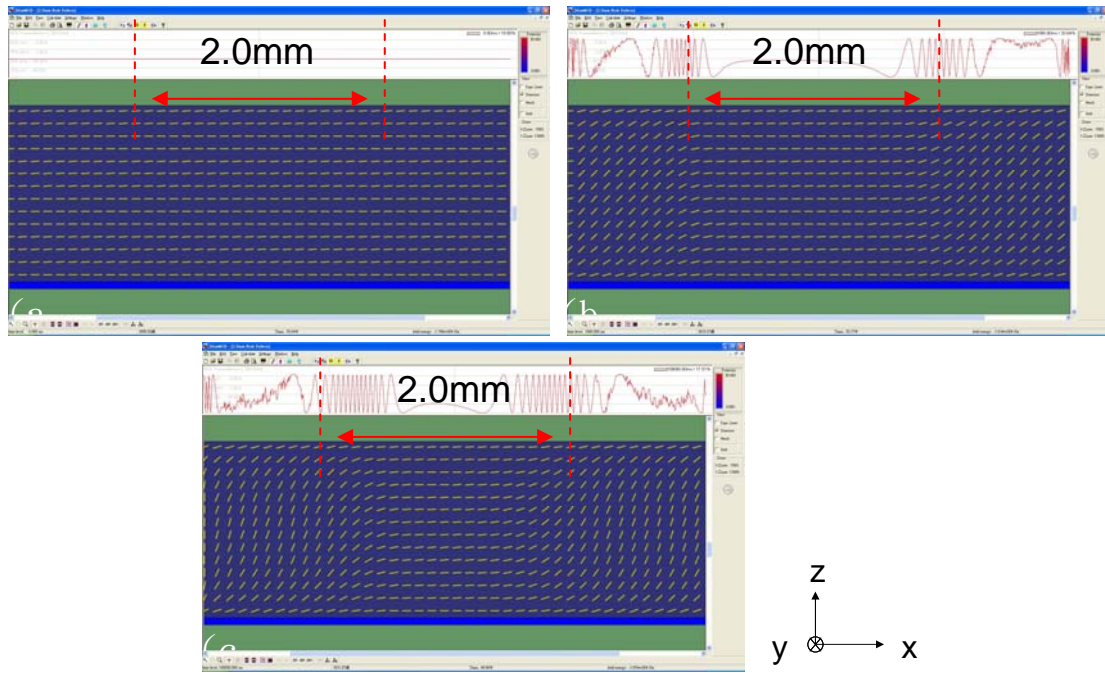


圖 2-16 x-z 平面的液晶層(a)未施加電壓(b)運算過程(c)運算停止

利用 2DimMOS 運算過程，可以觀察液晶分子轉動，如圖 2-16 所示，以 2.0mm、50 μm 之液晶透鏡為例子介紹，畫面顯示 x-z 方向 2 維平面，施加電壓 30V_{rms} 之後邊緣的液晶分子開始旋轉，運算停止時，中央的液晶分子幾乎沒有轉動，邊緣液晶分子則旋轉了一個角度，孔徑範圍內液晶分子已形成折射率梯度分佈的形態。

2.5.2 計算與分析

以 2.0mm、50 μm 的液晶透鏡為例，使用 MATLAB 程式將液晶分子旋轉角度整理並計算，設孔徑邊緣為基準(設 $\Phi_b = 0$)，各點相位與之相減，可繪出圖的相位延遲分佈，如圖 2-17、圖 2-18 所示，y 方向的相位分佈十分對稱，但 x 方向在低電壓(< 30V_{rms})時並不對稱，這表示 y 方向的光線會聚焦於光軸上，x 方向則會離軸聚焦，造成一

些像差(Aberration)，要在施加電壓越大($> 40V_{rms}$)時，相位分佈才會趨於對稱。此外於低電壓區，相位分佈呈現梯形，是因為液晶層中央的電壓未達臨界電壓 V_{th} ，液晶分子沒有轉動的原故，這表示此時液晶透鏡的折射率分佈不具有透鏡效果。

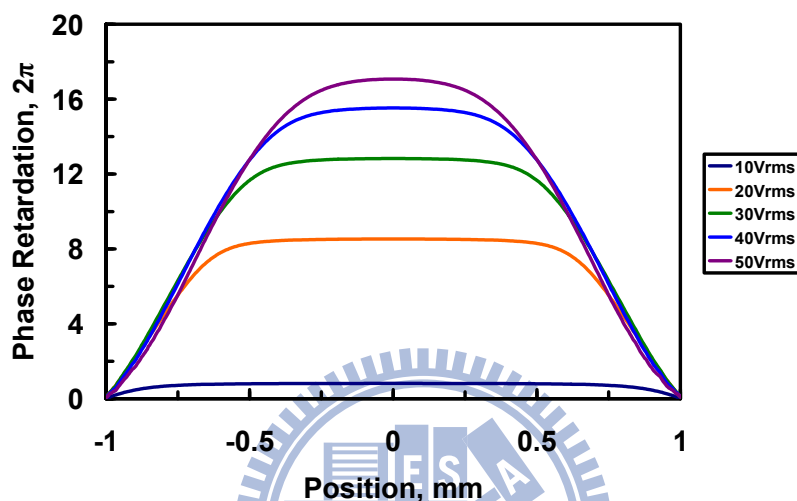


圖 2-17 y 方向的相位延遲分佈模擬

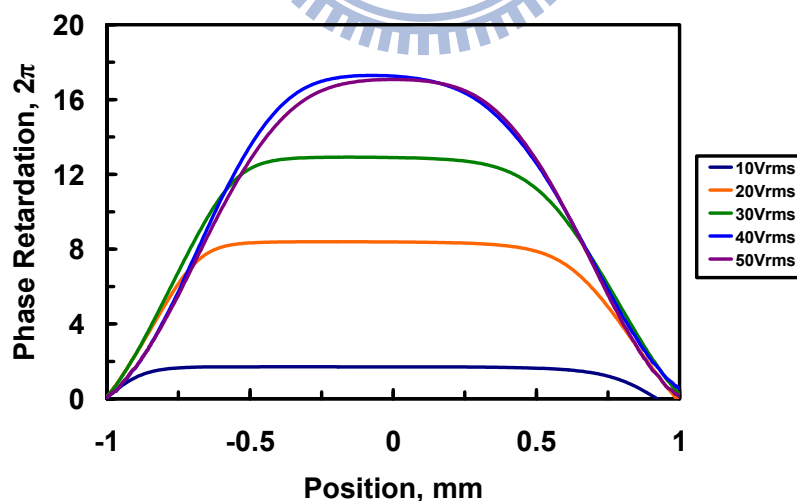


圖 2-18 x 方向的相位延遲分佈模擬

使用 MATLAB 內建 Fitting 的功能對相位延遲分佈圖進行二次方程式 Fitting，可得到係數 a 值，再代入(2-26)式，計算出電壓與焦距的

關係曲線，如圖 2-19 所示。焦距隨著電壓增加而縮短，到了最短焦距時(約 $70V_{\text{rms}}$)，邊緣的折射率已趨近 n_o 而中央的液晶分子轉動甚小，之後電壓再增加，中央的液晶分子轉動角度更大，如圖 2-20 所示。邊緣與中央的相位差減少，焦距會漸漸拉長。外加電壓在 $30V_{\text{rms}}$ 以上時，x 方向與 y 方向焦點開始重合。

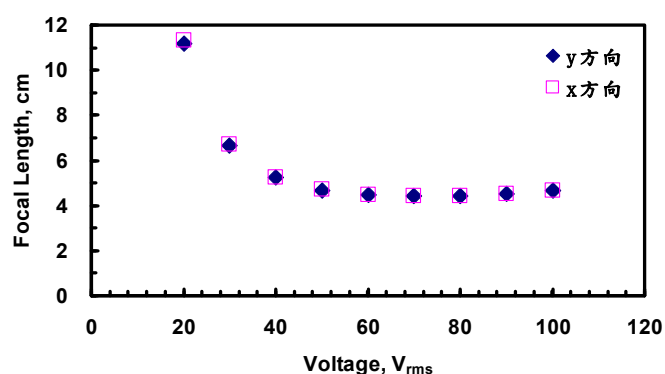


圖 2-19 電壓對 x-y 方向焦距的關係圖

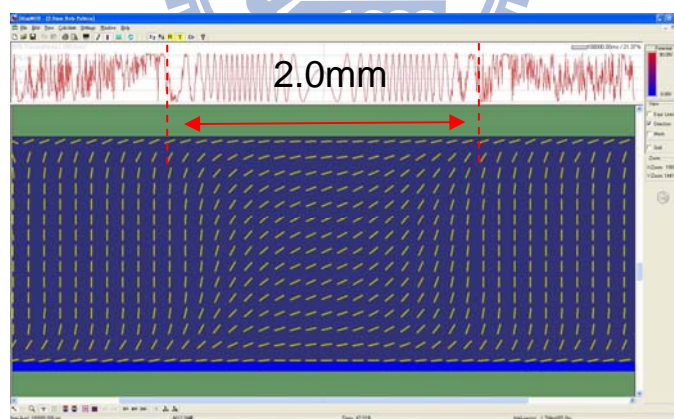


圖 2-20 在電壓 $90V_{\text{rms}}$ 下，液晶的指向排列

第3章 實驗架設與量測

3.1 樣品準備

本實驗的液晶透鏡採用 Prof. Sato 的圓孔電極結構[11]，液晶材料的物理參數如表 3-1 所示。圖 3-1 說明了樣品的結構，上 ITO 電極中央有一被蝕刻掉的圓孔(圓孔直徑為 w)，在上玻璃基板的外側，下電極仍為整片的 ITO 電極，在下玻璃基板的內側，兩玻璃基板中間夾著液晶層(厚度為 d)，上、下基板接觸液晶層的表面均有塗佈聚乙烯胺(Polyimide，簡稱 PI)，上、下的摩擦方向(Rubbing Direction)平行且相反，使液晶朝同一方向整齊排列。我們製作了 4 個樣品，結構均相同，只有圓孔直徑(w)與液晶層厚度(d)條件不同，如表 3-2。

Physical Parameters of Liquid Crystal Material			
Clearing Point	80°C	Test Temperature	20°C
Elastic Constants	k_{11}		11.2pN
	k_{33}		14.3pN
Dielectric Anisotropy	$\Delta\epsilon$	1KHz	16.7
	$\epsilon_{//}$	1KHz	21.8
	ϵ_{\perp}	1KHz	5.1
Birefringence	Δn	589.3nm	0.2609
	n_e	589.3nm	1.7828
	n_o	589.3nm	1.5219
Rotational Viscosity Coefficient	γ_1		217mPas

表 3-1 液晶材料參數表

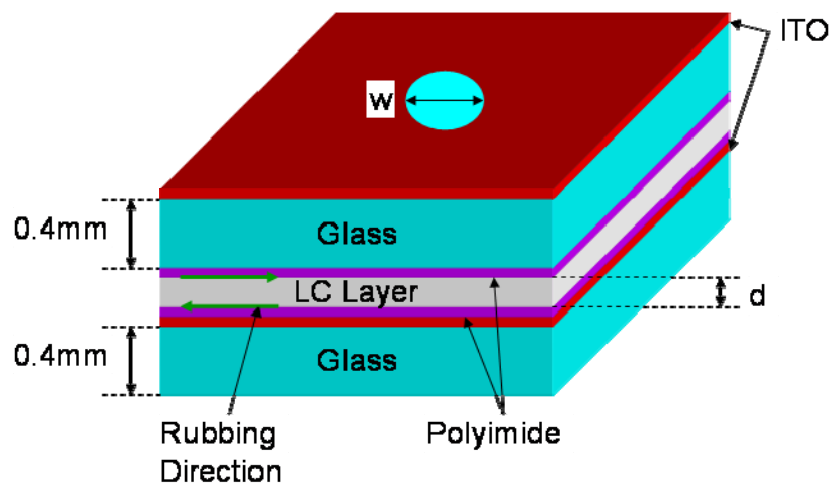


圖 3-1 樣品結構圖

樣品編號	#1	#2	#3	#4
圓孔直徑(w)	1.8mm	2.0mm	2.0mm	2.5mm
液晶層厚度(d)	50 μ m	50 μ m	30 μ m	50 μ m

表 3-2 樣品的尺寸

3.2 實驗架設與量測

儀器名稱	廠商/型號
二極體雷射(Diode Laser) $\lambda=532\text{nm}$	
光偵測器(Detector)	New Focus : Mode2031
放大器(Amplifier)	FLC A400D
示波器(Oscilloscope)	Tektronix : TDS3032
彩色 CCD	Reichert
反射鏡(Mirror)	Newport : 10D10ER.2
衰減片(Attenuator)	Newport : FBS-ND10、FBS-ND5、 FBS-ND3
可調光圈(Iris)	
空間濾波器(Spatial Filter)	
任意波形產生器(Function Generator)	Tektronix : AFG310
偏振片(Polarizer)	光儀(M.G.)
透鏡(Lens)	
溫控系統(Hot-Stage)	Mettler Toledo FP90

表 3-3 儀器列表

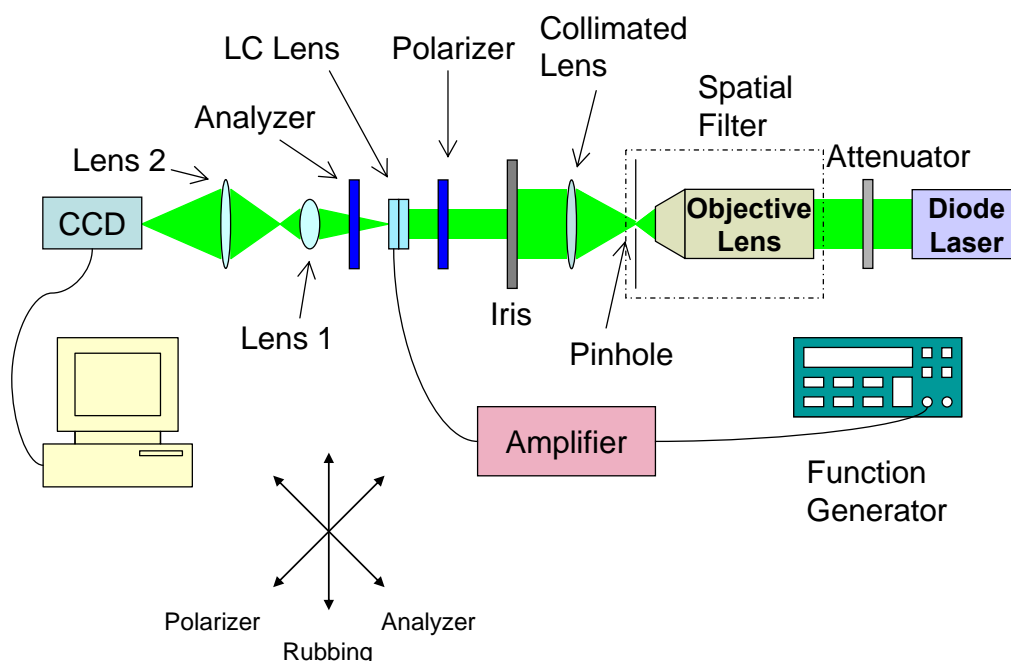


圖 3-2 兩穿透軸正交的偏光片下觀察液晶透鏡之實驗架設

實驗架設如圖 3-2，所使用的雷射光源為二極體雷射 (Diode Laser)，其波長為 532nm，經過衰減片 (Attenuator)，之後經過空間濾波器 (Spatial Filter) 濾掉高頻的雜散光 [40]，再經過一透鏡準直並擴束，以可調光圈 (Iris) 縮放光束大小，使平行光束經過偏光片 (Polarizer) 照在液晶透鏡上，之後再經過一個檢偏片 (Analyzer) 與 2 個共焦透鏡 (焦距：8cm、20cm)，放大 2.5 倍成像至 CCD (Charge Coupled Device)。

本實驗架設所使用的 2 片偏光片穿透軸互相夾 90 度，而液晶透鏡的摩擦方向與偏光片穿透軸夾 45 度角。利用波型產生器 (Function Generator) 產生 1KHz 的交流方波，再經放大器 (Amplifier) 放大電壓來驅動液晶透鏡。透過影像擷取卡將成像於 CCD 的穿透分佈亮暗條紋擷取下來，計數亮紋數代入 (2-22) 式換算出電壓對焦距的關係，再以

LabVIEW 程式解析影像的截面亮度分佈，轉換成相位分佈圖。

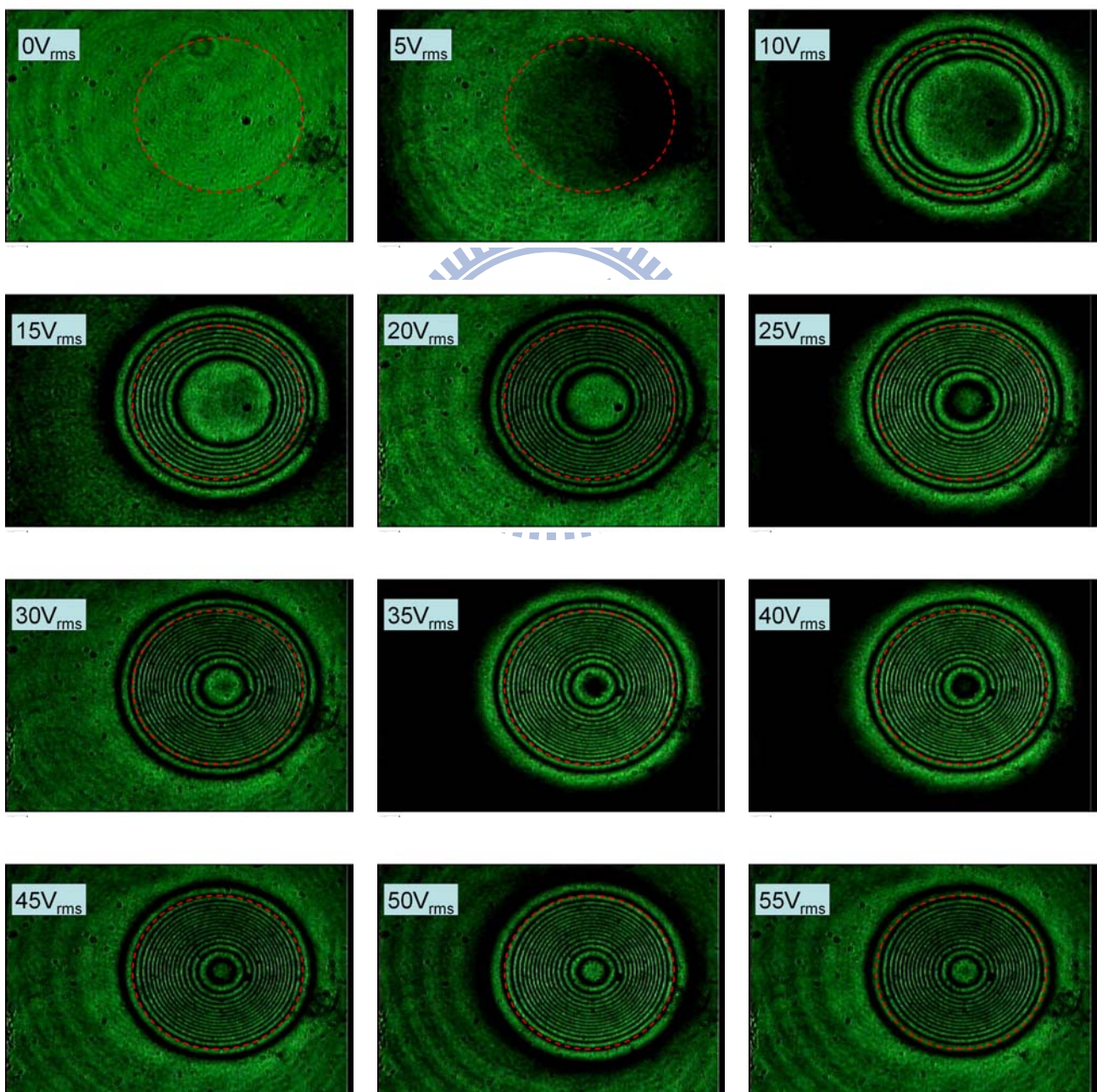
在反應時間量測的實驗架設中，前面的光路架設與圖 3-2 的架設相同，後面光路不同之處在於偏振片穿透軸與液晶透鏡的摩擦方向平行，且拿掉檢偏片、兩個共焦透鏡與 CCD，並在液晶透鏡後方 10cm 處改放置一個光偵測器(Detector)。加電壓時，因為液晶透鏡聚焦，使光強度上升，我們擷取光強度上升至穩定的時間，作為上升時間(Rising Time)，而電壓釋放時，液晶透鏡散焦(Defocusing)，光強度下降，我們擷取光強度下降(90% → 10%)的時間作為下降時間(Decay Time)。

溫度效應的實驗架設與前述兩項的實驗架構相同，不同之處是將液晶透鏡放置於溫控系統(Hot-Stage)的夾治具中，量測不同溫度下的最短焦距變化以及反應時間。

第4章 實驗結果與分析討論

4.1 折射率分佈

在兩穿透軸正交的偏光片下，施以不同電壓，觀察穿透分佈的亮暗條紋，我們以樣品#2 為例，描述亮暗條紋的現象。



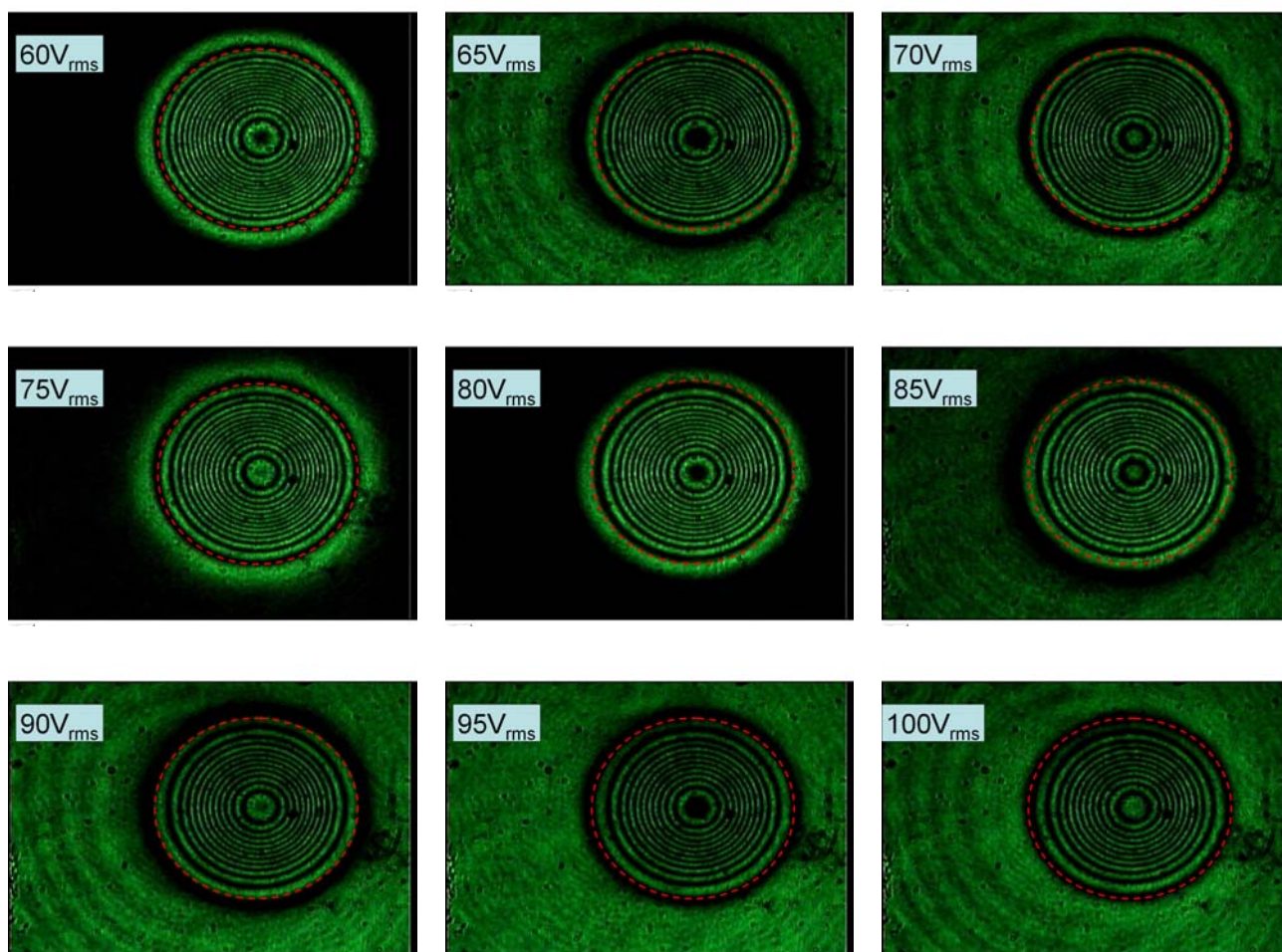


圖 4-1 不同電壓下，樣品#2 的穿透度分佈之亮暗條紋

如圖 4-1，紅色的虛線圓圈為 ITO 圓孔範圍，摩擦方向(Rubbing Direction)為水平方向(訂為 x 方向)。首先，在電壓為 $0V_{rms}$ 時，我們觀察到樣品本身的液晶層厚度並不均勻，有牛頓環的現象。隨著電壓增加，亮暗條紋數向內增加。低電壓下($< 40V_{rms}$)，條紋分佈在 y 方向對稱，在 x 方向則不對稱，這是因為液晶預傾角的原故。當施加電壓越大時，條紋分佈就會趨於對稱，與 2DimMOS 模擬結果相呼應。此外，我們也觀察到亮暗條紋的分佈範圍大於孔徑的範圍，形成一過渡的邊緣效應，但是範圍難以界定，在應用上也無對位的基準。

經過影像截面亮度分佈解析後，以圓孔範圍最邊緣的點為零相位延遲，可以獲得相位延遲分佈的剖面圖，如圖 4-2、圖 4-3 所示，x 方向為摩擦方向，y 方向則為垂直摩擦的方向。觀察到電壓 $10V_{rms}$ 時，液晶透鏡的折射率分佈呈現梯形，中間的相位延遲分佈近乎水平，與高電壓相較之下，較不具有透鏡效果。x 方向的相位延遲分佈並不對稱是因為液晶預傾角的原故。

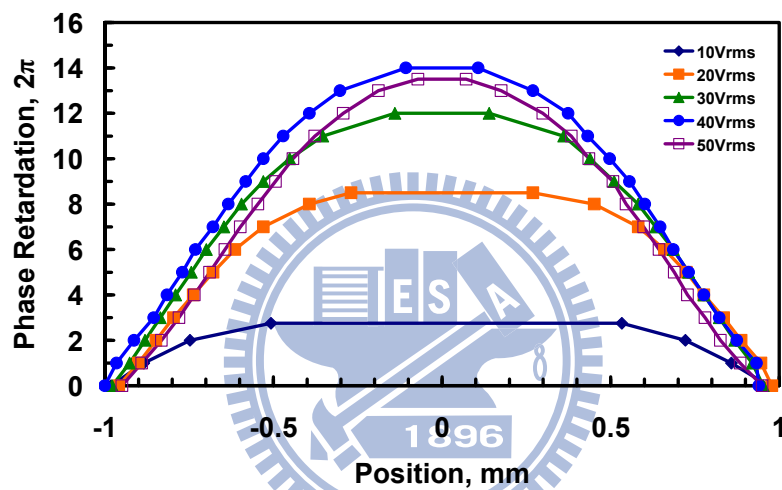


圖 4-2 y 方向的相位延遲分佈實驗結果

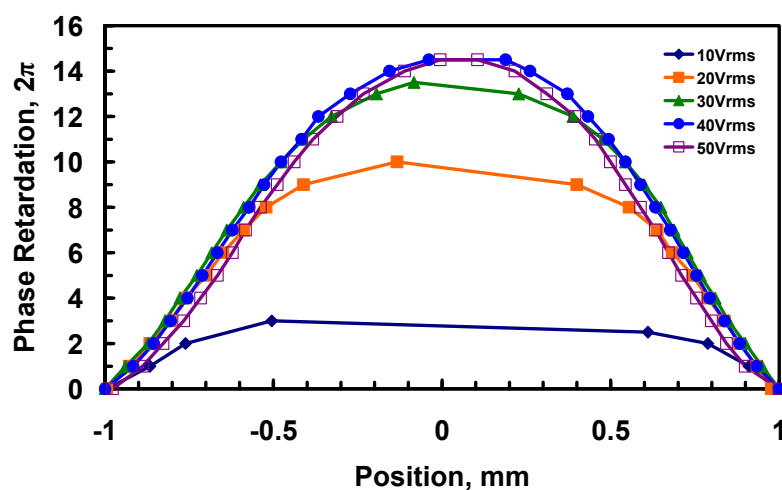


圖 4-3 x 方向的相位延遲分佈實驗結果

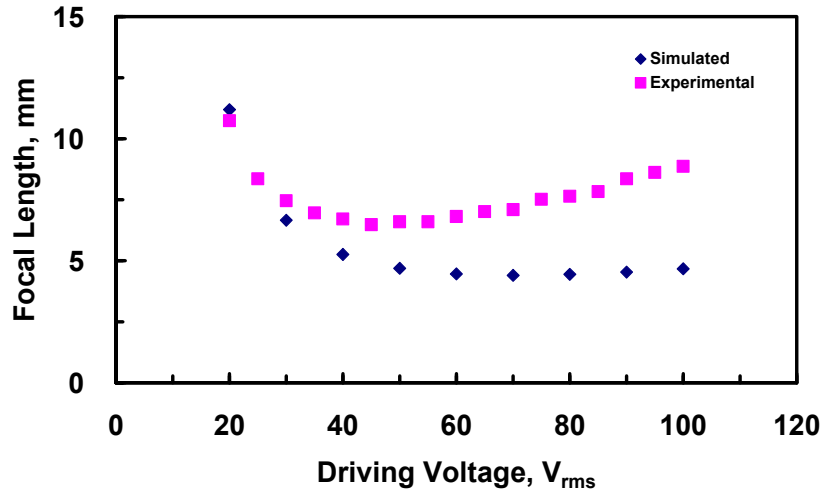


圖 4-4 樣品#2 的模擬與實驗比較圖

圖 4-4 比較樣品#2 焦距的 2DimMOS 模擬與實驗結果，可以發現趨勢相同，均有反轉的現象，但是曲線並不完全吻合，有誤差，我們有以下兩個推測：

- (1) 2DimMOS 的切層數不足所導致，原本 2DimMOS 的功能是用來模擬液晶顯示器，切層數最多只有 50 層，一般液晶顯示器的液晶層厚度約在 $8\mu\text{m}$ 以下，切層數 50 是足夠分析的，然而，液晶透鏡的液晶層厚度有 $50\mu\text{m}$ ，切層數 50 可能就不夠精細。
- (2) 液晶透鏡的相位分佈不是完美的拋物線，因此在 Fitting 時，也會產生誤差。

4.2 電控焦距

4.2.1 不同孔徑之液晶透鏡比較

由(2-18)式可知，焦距與孔徑大小平方成正比，孔徑越小焦距越

短，但是太小的孔徑無法造成中央與邊緣較大的電壓差，而有效利用液晶的雙折射率。因此在相同條件下(玻璃厚度、液晶層厚度、液晶材料均相同)，孔徑大小有一個最佳化的值。我們利用 2DimMOS 模擬 1.8mm、2.0mm 與 2.5mm 的電壓對焦距的變化，如圖 4-5，在同電壓下，1.8mm 的焦距最短。

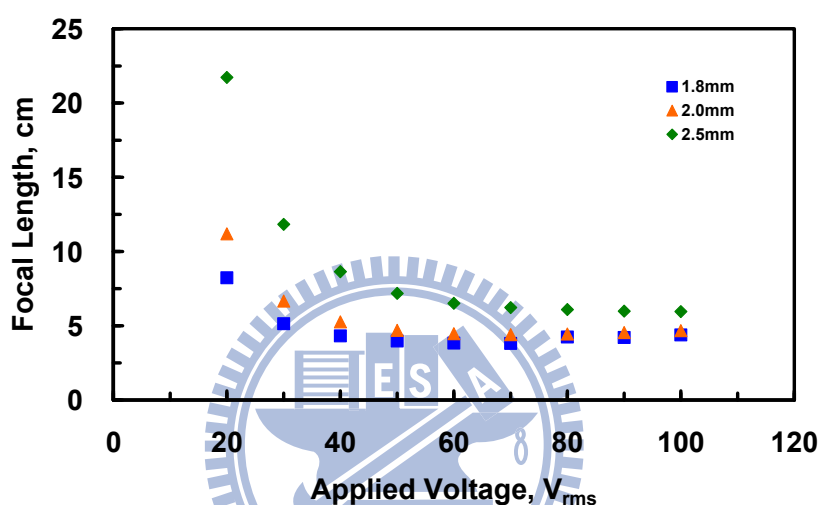


圖 4-5 不同孔徑大小的液晶透鏡，電壓對焦距曲線之模擬結果圖

將相同液晶層厚度、不同孔徑大小的液晶透鏡的電壓對焦距變化之實驗量測值的曲線疊圖作比較，如圖 4-6 所示，在電壓小於 $50V_{rms}$ 時，以孔徑 1.8mm 的液晶透鏡焦距最短，因為孔徑小造成折射率梯度大，使光波波前彎曲大，聚焦較短，與模擬預測相同。但是 1.8mm 過了最短焦距時，焦距會隨電壓明顯增長，長過 2.0mm 的焦距，原因是 1.8mm 與 2.0mm 在邊緣相同電壓下，孔徑較小者，中央的電壓較大，迫使中央液晶分子大幅旋轉，導致邊緣與中央的相位差縮小，焦距增長。從圖 4-6 可獲得各液晶透鏡最短焦距與操作電壓如表 4-1。

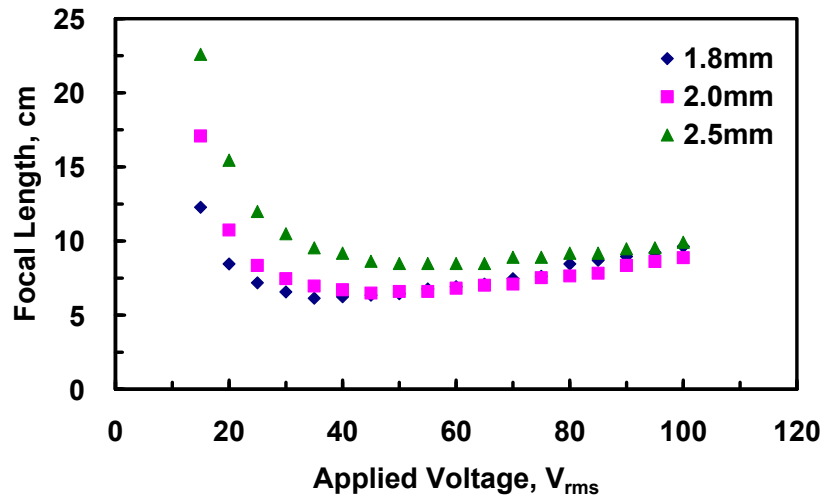


圖 4-6 不同孔徑大小的液晶透鏡，電壓對焦距曲線之實驗結果圖

孔徑大小	1.8mm	2.0mm	2.5mm
最短焦距	6.1cm	6.5cm	8.5cm
操作電壓	35V _{rms}	45V _{rms}	55V _{rms}

表 4-1 不同孔徑大小的液晶透鏡之最短焦距與操作電壓

4.2.2 不同液晶層厚度之液晶透鏡比較

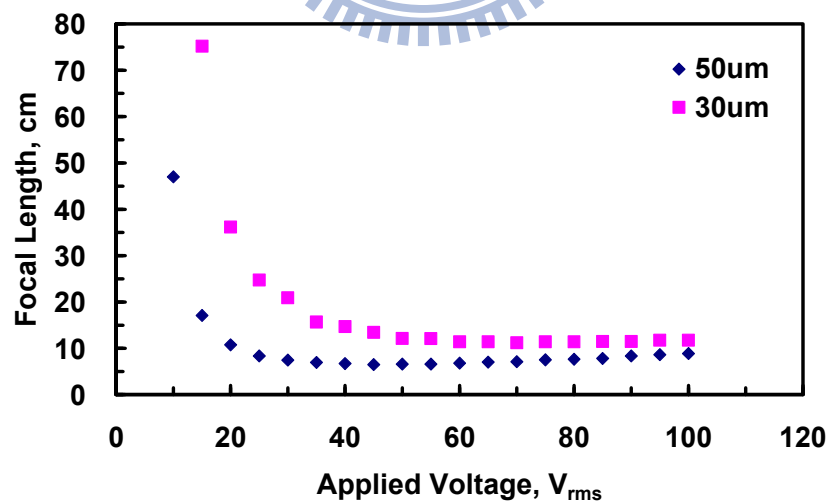


圖 4-7 不同液晶層厚度的液晶透鏡，電壓對焦距曲線之比較

30μm 的液晶透鏡因液晶層厚度比 50μm 的液晶透鏡小，中央與邊緣的相位差也相對減少，導致變焦範圍也跟著縮小，如圖 4-7 所示，

兩者最短焦距的比例與液晶層厚度成反比。

4.3 反應時間

4.3.1 實驗結果

Structure		Operation	
Aperture	Cell Gap	Applied Voltage	Focal Length
1.8mm	50 μ m	0 \leftrightarrow 18V _{rms}	$\infty \leftrightarrow$ 10cm
2.0mm	30 μ m	0 \leftrightarrow 70V _{rms}	$\infty \leftrightarrow$ 11.2cm
2.0mm	50 μ m	0 \leftrightarrow 22V _{rms}	$\infty \leftrightarrow$ 10cm
2.5mm	50 μ m	0 \leftrightarrow 33V _{rms}	$\infty \leftrightarrow$ 10cm

表 4-2 量測反應時間的操作方式

焦距無限遠與 10cm 之間的切換時間為業界常用的標準之一，我們利用內差法求出各液晶透鏡樣品變焦至 10cm 所需的電壓，然後進行反應時間的量測，其中因樣品#3 的液晶透鏡的變焦無法達到 10cm，故採用無限遠與最短焦距之間的切換，如表 4-2。

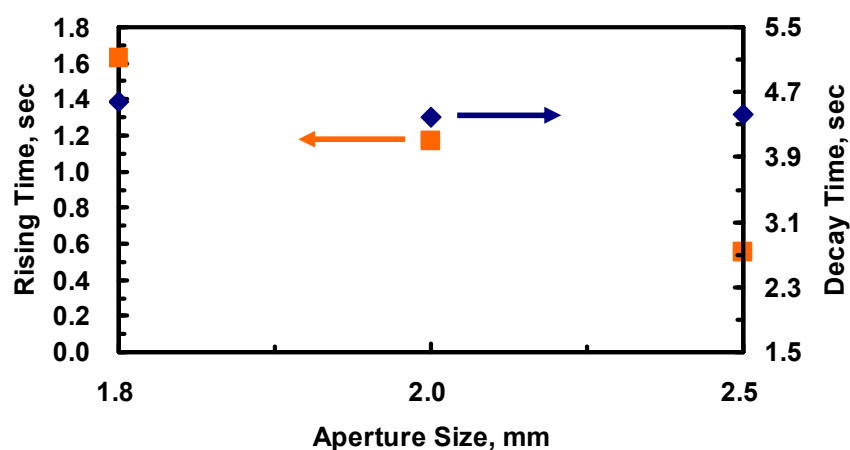


圖 4-8 不同孔徑之液晶透鏡的反應時間

根據(2-29)式，我們知道電壓越大，上升時間也就越短，與實驗結果相同。下降時間表現液晶本質的特性，由(2-28)式可知，下降時

間與電壓無關，僅與材料特性、液晶層厚度有關。因此無論操作電壓大小，只要液晶層厚度相同，下降時間均差異不大，圖 4-8 顯示了實驗結果，2.5mm 的驅動電壓最大，上升時間最快，然而三個樣品的液晶層厚度均差不多，以致下降時間也幾乎相等。

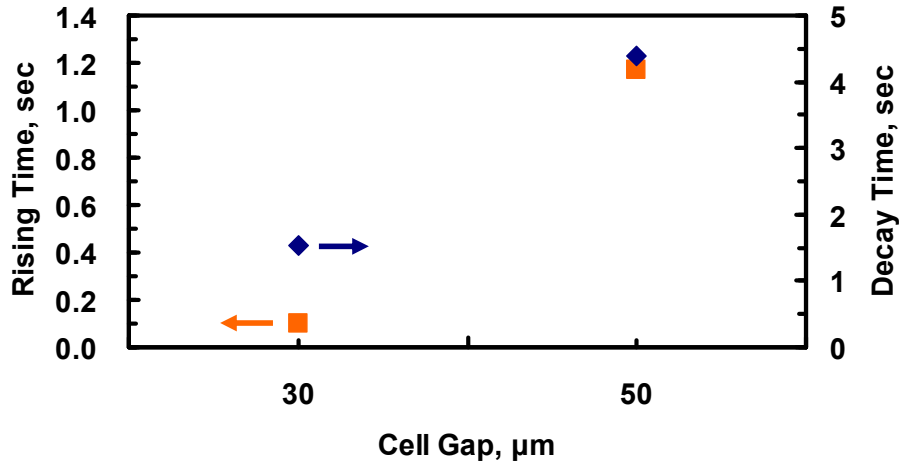


圖 4-9 不同液晶層厚度之液晶透鏡的反應時間

圖 4-9 為液晶層厚度 50 μm 與 30 μm 液晶透鏡反應時間的量測結果，30 μm 的液晶透鏡，因外加電壓相當高，所以上升時間相當快速。由於下降時間正比於液晶層厚度的平方，將實驗值計算比較

$$\frac{\tau_{Decay,30\mu m}}{\tau_{Decay,50\mu m}} = \frac{1.54}{4.40} \cong 0.35 \approx \frac{d_{30\mu m}^2}{d_{50\mu m}^2} = \frac{30^2}{50^2}$$

接近理論值，30 μm 的下降時間僅 50 μm 的 1/3。

4.3.2 分析與討論

雖然上述實驗結果的現象與理論預測相呼應，但是經過計算之後發現，針對液晶層 50 μm 的液晶透鏡之下降時間與理論計算值有約

0.5s 的誤差。

$$\tau_{Decay} = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 k_{11}} = \frac{217 \times 50^2}{3.14^2 \times 11.2} \cong 4908 \approx 4.90 \text{ (sec)}$$

因此，我們懷疑材料本身參數或是液晶層厚度是否正確，尤其是液晶層厚度，因為下降時間與它的平方成正比，只要有一些誤差，就容易影響計算結果。

為了檢驗液晶層厚度，我們設計麥克詹達干涉儀(Mach-Zehnder)實驗量測來協助判斷。底下描述干涉儀的架設與原理，實驗架設如圖 4-10 所示

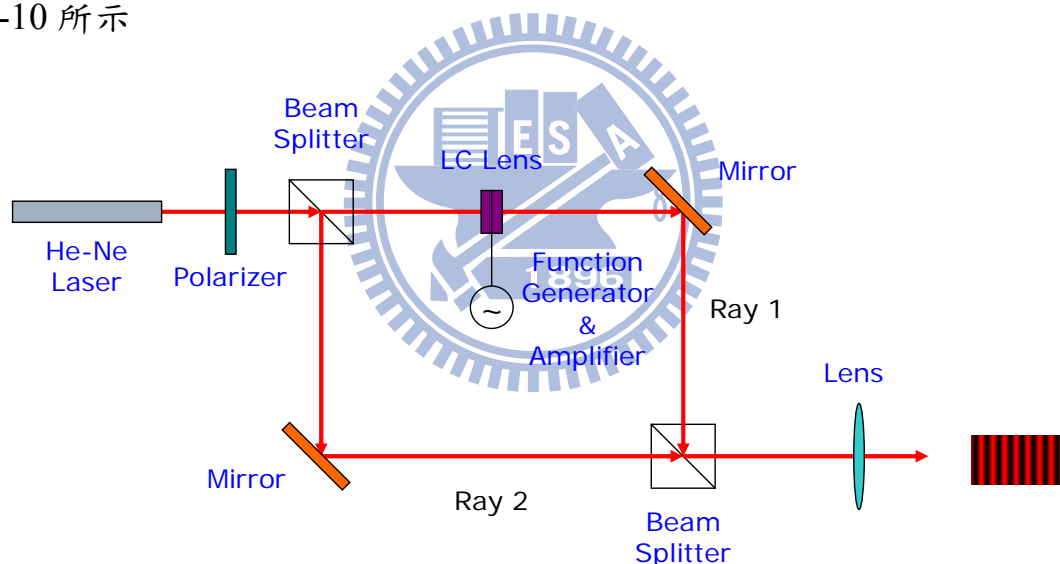


圖 4-10 麥克詹達干涉儀架設圖

波長 633nm 的氦氖雷射光束，經過偏光片(Polarizer)，使偏極化方向與液晶透鏡摩擦方向(Rubbing Direction)平行，再經由分光鏡(Beam Splitter)分成光線一(Ray 1)與光線二(Ray 2)，其中光線一會穿透液晶透鏡的邊緣(孔洞之外的地方)，光線二則單純行進於空氣中，最後光線一與光線二被合併，透過一般透鏡(Lens)，將干涉條紋成像於屏幕

上。

由於光線一與光線二所行徑的光學路徑長不同而產生干涉現象，之間的光程差 Δ 可以表示為

$$\Delta = Ray1 - Ray2 = 2n_g d_g + n_e d_{LC} - n_{air}(d_g + d_{LC}) \quad (4-1)$$

n_g 為玻璃的折射率， d_g 為玻璃厚度， n_{air} 為空氣的折射率。未加電壓時，兩束光線的光程差表示為 Δ_{n_e} ，加電壓時，液晶開始旋轉，等效折射率 $n_{eff}(\theta)$ 隨液晶轉動而變化，造成兩束光線的光程差產生變化，使得干涉條紋移動。當加到高電壓使液晶站直時，兩束光線的光程差則表示為 Δ_{n_o} ，因此加電壓使相位差平移可表示為

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta_{n_e} - \Delta_{n_o}) = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d_{LC} = N \times 2\pi \Rightarrow d_{LC} = \frac{N\lambda}{\Delta n} \quad (4-2)$$

實驗過程，我們使用數位相機(Nikon Coopix995)錄下干涉條紋變化後，於屏幕上做黑色記號，然後計數亮紋的偏移而得到相位平移的變化，如圖 4-11 所示。

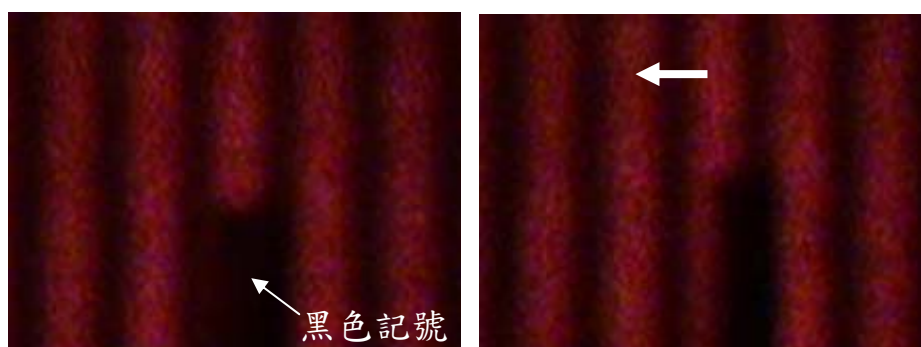


圖 4-11 干涉條紋

實驗計數 $N \cong 19$ 代入(4-2)式

$$d_{LC} = \frac{19 \times 0.633}{0.2609} \cong 46.1 \text{ (}\mu\text{m)}$$

再代入(2-28)式，計算 τ_{Decay}

$$\tau_{Decay} = \frac{217 \times 46.1^2}{3.14^2 \times 11.2} \cong 4172 \approx 4.17 \text{ (sec)}$$

與實驗量測結果比較，誤差約 5%，由這結果，我們知道樣品製作完成後，液晶層會被壓縮而減小，導致實驗值皆小於理論值。所有樣品的干涉條紋數據如表 4-3。

樣品編號	#1	#2	#3	#4
條紋數	18.5	19	10.75	19
液晶層厚度	44.9 μm	46.1 μm	26.1 μm	46.1 μm

表 4-3 液晶透鏡之干涉量測結果

以我們實驗所使用的液晶透鏡的反應速度都相當慢，都是秒為單位，對於應用上十分不利，由此節的實驗結果推論，改善反應時間可分為上升時間改善與下降時間改善，上升時間可以利用外加高電壓來改善，而下降時間可以利用減少液晶層厚度的方式來改善，但是液晶層厚度減少，會造成液晶透鏡相位差減小而變焦範圍縮小，反應時間是未來需要被改善的議題，特別是針對下降時間的改善。此外，由實驗結果與模擬計算比較，使用水平配向的液晶盒(Homogeneous Cell)模型來估計液晶透鏡的下降時間是可行的。

4.4 溫度效應

4.4.1 溫度對最短焦距的影響

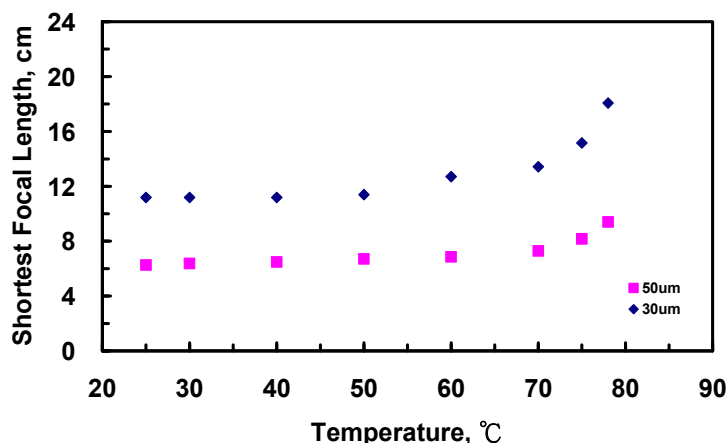


圖 4-12 溫度對最短焦距的實驗結果

溫度影響最短焦距實驗的樣品為孔徑 2.0mm，液晶層厚度分別為 50μm 與 30μm，在室溫下，最短焦距的操作電壓分別為 $45V_{\text{rms}}$ 與 $70V_{\text{rms}}$ ，如圖 4-13 所示，隨著溫度增加，液晶的雙折射率逐漸減小，使得液晶透鏡邊緣與中央的相位差也逐漸下降，最短焦距逐漸增長。當溫度到達相轉移溫度(80°C)時，液晶相轉成液相，失去雙折射率的特性，液晶透鏡便不具變焦的功能，焦距回到無限遠。

50μm 的液晶透鏡在 $25^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 範圍內，最短焦距變化不大，幾乎是呈線性變化， 70°C 比 25°C 拉長了約 1cm， 70°C 以上就會大幅度變化。30μm 的液晶透鏡則是在 $25^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 範圍內幾乎沒有變化，到了 50°C 開始有明顯變化，超過 70°C 最短焦距就會驟增， 70°C 比 25°C 拉長了約 2cm。

4.4.2 溫度對反應時間的影響

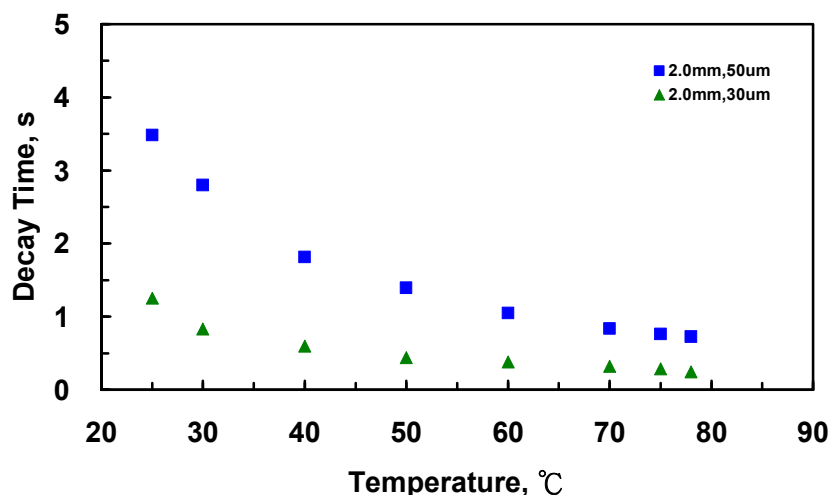


圖 4-13 溫度對下降時間的實驗結果

根據(2-36)式，當溫度上升時，液晶的黏滯係數與彈性係數均會減小，但是黏滯係數以指數的方式減小，下降速度比彈性係數快，使得 γ_1/k_{11} 隨溫度上升而下降，讓下降時間 τ_0 也隨溫度上升而減小。因此若要加速液晶透鏡的反應時間，在不影響最短焦距的前提下，提高溫度是一項選擇。

如圖 4-14 所示，孔徑 2.0mm、液晶層厚度 50μm 的液晶透鏡在 60°C 時的 $\tau_0 \approx 1\text{sec}$ 比 25°C 時快 3.5 倍，而孔徑 2.0mm、液晶層厚度 30μm 的液晶透鏡在 50°C 時的 $\tau_0 \approx 0.4\text{sec}$ 比 25°C 時快 3.25 倍。

4.4.3 結果與討論

在溫度效應的實驗中，我們可以瞭解液晶透鏡對於環境溫度改變，電光特性會有什麼樣的反應，最短焦距代表了液晶透鏡變焦的極限。當溫度上升時，液晶透鏡的變焦範圍也會隨之縮短，在遠離相轉

移溫度的操作溫度下，液晶透鏡的最短焦距對溫度變化並不敏感，在接近相轉移溫度時才有明顯的變化，這個結果有些出乎意料，因為根據(2-32)式子與圖 2-11 的模擬結果可知，液晶材料的雙折射率是對溫度敏感的。我們推測可能是溫度變化影響了液晶分子在平衡態時的旋轉角度，因為彈性常數會隨溫度增加而減小，這需要做進一步確認。溫度對反應時間的實驗結果，趨勢符合(2-36)式子與圖 2-14 的模擬結果，主要原因是旋轉黏滯係數隨溫度上升而下降，液晶分子進行旋轉運動時受到的阻力減少，到達平衡態角度的速度更快。



第5章 結論與未來展望

透過模擬、計算與實驗量測，我們探討了液晶透鏡電控焦距與反應時間的電光特性，以及觀察溫度對焦距和反應時間的影響，總整理後有以下幾點結論：

- (1) 2DimMOS 模擬軟體於電壓對焦距的趨勢與相位延遲分佈的不對稱性提供液晶指向的合理解釋。但無法準確地模擬出電壓對焦距的曲線，與實際量測有誤差，推測是液晶層厚度較大而模擬軟體的切層數不足所致以及二次曲線 Fitting 的誤差所致。
- (2) 此款液晶透鏡在施加電壓過低時，相位延遲分佈呈現梯形狀，且 x 方向與 y 方向的相位延遲分佈也不對稱，聚焦效果不佳，因此使用時需操作在特定的電壓區間($20V_{rms} \sim 100V_{rms}$)。
- (3) 在我們選擇的三種圓孔直徑之中，以直徑 1.8mm 的變焦範圍最大，電壓 $35V_{rms}$ 下，最短焦距可達 6.1cm。
- (4) 若要提升液晶透鏡之反應速度，上升時間可以利用高電壓來加速，而降低液晶層厚度是改善下降時間的一種方法， $50\mu m$ 降至 $30\mu m$ 可改善約 3 倍，但是會因相位差減小造成最短焦變長。
- (5) 提升溫度有助於縮短反應時間，孔徑 2.0mm、液晶層厚度 $50\mu m$ 的液晶透鏡在 $60^{\circ}C$ 時相較於 $25^{\circ}C$ 快 3.5 倍，而孔徑 2.0mm、液晶層厚度 $30\mu m$ 的液晶透鏡在 $50^{\circ}C$ 時相較於 $25^{\circ}C$ 快 3.25 倍，且不影响最短焦距。

在光學系統趨向微型化的潮流下，傳統的光機結構面臨許多尺寸與成本的限制和挑戰。液晶透鏡因輕薄、沒有動件且低成本的優勢，有機會取代現有的光機結構。因此，對於液晶透鏡的特性，未來需要有更多、更深入的研究：

(1) 溫度效應實驗中，我們觀察到液晶透鏡的最短焦距在 $25^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 之間，對溫度變化並不敏感，與液晶雙折射率對溫度的敏感有些矛盾，需要找出合理的解釋。

(2) 在溫度效應實驗中，我們只對液晶透鏡進行升溫過程的實驗量測，需要進一步量測降溫過程的最短焦距與反應時間的變化，可討論溫度的滯後現象(Hysteresis)。

(3) 將液晶透鏡與微型投影機(Pico Projector)或網路攝影機(Webcam)結果，在不同溫度下，拍攝影像，可觀察溫度對液晶透鏡折射率分佈是否造成影響且改變成像品質。

(4) 將液晶透鏡的折射率分佈曲率，輸入至光學模擬軟體，分析像差，並與傳統鏡頭搭配，分析液晶透鏡的加入，會引起哪些光學成像品質的變化，例如球差(Spherical Aberration)、MTF (Modulation Transfer Function)上升或下降等。首先，我們知道 GRIN 透鏡的折射率分佈關係式[5]如下

$$n(r) = N_0 + N_1 r^2 + N_2 r^4 + \dots \quad (5-1)$$

可以利用 Fitting 的方式，將液晶透鏡折射率分佈的偶次項係數

($N_i, i=0,2,4,\dots$)找出來，輸入光學模擬軟體分析。在這裡以 OSLO 光學模擬軟體為例子，初步先 Fitting 出二次項係數，再搭配柯克三合鏡(Cooke Triplet)，進行模擬光學追跡(Ray Tracing)，如圖 5-1 所示。

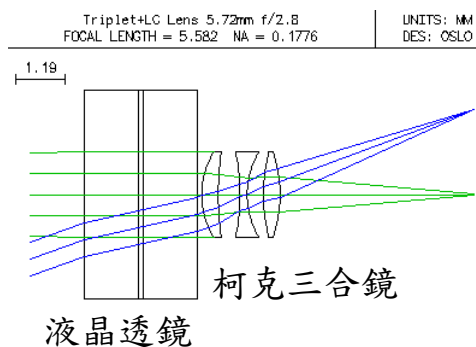


圖 5-1 液晶透鏡與柯克三合鏡

未來希望能搭配商品化的鏡頭，並以業界常用的 Code V 與 ZEMAX 光學模擬軟體進行設計，開發合適於液晶透鏡的固態鏡頭。

參考文獻

- [1] 賴耿陽，*液晶製法與應用*，台南，民國九十年六月。
- [2] 紀國鐘，鄭晃忠，*液晶顯示器技術手冊*，二版，新竹，民國九十二年十一月。
- [3] 松本正一，角田正良，*液晶之基礎與應用*，國立編譯館出版，1996。
- [4] Eugene Hecht, *Optics*, 4th Edition, Addison Wesley, San Francisco, 2002.
- [5] Ericb W. Marchand, *Gradient Index Optics*, New York.
- [6] Susumu Sato, “Liquid-Crystal Lens-Cells with Variable Focal Length”, Jpn. J. Appl. Phys. **18**, 1679 (1979).
- [7] M. Hain, R. Gloeckner, S. Bhattacharya, D. Dias, S. Stankovic, T. Tschudi, “Fast Switching Liquid Crystal Lenses for a Dual Focus Digital Versatile Disc Pickup”, Optics Communications **188**, 291 (2001).
- [8] Suk-Ho Chung, Seong-Wook Choi, Young-Joo Kim, Han-Jin Ahn, and Hong-Koo Baik, “Liquid Crystal Lens for Compensation of Spherical Aberration in Multilayer Optical Data Storage”, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 1152 (2006).
- [9] A. F. Naumov and M. Yu. Loktev, “Liquid-Crystal Adaptive Lenses with Modal Control”, Optics Letters **23**, 992 (1998).
- [10] A. F. Naumov and G. D. Love, “Control Optimization of Spherical Modal Liquid Crystal Lenses”, Optics Express **4**, 344 (1999).
- [11] Mao Ye and Susumu Sato, “Optical Properties of Liquid Crystal Lens of Any Size”, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, L571 (2002).
- [12] Mao Ye and Susumu Sato, “Liquid Crystal Lens with Focus Movable along and off Axis”, Optics Communications, **225**, 277 (2003).
- [13] Mao Ye and Susumu Sato, “Liquid Crystal Lens with Insulator Layers for Focusing Light Waves of Arbitrary Polarizations”, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 6439 (2003).
- [14] Mao Ye, Bin Wang and Susumu Sato, “Liquid-Crystal Lens with a Focal Length that is Variable in a Wide Range”, Applied Optics, **43**, 6407 (2004).
- [15] Hongwen Ren, Yun-Hsing Fan, Sebastian Gauza, and Shin-Tson Wu,

- “Tunable-Focus Flat Liquid Crystal Spherical Lens”, *Applied Physics Letters*, **84**, 4789 (2004).
- [16] Bin Wang, Mao Ye, Michinori Honma, Toshiaki Nose, and Susumu Sato, “Liquid Crystal Lens with Spherical Electrode”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L1232 (2002).
- [17] Y. J. Liu, X. W. Sun, and Q. Wang, “A Focus-Switchable Lens Made of Polymer-Liquid Crystal Composite”, *Journal of Crystal Growth* **288**, 192 (2006).
- [18] Hongwen Ren, Yun-Hsing Fan, and Shih-Tson Wu, “Liquid-Crystal Microlens Arrays Using Patterned Polymer Networks”, *Optics Letters* **29**, 1608 (2004).
- [19] Hongwen Ren, Yun-Hsing Fan, and Yi-Hsin Lin, Shin-Tson Wu, “Tunable-Focus Microlens Arrays Using Nanosized Polymer-Dispersed Liquid Crystal Droplets”, *Optics Communications* **247**, 101 (2005).
- [20] Hongwen Ren and Shin-Tson Wu, “Tunable Electronic Lens Using a Gradient Polymer Network Liquid Crystal”, *Applied Physics Letters*, **82**, 22 (2003).
- [21] Mao Ye, Bin Wang, and Susumu Sato, “Polarization-Independent Liquid Crystal Lens with Four Liquid Crystal Layers”, *IEEE Photonics Technology Letters* **18**, 505 (2006).
- [22] M. Ye, M. Noguchi, B. Wang and S. Sato, “Zoom Lens System without Moving Elements Realised Using Liquid Crystal Lenses”, *Electronics Letters*, **45**, 12 (2009).
- [23] Joachim Knittel, Hartmut Richter, Mathias Hain, Somakanthan Somalingam, Theo Tschudi, “A Temperature Controlled Liquid Crystal Lens for Spherical Aberration Compensation”, *Microsyst Technol* **13**, 161 (2007).
- [24] Mao Ye, Bin Wang, Takeshi Takahashi and Susumu Sato, “Properties of Variable-Focus Liquid Crystal Lens and Its Application in Focusing System”, *Optical Review* **14**, 173 (2007).
- [25] Mao Ye, Bin Wang, Marenori Kawamura and Susumu Sato, “Image Formation Using Liquid Crystal Lens”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 6776 (2007).
- [26] Marenori Kawamura, Mao Ye and Susumu Sato, “Optical Trapping

- and Manipulation System Using Liquid-Crystal Lens with Focusing and Deflection Properties”, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, 6098 (2005).
- [27] Philip J. W. Hands, Svetlana A. Tatarkova, Andrew K. Kirby and Gordon D. Love, “Modal Liquid Crystal Devices in Optical Tweezing: 3D Control and Oscillating Potential Wells”, Optics Express **14**, 4525 (2006).
- [28] Marenori Kawamura, Hiroyuki Umeda and Susumu Sato, “Optical Trap for Manipulating Plural Particles by Using a Liquid Crystal Device”, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **510**, 191 (2009).
- [29] Shiro Suyama, Munekazu Date and Hideaki Takada, “Three-Dimensional Display System with Dual-Frequency Liquid-Crystal Varifocal Lens”, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 480 (2000).
- [30] Maarten Sluijter, Angie Herzog, Dick K. G. De Boer, Marcel P. C. M. Krijn and H. Paul Urbach, ”Ray-Tracing Simulations of Liquid-Crystal Gradient-Index Lenses for Three-Dimensional Displays”, J. Opt. Soc. Am. B **26**, 2035 (2009).
- [31] 戴亞翔，*TFT-LCD 面板的驅動與設計*，初版，五南圖書，台北，2006 年 4。
- [32] Iam-Choon Khoo and Shin-Tson, *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals*, World Scientific, Singapore, 1993.
- [33] Pochi Ye and Claire Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*, Wiley Interscience, Canada, 1999.
- [34] Stephen T. Kowel, Dennis S. Cleverly, and Philipp G. Kornreich, “Focusing by Electrical Modulation of Refraction in a Liquid Crystal Cell”, Applied Optics, **23**, 278 (1984).
- [35] Joseph W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Singapore, 1996.
- [36] Hongwen Ren, David W. Fox, Benjamin Wu, and Shin-Tson Wu, “Liquid Crystal Lens with Large Focal Length Tunability and Low Operating Voltage,” Optics Express, **15**, 11328 (2007).
- [37] Mao Ye and Susumu Sato, “New Method of Voltage Application for Improving Response Time of a Liquid Crystal Lens”, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **433**, 229 (2005).
- [38] Deng-Ke Yang and Shin-Tson Wu, *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*, John Wiley & Sons, Ltd, England, 2006.

- [39] Shin-Tson Wu, Deng-Ke Yang, *Reflective Liquid Crystal Displays*, John Wiley & Sons, Ltd, England, 2001.
- [40] Naftaly Menn, *Practical Optics*, Elsevier Academic Press, USA, 2004.

