

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

膽固醇液晶材料特性與穩定灰階之研究

Material Properties and Stable Gray Scale of
Cholesteric Liquid Crystals

研 究 生：林毓翔

指 導 教 授：陳 皇 銘 博 士

中 華 民 國 一 百 年 八 月

膽固醇液晶材料特性與穩定灰階之研究

Material Properties and Stable Gray Scale of Cholesteric Liquid Crystals

研究 生：林毓翔

Student : Yu-Hsiang Lin

指 導 教 授：陳 皇 銘 博 士

Advisor : Dr. Huang-Ming Philip Chen



A Thesis

Submitted to the Institute of Electro-Optical Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

In

Electro-Optical Engineering

August 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 百 年 八 月

膽固醇液晶材料特性與穩定灰階之研究

學生：林毓翔

指導教授：陳皇銘

國立交通大學光電工程研究所



本研究中針對液晶的介電異向性及黏滯係數的差異做光電特性上的探討，並以有配向條件的下達成穩定灰階。實驗中，驅動電壓主要受介電異向性影響，而黏滯係數主要影響反應時間。此外，降低液晶盒間隙可有效改善驅動電壓，但也因此液晶受到邊界效應的影響更為明顯。實驗量測最佳結果 $V_{th} = 5.5V$, $V_{sat} = 9V$, $V_{reset} = 28V$, 但反應時間從 50 ms 增加至 300 ms。

灰階驅動方面，以有配向條件下， Planar 與 Focal conic state 反射率差異甚距，為達到灰階必須維持兩狀態的區塊共存。此外，表面配向給予膽固醇液晶排列作用，但在驅動至 Focal conic state 後除去電壓，穩態仍會受到影響，導致反射率隨時間不斷改變。實驗中我們以三種方式達到穩定灰階，其中以主動式的驅動方式可以達到最快（500ms）且最穩定的灰階。

Material Properties and Stable Gray Scale of Cholesteric Liquid crystals

Student: Yu-Hsiang Lin

Advisor: Dr. Huang-Ming Philip Chen

**Institute of Electro-Optical Engineering
National Chiao Tung University**

ABSTRACT

In this thesis, the influence of liquid crystals dielectric anisotropy and viscosity on electro-optical properties are discussed. The stable gray scale can be achieved in the case with surface rubbing. The driving voltage and response time are mainly affected by dielectric anisotropy and viscosity respectively. High dielectric anisotropy and small cell gap will cause low driving voltage, $V_{th}=5.5V$, $V_{sat}=9V$, $V_{reset}=28V$. Decreasing cell gap, however, increases response time from 50 ms to 300 ms due to the strong boundary condition.

In order to achieve gray scale in the case with rubbing, the reflective planar and scattering focal conic state have to be maintained at the same time. Besides, the stability of focal conic state will be affected by surface alignment after removing the driving voltage. 3 multi-level gray scale methods can be achieved via either active or passive driving. The active driving method has the fastest driving time (500 ms) and the most stable gray scale.

誌謝

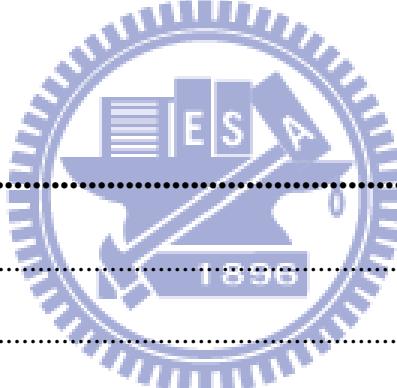
首先，誠摯地感謝指導教授陳皇銘老師在我兩年的碩士班生涯中給予許多教誨、關懷與鼓勵。實驗室提供了良好的設備及實驗環境讓我們可以專心在研究上，固定的報告使我們培養邏輯思考以及敘述的能力，不僅在研究領域上用心，更培養我們成為更全方位的人才，兩年之中真的是獲益良多。

碩士生活間，感謝智一及則賢學長的指導與照顧，在實驗遇到困難時，常常為我開導，給予我不同的思考方向。感謝淇文學長，總是一眼就能觀察出我的問題，特別在我的會議口頭報告時，不厭其煩的為我糾正及檢討內容。感謝實驗室的同學鎮廷、季康、瑞然、思維、家煌、瑞玲的陪伴及實驗上的協助。感謝華映的玉仙、寶寶、欣敏在季報時一同努力。

最後，我要感謝我的家人，給予我支持跟鼓勵，在求學路上走了十八年，始終都讓我無後顧之憂的專心於學習、研究以及玩樂，我很幸運有這樣的家庭，未來也希望能讓家人無後顧之憂的度過。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xi

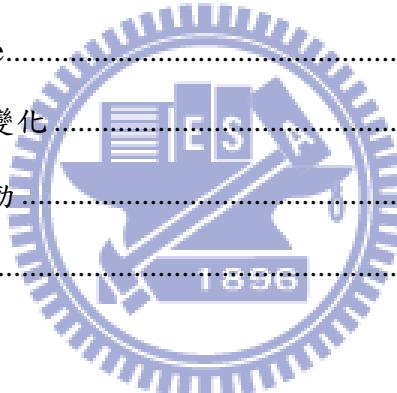


第一章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 液晶簡介	2
1.2.1 液晶相	2
1.2.2 向列型液晶	3
1.2.3 膽固醇型液晶	4
1.3 全彩膽固醇液晶顯示器	5
1.4 Polymer Stabilized Cholesteric Texture, PSCT	5
1.4.1 Normal Mode.....	5
1.4.2 Reverse Mode	6
1.5 Polymer Dispersed Cholesteric Liquid Crystal, PDCLC	7
1.5.1 Emulsification.....	8
1.5.2 Phase separation	8

1.6	膽固醇液晶顯示器商品實例	10
1.7	研究動機與目的	11
1.8	論文架構	11

第二章 實驗相關原理 12

2.1	液晶光學	12
2.2	膽固醇液晶之狀態結構特性	14
2.2.1	Planar Texture.....	14
2.2.2	Focal Conic Texture	15
2.2.3	Fingerprint Texture.....	16
2.2.4	Homeotropic Texture.....	16
2.3	膽固醇液晶之狀態變化	17
2.4	傳統膽固醇液晶驅動	20
2.5	色座標系統	21

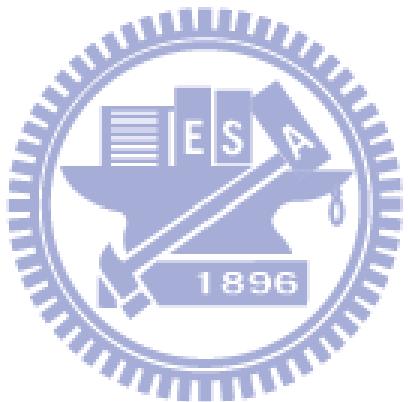


第三章 量測系統與製程設備 23

3.1	引言	23
3.2	Lambda-950 光譜儀.....	23
3.2.1	穿透式量測	24
3.2.2	反射式量測	26
3.3	Eye-one pro 光譜儀	27
3.4	液晶分析系統 (LCAS 3)	28
3.5	偏光顯微鏡 (POM)	30
3.6	雷射光學系統	31
3.7	實驗製程設備	32

第四章 實驗製程與結果分析	33
4.1 引言	33
4.2 實驗製程	33
4.2.1 清洗基板	34
4.2.2 旋轉塗佈配向層	34
4.2.3 研磨配向	35
4.2.4 後段製程	35
4.3 表面配向對膽固醇液晶的影響	36
4.3.1 反射型態影響	36
4.3.2 電壓驅動表現上影響	38
4.3.3 穩定性影響	41
4.3.4 結論	42
4.4 液晶參數的影響	43
4.4.1 材料參數	43
4.4.2 介電異向性影響	44
4.4.3 黏滯係數影響	46
4.4.4 液晶盒間隙影響	47
4.4.5 結論	50
4.5 高反射率膽固醇液晶的穩定灰階	51
4.5.1 穩定液晶狀態	51
4.5.2 灰階一：從 Focal conic state 形成	53
4.5.3 灰階二：從 Homeotropic state 形成	55
4.5.4 灰階三：從 Planar state 形成	57
4.4.5 結論	59

第五章 結論	60
第六章 未來展望	61
Reference.....	62



圖目錄

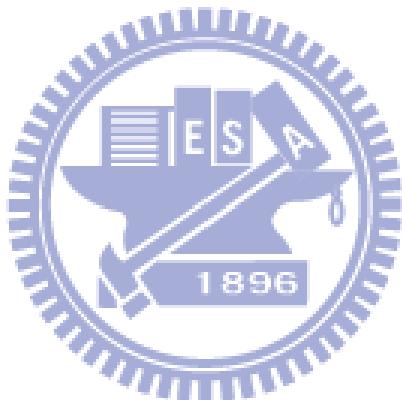
圖 1.1.1	電子書技術近況	2
圖 1.2.1	液晶相的溫度關係圖	3
圖 1.2.2	液晶排列指向性	4
圖 1.2.3	膽固醇液晶排列結構	4
圖 1.3.1	膽固醇液晶全彩顯示模式 (a)單層 (b)三層堆疊	5
圖 1.4.1	Normal mode PSCT (a)Homeotropic state 照光固化 (b)固化後除去電壓	6
圖 1.4.2	Normal mode PSCT 之應用	6
圖 1.4.3	Reverse mode PSCT (a)Planar state 照光固化 (b)固化後除去電壓	7
圖 1.4.4	Reverse mode PSCT 之應用	7
圖 1.5.1	(a)CLC droplet (b)CLC 以乳化法製作在軟性材質基板	8
圖 1.5.2	Kent Displays PIPS CLC 之研究 (a)(b)基本光學特性 (c)1.85 吋展示， 100dpi , 16 灰階 (d)(e)20×24 全彩顯示	9
圖 1.5.3	TIPS CLC (a)反射頻譜圖 (b)Planar state POM 圖 (c)Focal conic state POM 圖	10
圖 1.6.1	(a) Fujitsu FLEPiA , (b)(c) Magink 6m ² billboard 白天/晚上	10
圖 2.1.1	折射率橢圓球	12
圖 2.1.2	偏振光相位延遲	13
圖 2.2.1	膽固醇液晶之排列狀態 (a)Planar (b)Focal conic (c)Fingerprint (d)Homeotropic state	14
圖 2.2.2	Planar state 模擬 (a)反射率與螺距數之關係 (b)反射頻寬與 Δn 之關係 ..	15
圖 2.2.3	顯微鏡下的 Fingerprint Texture	16
圖 2.3.1	膽固醇液晶狀態間的轉換	17
圖 2.3.2	(a)Oily streak (b)Helfrich deformation 切面示意圖	19

圖 2.4.1	傳統驅動模式 (a)40ms 電壓脈衝訊號 (b)驅動後結果	20
圖 2.5.1	(a)Color matching function (b)CIELAB 色座標	22
圖 3.2.1	UV/Vis spectrophotometer Lambda 950.....	23
圖 3.2.2	光路示意圖	24
圖 3.2.3	量測空液晶盒間隙的光譜圖	25
圖 3.2.4	(a)固定角量測光路圖 (b)可變角量測光路圖	26
圖 3.3.1	(a)Eye-one 裝置圖 (b)Eye-one 反射量測光路圖	27
圖 3.4.1	液晶分析系統裝置圖	28
圖 3.4.2	(a)電容—電壓關係圖 (b)電容—(V_{th}/V_{rms}) 關係圖	29
圖 3.5.1	POM Olympus BX51 裝置	30
圖 3.6.1	雷射光學系統架構	31
圖 4.2.1	製程流程圖	33
圖 4.3.1	膽固醇液晶排列情況示意圖 (a)有配向 (b)無配向	36
圖 4.3.2	膽固醇液晶 Planar state 排列的 POM 圖 (a)有配向 (b)無配向	37
圖 4.3.3	在有／無配向條件下膽固醇液晶 Planar state 反射頻譜量測 (a) lambda-950 (b) eye-one 量測	37
圖 4.3.4	有配向之膽固醇液晶 20V 驅動至 Focal conic state 狀態變化 (a)Planar , 驅動後 (b)3 秒 (c)5 秒 (d)8 秒 (e)10 秒 (f)15 秒	38
圖 4.3.5	無配向之膽固醇液晶 12V 驅動至 Focal conic state 狀態變化 (a)Planar , 驅動後 (b)10s (c)20	39
圖 4.3.6	無配向之膽固醇液晶驅動至 Focal conic state 狀態變化 (a)Planar , 驅動後 (b)5 秒 (c)10 秒 (d)25 秒 (e)20 秒 (f)30 秒	39
圖 4.3.7	在有／無配向條件下的色偏曲線	40
圖 4.3.8	在有／無配向條件下，以 30V 驅動至 Focal conic state，其穩態隨時間 變化	42
圖 4.4.1	旋性分子化學式	44

圖 4.4.2	LCT-10-831 與 LCT-10-832 的電壓響應結果.....	44
圖 4.4.3	$8\mu\text{m}$ 反應時間 (a)(b)LCT-10-831 (c)(d)LCT-10-832	45
圖 4.4.4	LCT-10-831、LCT-10-832 與 MJ01744 的電壓響應結果.....	46
圖 4.4.5	MJ01744_8 μm 反應時間 (a)on time (b)off time.....	47
圖 4.4.6	(a)不同液晶與間隙之色偏曲線整理 (b)不同液晶盒間隙 Planar state 比較	48
圖 4.4.7	$4\mu\text{m}$ 反應時間 (a)MJ01744 (b)LCT-10-831	49
圖 4.5.1	POM 底下膽固醇液晶 planar state 與 focal conic state 共存狀態	51
圖 4.5.2	V_{reset} 後，持續施加小電壓穩定液晶狀態之測試，施加小電壓為 (a)5V (b)5.5V (c)6V (d)6.5V	52
圖 4.5.3	有配向之下 Focal conic state 穩態變化，驅動至 Focal conic state 電壓 (a)30V (b)40V (c)50V	53
圖 4.5.4	Focal conic state 穩態比較 (a)有配向 (b)無配向	54
圖 4.5.5	有表面配向在 V_{reset} 放電壓之後的變化情形 (a)3 秒後 (b)5 秒後 (c)10 秒後.....	55
圖 4.5.6	從 Homeotropic state 達到灰階之電壓驅動設計	56
圖 4.5.7	從 Homeotropic state 達到灰階之驅動結果，waiting time 為 (a)1 秒 (b)2 秒 (c)3 秒.....	56
圖 4.5.8	以 20V 驅動之狀態變化，驅動後 (a)3 秒 (b)5 秒 (c)8 秒.....	57
圖 4.5.9	以 25V 驅動之狀態變化，驅動後 (a)3 秒 (b)4 秒 (c)5 秒.....	57
圖 4.5.10	從 Planar state 達到灰階之電壓驅動設計.....	58
圖 4.5.11	從 Planar state 達到灰階之驅動結果， V_x 為 (a)32V (b)32.6V (c)33.2V.....	58
圖 4.5.12	驅動結果所對應色偏變化圖	59
圖 5.2.1	奈米粒子突起之配向層表面	61

表目錄

表 4.2.1	PI 配向層旋轉塗佈參數.....	34
表 4.2.2	基板配向參數	35
表 4.4.1	液晶材料參數	43
表 4.2.2	LCT-10-831 與 LCT-10-832 反應時間	45
表 4.2.3	8 μ m 反應時間整理.....	47
表 4.4.4	不同液晶與液晶盒間隙量測之色偏曲線相應電壓值	48
表 4.4.5	4 μ m 反應時間整理	49



第一章 序論

1.1 研究背景

隨著全球強烈環保概念題材，集低耗電、輕便薄型化以及減少紙張耗量等訴求的電子紙顯示器，已逐漸成為科技業寄望再創一波電腦風潮的新應用。近年來，黑白電子紙的發展技術已相對成熟，並且已邁向可饒式、彩色式以及影音播放媒介的研究方向。在現今彩色電子紙產品中，相較於實體印刷紙張，在解析度、灰階及反射率上仍顯不足，未來發展也將進一步改善這些問題。



電子紙包含多種反射型顯示技術，大致分為粒子顯示器 (particle display)、液晶顯示器 (LCD)，以及微機電系統 (MEMS) 顯示器。粒子顯示器包括電激發光顯示器 (electrochromic display, ECD) 以及電泳式顯示器 (electrophoretic display, EPD)；而 LCD 主要是膽固醇液晶 (ChLCD) 和有的雙穩態扭曲向列 (twisted nematic, TN) LCD。在電子紙領域有不少供應商，包括從事 ChLCD 製造的 Kent Displays 以及 Fujitsu Frontech；從事 EPD 製造的 E Ink 以及 SiPix Imaging；從事雙穩態 TN LCD 製造的 Nemoptic 以及 ZBD Display；以及從事干涉調變 (Interferometric, IMOD) MEMS 顯示器製造的 Qualcomm；此外 Varitronix 製造 ChLCDs 和雙穩態 TN LCD。

圖 1.1.1 為目前主流電子紙技術在顯示器表現上的概況，其技術尚有研究團隊投入其中，且至少推出過一種可能商品化的實體[1]。本篇論文以膽固醇液晶做為研究主題，因此在此章節中將會簡短介紹液晶排列結構及性質，以及目前膽固醇液晶應用於電子書的原理及發展現況。

	Electrophoretic (commercial)	Electrophoretic (R&D)	In-Plane Electrophoretic	Electrophoretic Electrokinetic	Liquid Powder	Electrochromic	Electrowetting	Electrofluidic	IMOD (MEMS)	Cholesteric LC	PDLC (scattering)	Reflective LC w/ Polar.
%R for White or Color	40% W	>48% W	70% W	60% W	30% W	>50% W	55% W	70% W	45% C	30%-35% C	50% W	39% W
%R for Black	4%	<6%	6%	2%	3%	-	3-5%	5%	4%	6%	5%	2%
Contrast Ratio	10:1	>8:1	>10:1	30:1	8:1	-	10-15:1	-	15:1	6:1	10:1	20:1
Lambertian	yes	yes	yes	yes	yes	yes	partial	yes	no	partial	no	partial
Mono SNAP/SWOP	-	maybe SNAP	SNAP	SNAP	-	-	maybe SNAP	SNAP	SNAP	-	maybe SNAP	-
Voltage (V)	15	-	~10	5-40	30-70	~1	15-20	10-20	5-10	<4 (lab); 25-40 (products)	5	10-30
Bistable	yes	yes	no	no	yes	hours	no	yes	yes	yes	no (yes with matrix)	Yes
Switching Speed (msec)	100's	30	~1000	100's	0.2	~msec	10	10's	0.01's	500-700/ frame	100	1 msec/line
Matrix Drive	AM	AM	AM / PM	AM	PM	PM	AM	AM / PM	PM	PM	AM	PM
Gray-Scale Approach	Pulse	Pulse	Analog or Pulse	Pulse	multi- write	-	Analog	Pulse	Spatial/ Temporal	Pulse	Analog	Halftone
Gray-Scale Bit Level	4	16	>3	>3	2	-	4	2	6	4	1	1
Neutral White Point	yes	yes	yes	yes	yes	possible	yes	yes	yes	no	yes	possible
Lifetime	good	-	unproven	unproven	good / Itd.	Itd. / unproven	unproven	unproven	good	good	good	great
Power (static image)	none	none	very low	very low	none	very low	moderate	none	very low	none	low	moderate
Power (video)	low	low	n/a	n/a	low	very high	high	high	high	moderate	moderate	low
Years In Development	12	-	3+	2+	10	40	10	3	20+	18	25+	10
Maturity	many products	R&D	AM & PM demo	AM demo	ESL product / large PM	smart card products	AM demo	segment demo	PM products	PM products	AM prototypes	Products

圖 1.1.1 電子書技術概況

1.2 液晶簡介

西元 1888 年 Dr. F. Reinitzer 在實驗中發現液晶相 (Liquid crystal phase) [2]，1890 年 O. Lehmann 將此類物質定名為 "液晶" [3]，從此之後液晶便開始受到各種的研究。液晶顧名思義就是同時有著液體的流動特性和晶體的分子排列特性，依不同的分子排列可區分為不同的液晶相，也有不同的光學特性，通稱為 "液晶相 (mesophases)"。

由於液晶獨特的光學特性，近年來被研究應用於顯示器上，液晶顯示器有輕、薄、大尺寸等優點，相關的產品如筆記型電腦、液晶電視、電腦螢幕、手機等已被大量地研究及開發，在顯示器市場占有極大的比重。

1.2.1 液晶相

液晶相介於晶體和液體之間，也被稱為第四相或是液晶相，液晶在分子的結構並非是對稱的，最常見的結構為棒狀型液晶 (Rod-like liquid crystal)。棒狀型液晶通常會與

周圍的液晶分子有著相同方向的排列，也可以藉由控制配向層配向方向控制液晶分子的排列，以凝集構造上的不同主要可區分為向列型（Nematic）、層列型（Smectic）和膽固醇型（Cholesteric）、鐵電式（Ferroelectric）液晶等。

液晶相也會受到溫度影響而改變，不同的液晶材料可能在升降溫的過程中會出現不同的液晶相，液晶相隨溫度出現的相對關係如圖 1.2.1。當溫度超過澄清點(clearing point, T_c) 時，有方向性的液晶分子將變為等方向性(isotropic)，此時液晶變為透明且無方向性排列。



1.2.2 向列型液晶

向列型液晶(nematic)大部分分子長軸會傾向排列特定方向，稱之為指向性，如圖 1.2.2。但在整體結構上並沒有層列型液晶的層狀排列，相較之下，向列型在長軸方向較容易自由運動，分子間的作用力也較小，所以黏滯係數較低，在各種液晶相中最接近液態，有高反應速度，是在液晶相中最早被應用於液晶電視、顯示器等相關領域[4,5]，也是使用最廣泛的液晶相。

向列型液晶的指向秩序參數(order parameter)可以由(eq.1-1)計算

$$S = \left\langle \frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right\rangle \quad (\text{eq. 1-1})$$

其中 θ 是每個液晶分子對配向方向的偏差角度。

當 $S=1$ 時代表排列分子排列有等方向性，通常液晶分子排列約在 $0.5 < S < 0.7$ 之間。

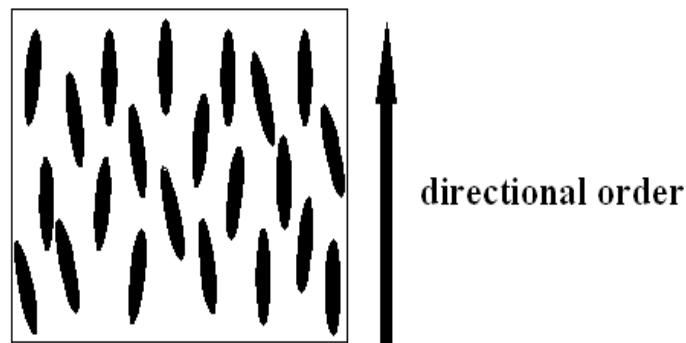


圖 1.2.2 液晶排列指向性

1.2.3 膽固醇型液晶

膽固醇型液晶（Cholesteric LC）是由多層向列型液晶堆疊而成，屬於向列型液晶的一種，可由向列型液晶加入旋光劑形成，又可稱為旋光性的向列型液晶（Chiral Nematic LC）。分子排列為螺旋平面狀，結構如圖 1.2.3，同一平面上的分子朝向同一方向排列，而不同的平面分子長軸方向漸次相差一角度，當分子軸方向旋轉 360° 時，分子層厚度稱為螺距（Pitch, P_0 ）。由於膽固醇液晶的螺旋結構，使得液晶本身會產生選擇性反射，其反射波長與螺距及液晶參數相關，同時螺距的長度也會受外界因素如溫度、電場等而有所改變。利用膽固醇液晶反射在可見光，可應用於彩色電子書。

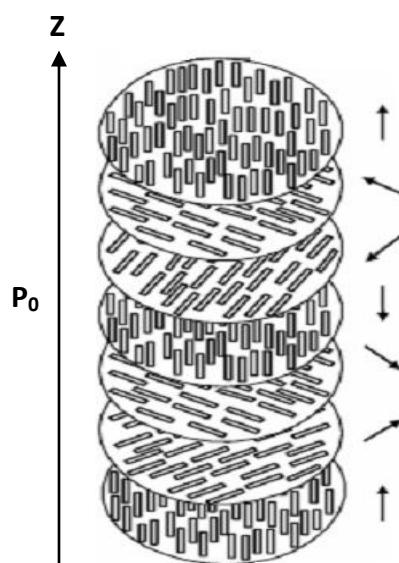


圖 1.2.3 膽固醇液晶排列結構

1.3 全彩膽固醇液晶顯示器

現今膽固醇液晶全彩顯示運用 RGB 畫素製作單層或以三層堆疊[6,7]的方式來達成，如圖 1.3.1。單層結構可直接利用現有液晶面板，製程較為簡易，成本也較低，顯色原理也如一般穿透式面板相同。主要研究在於注入液晶模式，可利用真空注入（Pixelized vacuum filling, PVF）[8]、噴塗（Ink-jet printed）[9]、UV patterned [10]等。三層堆疊的方式在製程上需要考慮電極位置以及貼合基板的問題；驅動時當下層欲顯示色彩時，必會受到上層影響，而優點是在發展技術上比較成熟，單一畫素的顯色區塊較大，色彩較為飽和。膽固醇液晶層的製作技術種類繁多，接下來將會簡介主流技術基本原理。

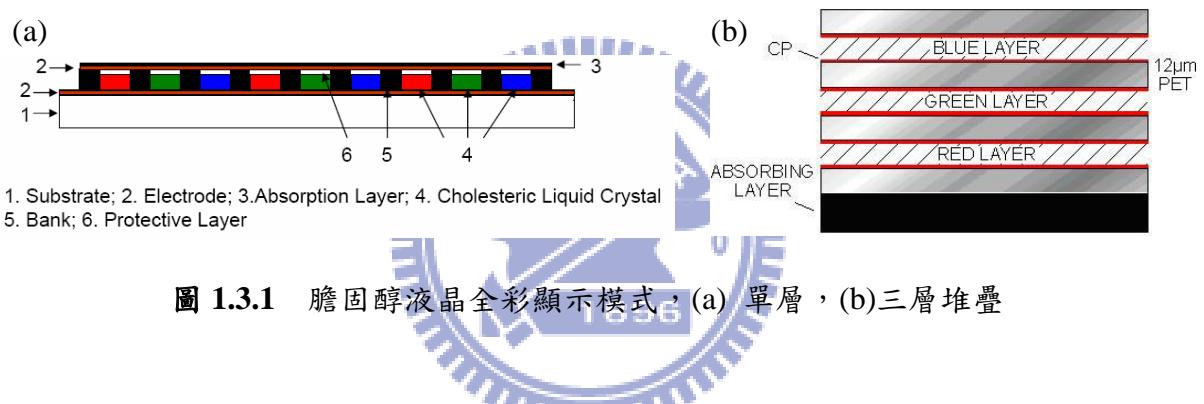


圖 1.3.1 膽固醇液晶全彩顯示模式，(a) 單層，(b)三層堆疊

1.4 Polymer Stabilized Cholesteric Texture, (PSCT)

利用加入少量（通常小於 10wt%）的聚合物混入膽固醇液晶中，選擇適當的狀態照射紫外光並藉此固化聚合物，此時聚合物會順著液晶的排列，同時固定在原處，當外加電壓驅動時，僅液晶分子會運動。以照光固化的時機區分，一般可分為標準模式 (normal mode) 與反向模式 (reverse mode) [11-13]。

1.4.1 Normal Mode

在標準模式中，施加高電壓使膽固醇液晶處於 Homeotropic state 並照光固化，除去電壓後，液晶回復螺旋結構，但受到聚合物牽引的作用，液晶並不會回到 Planar state，

而是回到混亂排列的狀態，如圖 1.4.1。操作時，施加電壓為穿透態，放去電壓為散射態，此二元控制有如開關一般，可應用反射式顯示器[14,15]、遮光器[16]、相為調變[17]等。

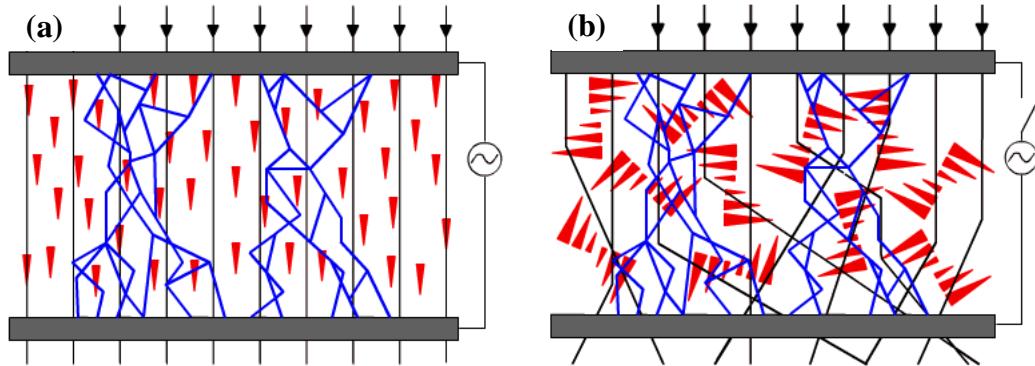


圖 1.4.1 Normal mode PSCT，(a) Homeotropic state 照光固化，(b) 固化後除去電壓



圖 1.4.2 Normal mode PSCT 之應用

1.4.2 Reverse Mode

在反向模式中，於 Planar state 照光固化。在施加電壓時，液晶被驅動至 Focal conic state，但在除去電壓之後，液晶受到聚合物牽引的作用，會再度回到 Planar state，如圖 1.4.1。操作時，施加電壓為散射態，放去電壓為穿透態，相較於標準模式，操作方式相反，同樣為二元控制系統，可應用反射式顯示器、遮光器[15,18-20]。

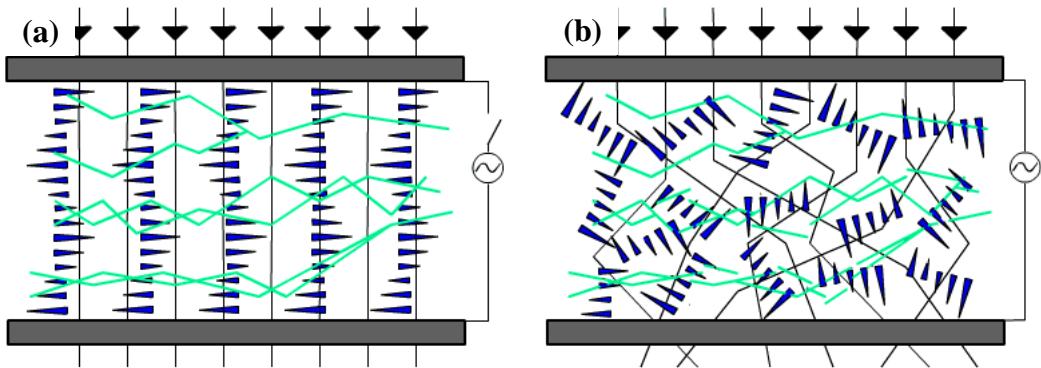


圖 1.4.3 Reverse mode PSCT , (a) Planar state 照光固化，(b) 固化後除去電壓

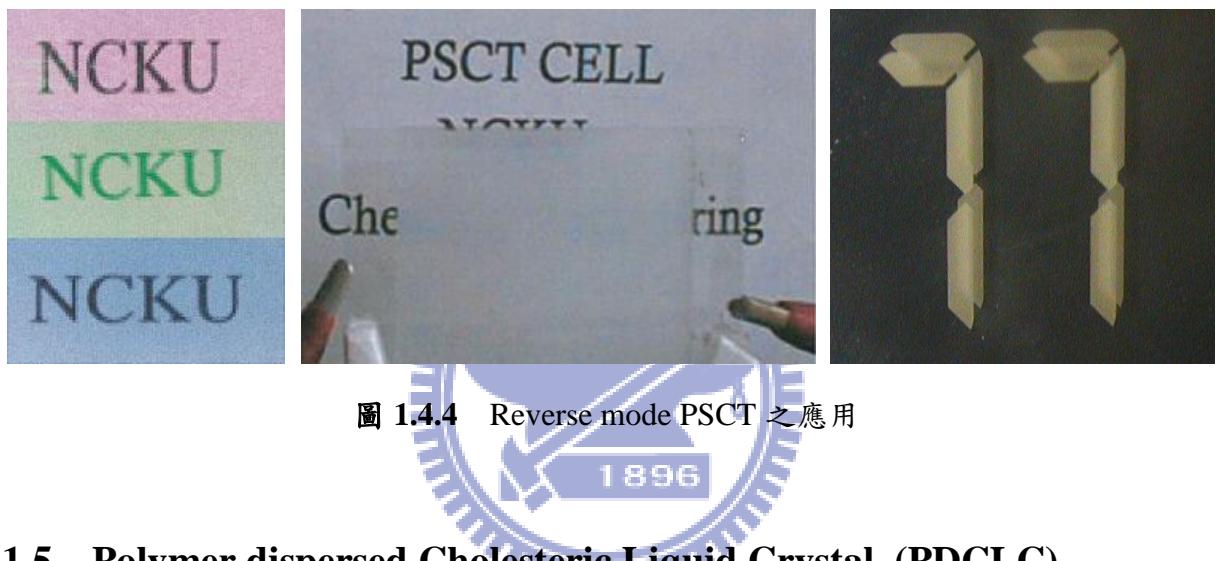


圖 1.4.4 Reverse mode PSCT 之應用

1.5 Polymer dispersed Cholesteric Liquid Crystal, (PDCLC)

利用加入大量的聚合物（大於 10 wt%，甚至可大於 50wt%）與液晶混合，聚合物會包覆液晶形成液滴狀（droplets），眾多的液滴將液晶分離成各自獨立的區塊，膽固醇液晶在區塊內仍會保有選擇性反射及雙穩態的電壓驅動特性，但由於無法控制液晶排列，造成反射光呈現散射狀。此外，液滴的大小及形狀同時也會影響反射的表現[21]，當液滴的大小較小，散射的程度會比較明顯；而當液滴形狀約越接近球狀，Planar state 便會顯得不穩定，進而影響亮度及對比。整體而言雖然反射率相較理論來說並不高，但擁有廣視角優式，並可應用於軟性基板。包覆液晶的技術（Encapsulation techniques）應用在 ChLCD 主要為兩種，包含乳化法（Emulsification）以及相分離法（Phase separation）。

1.5.1 Emulsification

將水溶性聚合物溶於水中，形成高黏滯性液體，再將液晶加入其中，液晶並不會溶於水溶液，故形成兩相分離。利用高速攪拌，將液晶混入水溶液，在不互溶的情況下，液晶會形成許多的單獨的液滴分散在溶液中。將此液晶均勻分散的溶液覆蓋在基板上，等待水揮發後，便會形成聚合物包覆液晶的膠囊，即 PDCLC 的薄膜。攪拌速率、聚合物比重均會影響液滴形成的大小，速度越快、比重越多，形成的液滴也越小[22,23]。乳化法的優點在於添加聚合物的含量較少，液晶可以涵蓋 80 wt% 以上，同時在 Planar state 的反射率也較高[24]。圖 1.5.1 為 Kent Displays, Inc. 所發表的結果，液晶層厚度約 10-12 μm ，反射率為 37%，對比度可達 45:1 [25]。

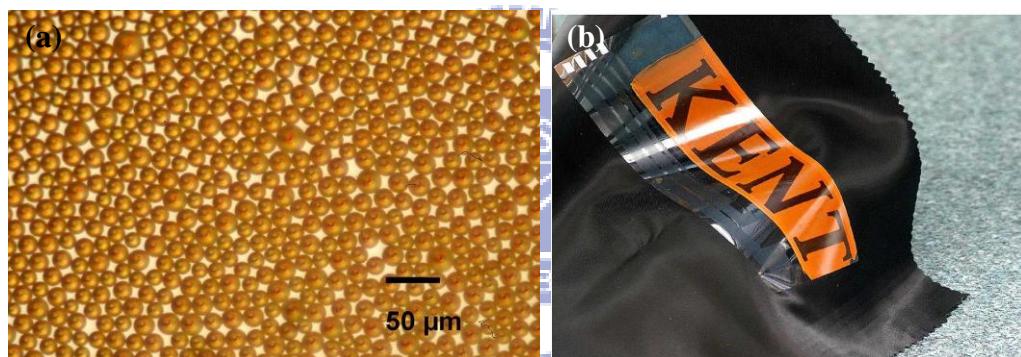


圖 1.5.1 (a) CLC droplet, (b) CLC 以乳化法製作在軟性材質基板

1.5.2 Phase Separation

相分離法一般製作手法如下，將膽固醇液晶與含聚合物的預聚合溶液混合，在特定狀態使聚合物固化析出，形成包覆液晶的液滴結構。與乳化法不同之處在於液滴形成的時機，乳化法先形成液滴之後再製作成薄膜；相分離法先製成薄膜後再形成液滴，可選用適當的方式來配合製做目的。形成向分離的手段主要有三種，控制條件分別為熱能 (thermal induced phase separation, TIPS)、聚合反應 (polymerization induced phase separation, PIPS)、溶劑 (solvent induced phase separation, SIPS)。其中前兩種為較為常用的手法。

PIPS 為最廣為使用的相分離法，利用 monomer 混合液晶及少量光起始劑，照射 UV 光後，聚合物與液晶分離並固化析出，形成 PDCLC。液滴大小與照射 UV 強度及濃度均有關係。Kent Displays, Inc. 對此有許多深入研究[25,26]，如圖 1.5.1，反射率約 30%；對比可達到 40:1； $4\mu\text{m}$ 的液晶盒間隙之下，驅動電壓小於 35V，與一般未加聚合物的純膽固醇液晶相當；應用於軟性基板及全彩顯示。

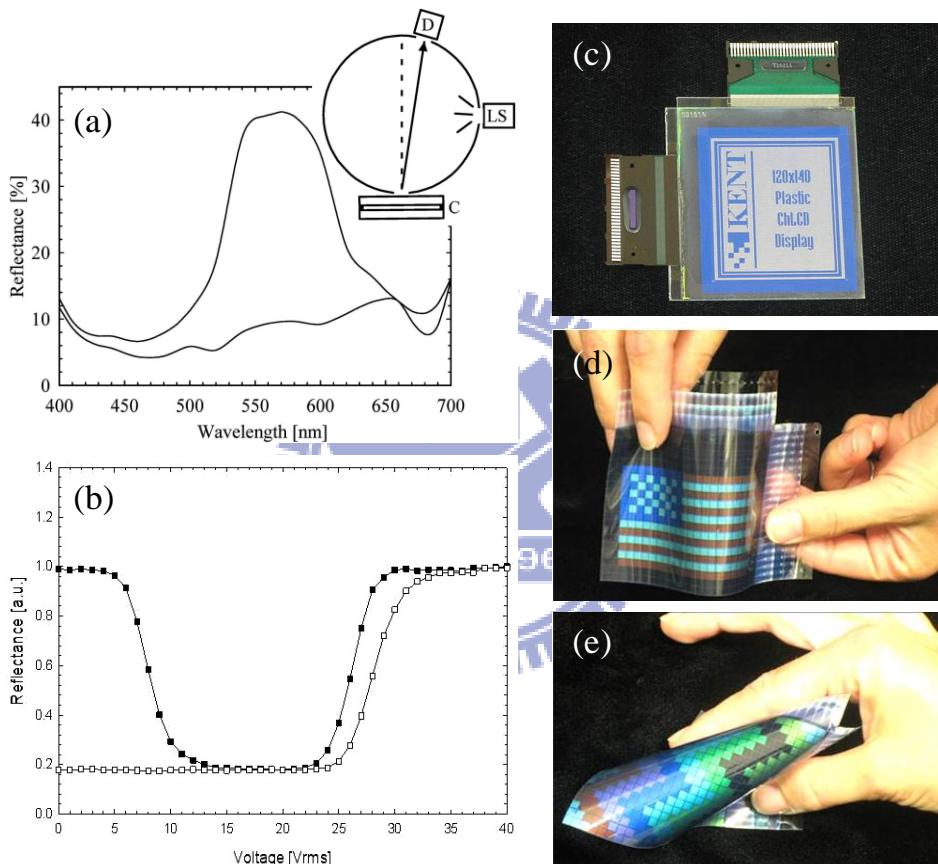


圖 1.5.2 Kent Displays PIPS CLC 之研究，(a) (b) 基本光學特性

(c) 1.85 吋展示，100dpi，16 灰階，(d) (e) 20×24 全彩顯示

TIPS 在聚合物的選擇上使用熱塑性（thermoplastic）的聚合物與液晶混合，控制溫度降低使聚合物與液晶分離析出，降溫的速率與液滴的大小有關，速率越快，形成的液滴會越小。向較於 PIPS，優點在於液滴大小較好控制，但缺點則是整體液晶盒溫度的穩定性不一，可能造成大面積製程上的缺陷。常見的聚合物例如 PMMA (polymethyl

methcrylate)、PIMB (polysisobutyl methcrylate) 等。圖 1.5.2 為 TIPS 製作實例，其中含有 20% 的聚合物 poly (vinyl butyral) 與 80% 的液晶。液晶盒間隙為 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，臨界電壓為 18V ，Homeotropic 電壓為 90V [27]。

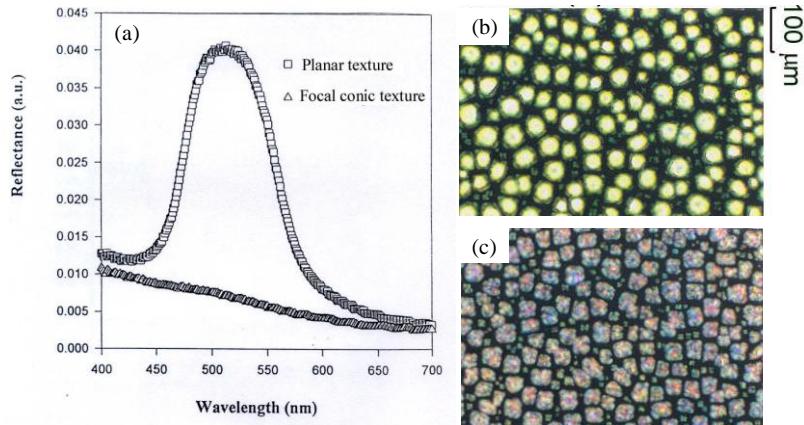


圖 1.5.3 TIPS CLC (a)反射頻譜圖,(b) Planar state POM 圖,(c) Focal conic state POM 圖

1.6 膽固醇液晶顯示器商品實例

富士通在 2007 年首度發表膽固醇液晶電子書 FLEPiA，採用 8 吋螢幕，厚度為 1.25 cm ，重 385 g ，可顯示 26 萬種顏色，解析度為 1024×768 ，為第一款市售彩色電子書，如圖 1.6.1 (a)。Magink 及 Mitsubishi Electric Corp. 在 2002 年發表第一款大面積的戶外 ChLCD 看板，面積為 2 到 13 m^2 ，對比度為 $6:1$ ，畫面更新時間為 2 秒。2006 年更推出高對比度 $15:1$ 顯示看板，畫面更新時間為 170 ms ，如圖 1.6.1 (b)(c)，未來更以動畫顯示為發展目標[28]。



圖 1.6.1 (a) Fujitsu FLEPiA ,(b)(c) Magink 6m^2 billboard 白天/晚上

1.7 研究動機與目的

電子書的應用使得閱讀更為便利，但一般智慧型手機或平板電腦等閱讀器需要使用背光源，電力耗損將導致無法長時間閱讀；而一般反射式電子書無法應用於彩色，抑或彩色顯示的反射率不足。膽固醇液晶同時具備彩色及反射式的優點，且雙穩態特性使得原件更為節能，在未來電子書的競爭上為一大優勢。

目前膽固醇液晶顯示器的研究上，發展較為完整的為聚合物散佈 (Polymer dispersed) 及微膠囊 (microencapsulated) 的系統，然而在反射率上相較於參考白色僅 30%左右。使用表面配向的系統，其反射率近乎可達到理論極限，但在驅動方式及灰階穩定性上卻有弱勢。本實驗中使用有表面配向系統，同時運用低黏滯係數的液晶，探討其反應時間的影響以及穩定灰階的驅動，此研究有助於未來在膽固醇液晶顯示器上的應用。

1.8 論文架構



本論文分為五個章節，第一章節為序論，包含液晶簡介以及液晶如何應用於電子書；第二章節為實驗相關原理，介紹膽固醇液晶的理論與轉態模式，同時也會介紹色座標系統，實驗結果將會以色偏的形式做為論述；第三章節為實驗量測設備，是針對實驗製程使用到的量測儀器部分進行介紹，第四章節為實驗製程與結果討論，主要探討液晶參數在光電特性的影響以及灰階驅動；最後一章節為本研究的結論以及未來的研究方向。

第二章 實驗相關原理

2.1 液晶光學

大部分的液晶顯示器都是使用向列型液晶，可以將液晶層視為單光軸晶體來考慮光學在液晶層中的影響。在單光軸晶體中可以分為三個不同方向的折射率 n_x 、 n_y 、 n_z 。
當 (1) $n_x=n_y=n_o$ ，稱為尋常光折射率 (ordinary index)。
(2) $n_z=n_e$ ，稱為非尋常光折射率 (extraordinary index)。

定義 $n_e > n_o$ 時，稱為光學正型液晶， $n_e < n_o$ 稱為光學負型液晶，一般使用的液晶大多屬於光學正型。

以 Fresnel 所提出之折射率橢圓球 (Index Ellipsoid 或 Optical Indicatrix) 來說明光穿過液晶時的特性。圖 2.1.1 表折射率橢圓球，其中 $n_x=n_y=n_o$ ， $n_z=n_e$ ，為光學正型液晶。Z 軸為對稱軸 (光軸)， k 之方向為光行進的方向， θ 為光傳播方向與 z 軸 (光軸) 夾角。光行徑的波前與液晶折射率橢球相交形成截面。此截面代表光行徑液晶時的等效折射

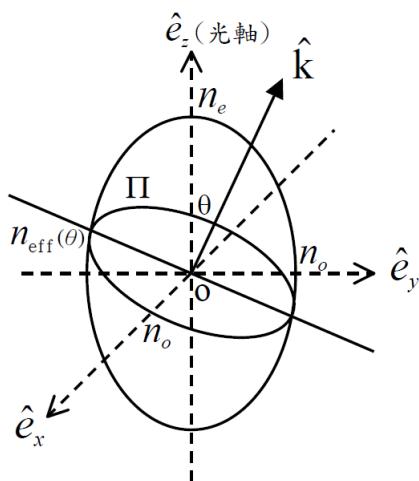


圖 2.1.1 折射率橢圓球

率，可用 (eq. 2-1) 、(eq. 2-2) 表示。

$$O-wave: n = n_0 \quad (\text{eq. 2-1})$$

$$E-wave: n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} \quad (\text{eq. 2-2})$$

當偏振光入射單光軸介質，這兩方向的光分量會遇到不同的折射率而有不同的傳播速率，當光通過介質之後，這兩個分量就會產生相位差而使得偏振方向產生變化，這就是液晶控制偏振光方向的基本原理，如圖 2.1.2，假設 x 軸方向折射率為 n_o ，y 軸方向折射率為 n_e ，令入射光偏振方向為 p ，則偏振光可分解為 p_x 、 p_y 分別代表 x 方向和 y 方向分量，當原本同相位的兩分量光通過不同的折射率之後，由於光傳播速率不同造成出射介質時兩分量產生相位差而使偏振方向改變。

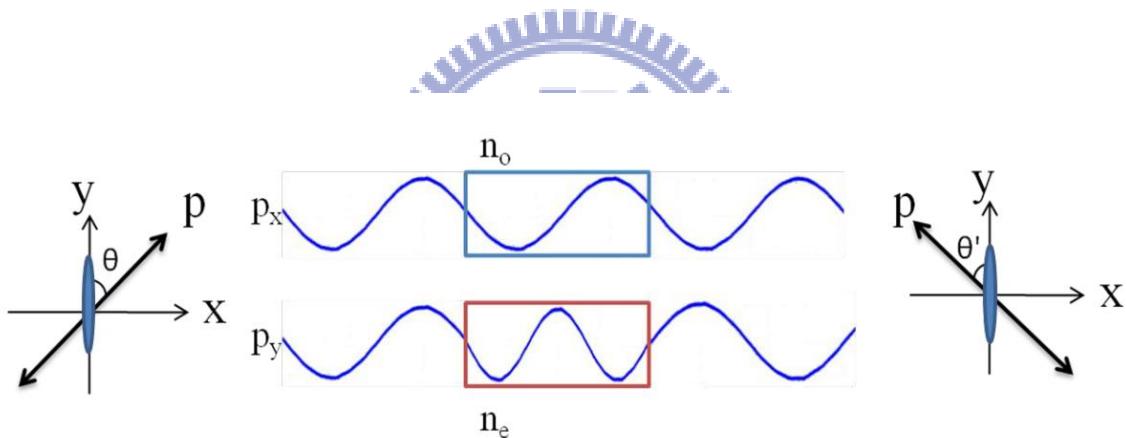


圖 2.1.2 偏振光相位延遲

2.2 膽固醇液晶之狀態結構特性

若將膽固醇液晶注入於液晶盒中，依據不同的配向作用或電壓驅動影響，造成不同的排列方式，並可細分成四種不同之結構，分別為 Planar、Focal conic、Fingerprint、Homeotropic texture，如圖 2.2.1 所示。

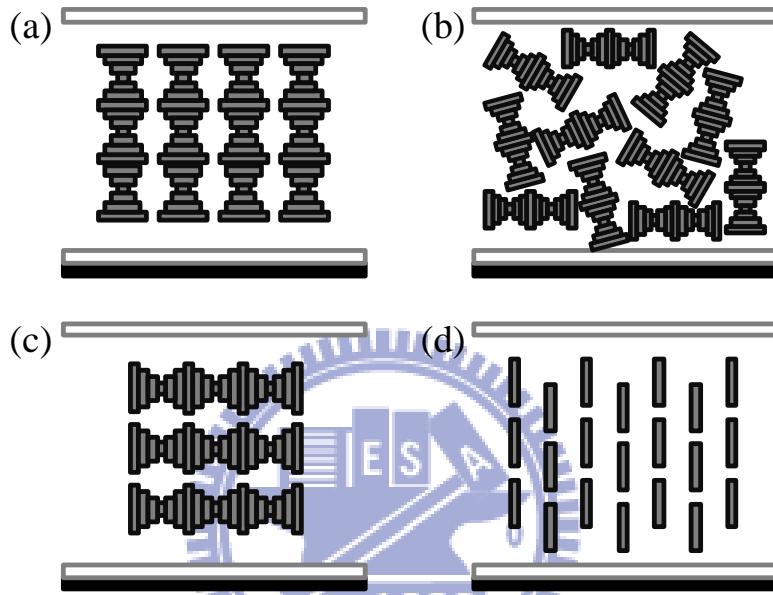


圖 2.2.1 膽固醇液晶之排列狀態，(a) Planar，(b) Focal conic，
(c) Fingerprint，(d) Homeotropic state

2.2.1 Planar texture

當無外加電場且基版表面作平行配向處理時，膽固醇液晶呈現 Planar texture（或稱 Grandjean texture），如圖 2.2.1 (a)所示。Planar texture 之螺旋軸垂直於基版，在螺旋軸方向上，層狀堆疊的液晶產生週期性的折射率變化，此時液晶盒具有布拉格反射 (Bragg reflection) 的能力[29]，反射的中心波長如 (eq. 2-3) 所示。

$$\lambda = n_{ave} \cdot P_0 \cdot \cos \alpha \quad (\text{eq. 2-3})$$

n_{ave} 為液晶的平均折式率， P_0 為螺距， α 光的為入射角，當光線近乎垂直入射時， α 趨近於 0，可忽略角度影響的項。

膽固醇液晶依據其旋性可分為左旋及右旋，當一無偏振的（unpolarized）光入射液晶 Planar state 時，左旋型的膽固醇液晶會反射左旋光，右旋光會穿透，反之亦然。因此，膽固醇液晶對於一無偏振的入射光理論上反射的極限值為 50%。液晶堆疊的層數同時也會影響到反射率，圖 2.2.2 (a)顯示當螺旋結構堆疊在約 10 個螺距以上時，布拉格反射才會接近理論極限[30]，其中 $\Delta n=0.228$ ， $n_{ave}=1.63$ 。反射光的頻帶寬度 $\Delta\lambda$ 可由 (eq. 2-4) 計算， $\Delta n=n_e-n_o$ ，當 Δn 越大，頻帶也會越寬。圖 2.2.2 (b)模擬顯示 Δn 造成的影響，其中 λ_0 為 540 nm，液晶盒間隙為 15P₀， Δn 從 0.1 到 0.4。

$$\Delta\lambda = \Delta n \cdot P_0 \quad (\text{eq. 2-4})$$

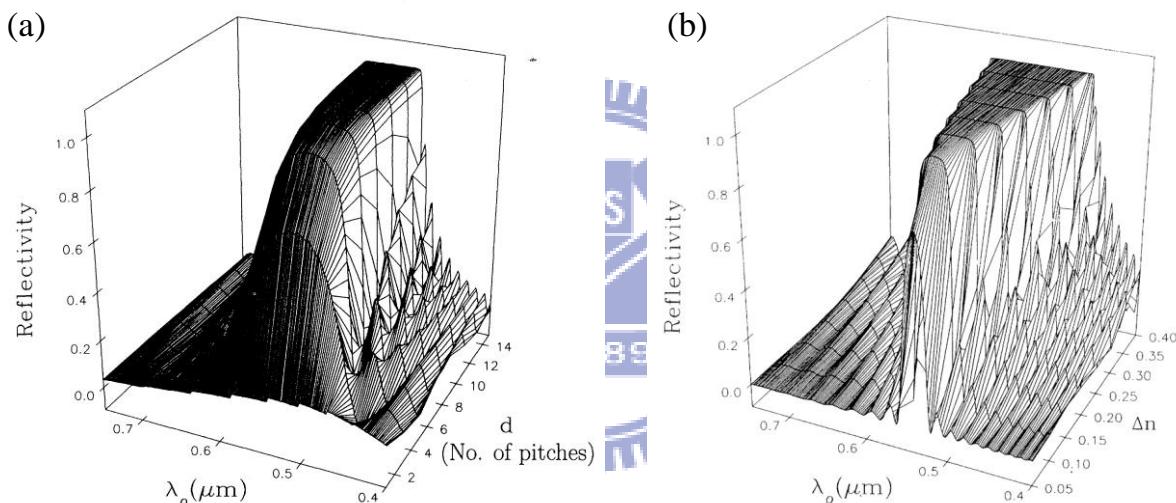


圖 2.2.2 Planar state 模擬，(a)反射率與螺距數之關係，(b)反射頻寬與 Δn 之關係

2.2.2 Focal conic texture

當外加一電場時，液晶分子受到電場所施加之力矩，力矩作用欲使液晶分子 ($\Delta\epsilon > 0$) 長軸順著電場方向排列，此時液晶同時受到分子間作用力與電場作用力的影響，最終在兩作用力之間達到平衡。當施加的電壓剛好打破了 Planar state 的排列，我們定義此為臨界電壓 (V_{th})。在打破了 Planar state 之後，液晶彼此間仍維持螺旋結構，但又受到電場的拉扯，形成螺旋結構混亂排列的現象，稱之為 Focal conic texture，如圖 2.2.1 (b)。由於液晶排列混亂，對於各個點的相位延遲不一，因此液晶盒整體看來呈現散射狀。

若施加的電壓相較於臨界電壓越大，螺旋結構將越趨向於被解旋，代表有更多的液晶分子順向電場方向，此時散射的效果將變的較不明顯。

2.2.3 Fingerprint texture

Fingerprint texture 指的是螺旋軸平行於液晶盒基板時的狀態，如圖 2.2.1 (c)所示。在施加電壓個過程中，液晶分子將可能呈現 fingerprint texture 狀態，但事實上由於基版對液晶分子之錨定作用，常會造液晶盒部分區塊呈現 Fingerprint texture，而非整體液晶盒。若要達到完美的 Fingerprint texture，需要垂直配向或其他特殊方式[31]。

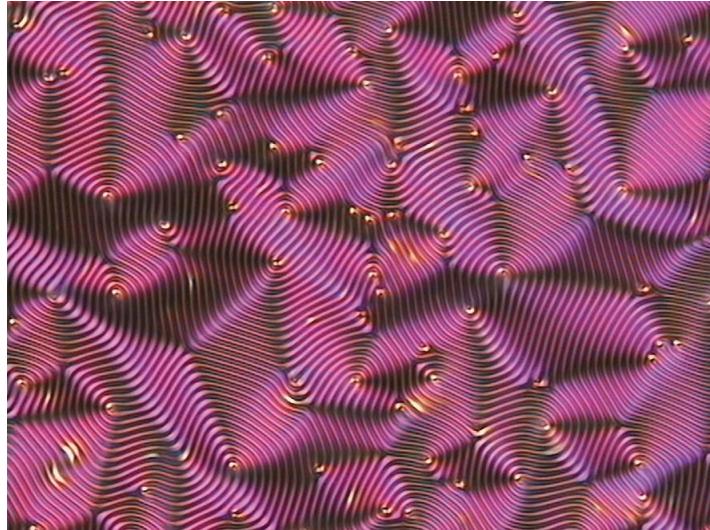


圖 2.2.3 顯微鏡下的 Fingerprint Texture [32]

2.2.4 Homeotropic texture

當施加電壓大到足以將螺旋結構結旋，使膽固醇液晶相轉為向列型液晶相，此時稱之為 Homeotropic texture，如圖 2.2.1 (d)。由於所有液晶分子均垂直基板，在光學的角度上折射率僅存在 n_0 ，如同單一折射率的介質一般，因此無相位延遲的作用，液晶盒外表呈現透明狀。此時施加的電壓，我們定義為重置電壓 (V_{reset})，理由是因為在膽固醇液晶的驅動模式上，需要利用到 Homeotropic state 來重置 Planar state，在 2.3 節中會加以說明。

2.3 膽固醇液晶之狀態變化

膽固醇液晶根據分子間存在彈性位能的影響，其自由能(free energy)可由(eq. 2-5)表示之。

$$f = \frac{1}{2}K_{11}(\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_{22}(\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n} + q_0)^2 + \frac{1}{2}K_{33}(\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2 \quad (\text{eq. 2-5})$$

\vec{n} 為液晶分子指向性； $q_0=2\pi/P_0$ ，若 q_0 為正表右旋，若 q_0 為負表左旋。

此時若外加電場於液晶，自由能公式需加上電位能 (eq. 2-6)

$$-\frac{1}{2}\Delta\epsilon_0(\vec{E} \cdot \vec{n})^2 \quad (\text{eq. 2-6})$$

當加上電場作用後，自由能量變得更低，表示液晶會受到電場作用而趨向更穩定的狀態，施加電場將使膽固醇液晶在不同的狀態做轉變。

以正型液晶 ($\Delta\epsilon > 0$) 為例，驅動電壓造成向上下方的電場，膽固醇液晶的狀態變化可由圖 2.3.1 來說明。液晶處於 Planar state 時，施加一大於 V_{th} 的電壓，液晶便會進入

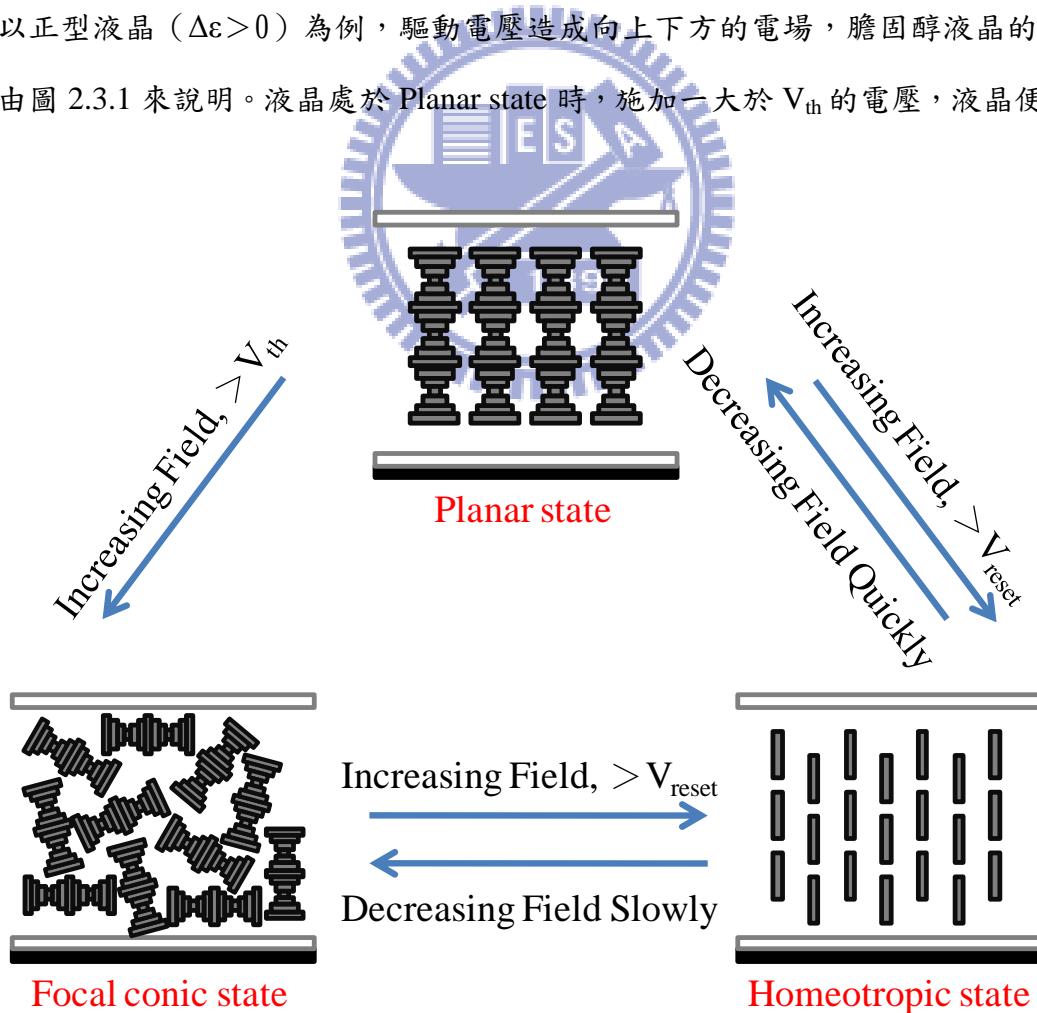


圖 2.3.1 膽固醇液晶狀態間的轉換

Focal conic state；持續增加驅動電壓，直至電壓大於 V_{reset} ，液晶便會變為 Homeotropic state；若直接從 Planar state 紿予一大於 V_{reset} 的電壓也會將液晶驅動至 Homeotropic state。從 Homeotropic state 分別以不同速度減少驅動電壓，可分別達到 Planar 與 Focal conic state，若緩緩減少電壓，則會回復至 Focal conic state；若直接將電壓除去，液晶則會回復至 Planar state。在一般情況下，Planar 與 Focal conic state 均為穩態，意即無需持續外加作用力便可維持在此狀態，此即為膽固醇液晶的雙穩態特性。由於雙穩態及選擇性反射的優點，膽固醇液晶被廣泛研究於低耗能顯示器。

驅動膽固醇液晶 Planar state 進入 Focal conic state，有兩種可能的方式，一是藉由 Oily streak，二是藉由 Helfrich deformation。Oily streak 為膽固醇液晶在 Planar state 時，由於排列的缺陷所造成，如圖 2.3.2 (a)。在兩 Planar state 區塊交界處，液晶螺旋軸傾斜，層狀結構彎曲，造成光線散射，此時若施加電壓驅動，液晶會從 Oily streak 的地方開始變化成 Focal conic state，驅動 Oily streak 的電壓如 (eq. 2-7) [33]

$$V_{oily}^2 = \frac{2(\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp})}{\varepsilon_{\perp}(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp})\varepsilon_0} h \left[2(\sqrt{2}-1)w + \frac{3K}{4P_0} \ln 2 \right] \quad (\text{eq. 2-7})$$

h 為液晶盒間隙， w 為表面能， K 為 isotropic elastic constant。

Helfrich deformation 是一種在液晶盒中平行基板的二維波動，如圖 2.3.2 (b) [34,35]。在同一層膽固醇液晶中，螺距在某些部分會擴張，某些部分會被壓縮。以能量的觀點來看，彈性位能會因為波動的振幅變大而增加，電位能則會因為波動振幅變大而漸少，而電位能同時也會因為施加壓增加而減小，當施加一電壓 $V_{Helfrich}$ ，恰好能補償彈性能所增加的量，而發生 Helfrich deformation，此 $V_{Helfrich}$ 可定義為 (eq. 2-8)

$$V_{Helfrich}^2 = \frac{4\pi^2(2K_{22}K_{33})^{1/2}}{\Delta\varepsilon\varepsilon_0} \frac{h}{P_0} \quad (\text{eq. 2-8})$$

$V_{Helfrich}$ 較 V_{Oily} 來的高，一旦施加電壓大於 $V_{Helfrich}$ ，膽固醇液晶進入 Focal conic state 的變化會以 Helfrich deformation 的形式主導，而先前 2.2 節中定義的 V_{th} 則是指的是 $V_{Helfrich}$ ，原因在於實驗驅動時並沒有 Oily streak 存在。

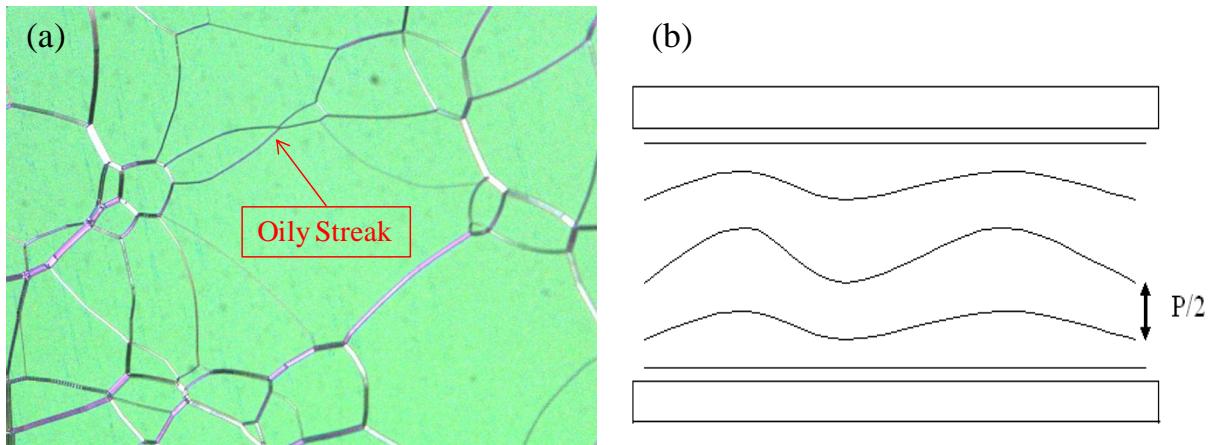


圖 2.3.2 (a) Oily streak , (b) Helfrich deformation 切面示意圖

當施加更高的電壓使膽固醇液晶的螺旋結構解旋，進入 Homeotropic state，此時液晶受到的電場如 (eq. 2-9) [36]，而我們先前已定義此時施加的電壓為 V_{reset} ，目的在於直接放掉電壓後可以重置 Planar state。

$$E_C = \frac{\pi^2}{P_0} \left(\frac{K_{22}}{\Delta \epsilon_0} \right)^{1/2}$$

(eq. 2-9)

2.4 傳統膽固醇液晶驅動

圖 2.4.1 為傳統灰階驅動的電壓脈衝與反射率變化，驅動的初始狀態分別在 Planar state 與 Focal conic state 這兩種情況做探討，量測時間點為脈衝訊號過後的幾百個 ms，此時的狀態反射率已不再變化。在初始條件 planar state 情況下，給予一個 V1 到 V2 之間的電壓脈衝驅動，部分區域被驅動到 Focal conic state，整體看起來反射率會減低，由於在無表面配向之下 Focal conic state 具有較好的穩態，因此在脈衝過後可達到穩定灰階。隨著脈衝的電壓強度增加，瞬間被驅動的區域也會變多，直到 V2 以後，瞬間的脈衝已經可以將整體結構都驅動到 Focal conic state，因此 V2 至 V3 之間的反射率最低。當電壓脈衝強度大於 V3，部分區域被驅動到 Homeotropic state，在脈衝過後這些部分會轉變為 Planar state，反射率略微上升，同時未被驅動到 Homeotropic state 的部分仍然停留在 Focal conic state，因此在 V3 與 V4 之間也可形成穩定灰階。當電壓大於 V4 以後，整體結構將會被驅動到 Homeotropic state，脈衝過後均轉變為 Planar state，反射率回到最高[37]。

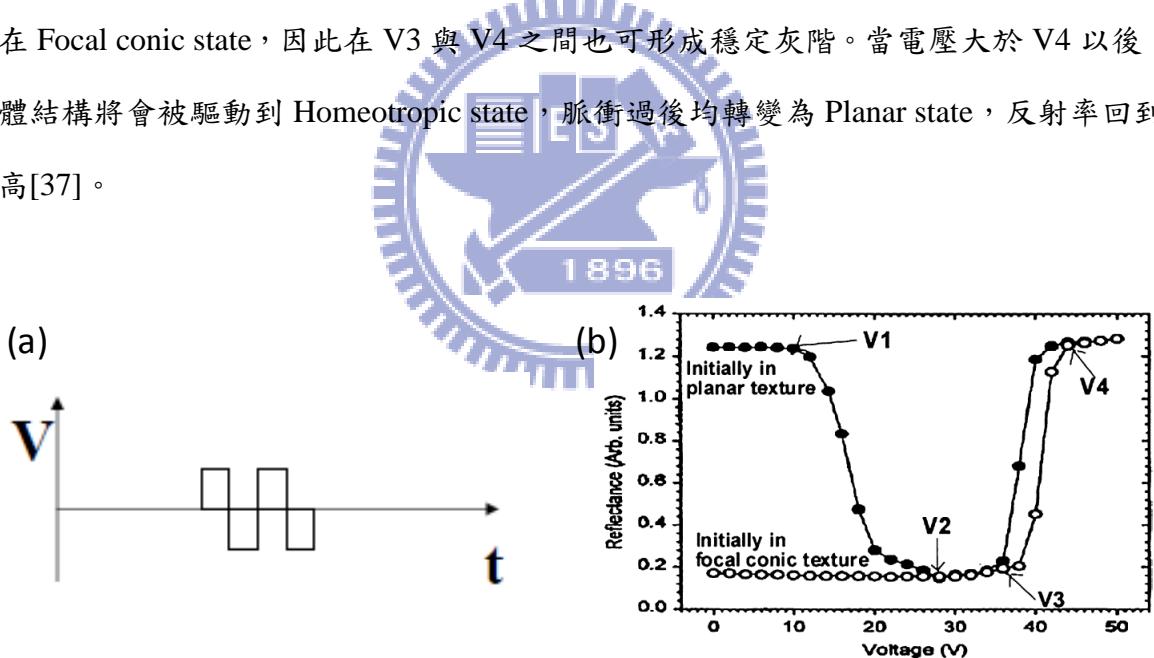


圖 2.4.1 傳統驅動模式，(a) 40ms 電壓脈衝訊號，(b) 驅動後結果

2.5 色座標系統

由於膽固醇液晶選擇性反射的特性，使人眼可以看到色彩呈現，為了精準定義人眼所看到的顏色，使用色座標系統來描述之。在 CIE 色座標系統中，計算三刺激值 (tristimulus values) 來數量化觀察到的頻譜，其計算公式如 (eq. 2-10)

$$\begin{aligned} X &= \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int_{vis} R(\lambda)P(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (\text{eq. 2-10})$$

$R(\lambda)$ 為反射頻譜； $P(\lambda)$ 為光源頻譜； $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 為色彩匹配函數 (color matching function)，如圖 2.5.1 (a)。

藉由三刺激值可計算不同的色座標系統，如 XYZ、Yxy、Lab、Luv 等，在此我們利用 CIELAB 色座標系統做為計算標準，同時也是最符合人眼感知的計算方式。 L 、 a 、 b 計算公式如 (eq. 2-11)


$$\begin{aligned} L^* &= 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500\left\{\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right\} \\ b^* &= 200\left\{\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right\} \end{aligned} \quad (\text{eq. 2-11})$$

X 、 Y 、 Z 代表 CLC 反射的三刺激值。 X_n 、 Y_n 、 Z_n 代表一完全擴散面的三刺激值，視為一標準白。 L 值代表亮度，值越大表亮度越高；(a 、 b) 為定義顏色的座標，Lab 構成的空間可以圖 2.5.1 (b) 表示。

由此座標精準的描述一個顏色時，我們可以利用座標中兩點的距離來量化顏色的差別，利用 (eq. 2-12) 計算之。

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{eq. 2-12})$$

在不同電壓的驅動之下，隨著電壓的上升，膽固醇液晶會有不同狀態的轉變。當電壓大於臨界電壓，從 Planar 變為 Focal conic state；當電壓大於重置電壓，液晶的螺旋結構將完全被打破，轉變為 Homeotropic state。在狀態轉變的過程之中，反射頻譜也會隨之轉變，計算加電壓後與加電壓前 (Planar state) 的色偏，藉此方式來描述 CLC 在電壓下顏色轉變的過程。使用色座標系統的好處在於，膽固醇液晶的狀態改變中，除了亮度的改變，同時顏色上也會有藍移 (blue shift) 的現象，色偏系統的描述同時考慮了這兩相變因，相較於一般僅量測反射率的差異，更可以完整說明狀態變化的差異，對於顯示器應用將更有幫助 [38]。

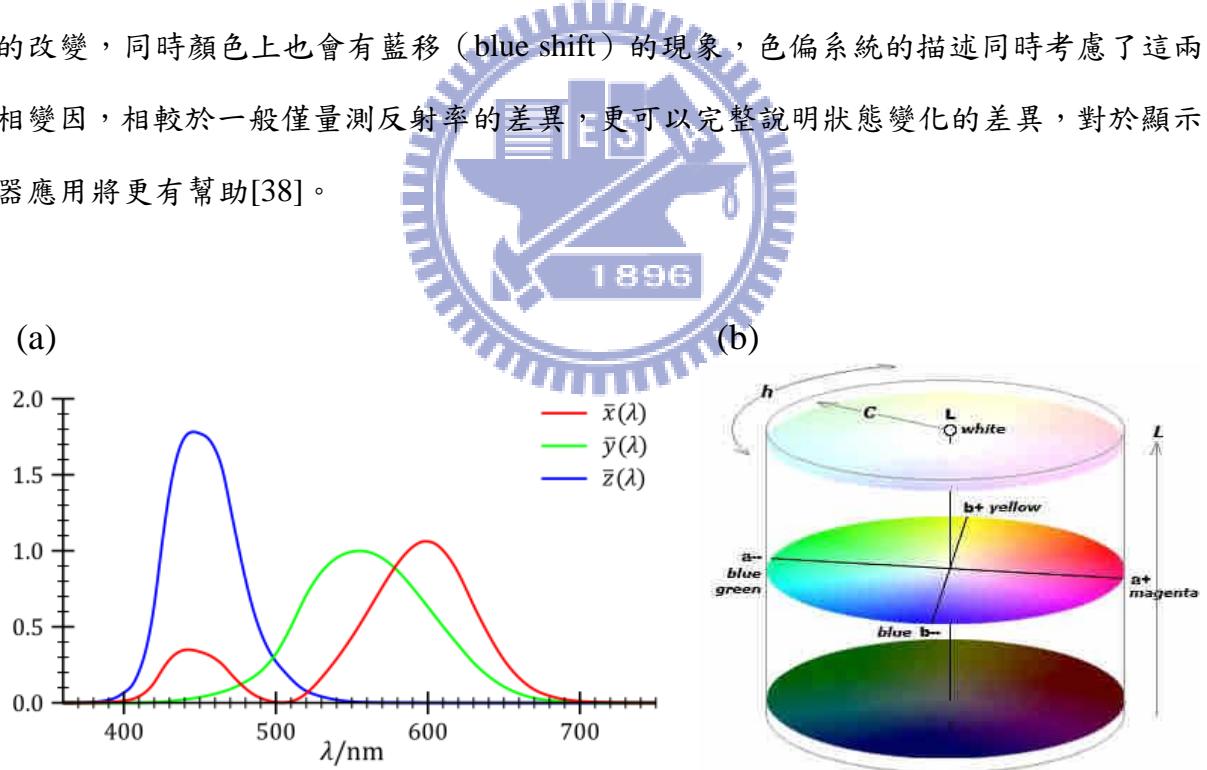


圖 2.5.1 (a) Color matching function , (b) CIELAB 色座標

第三章 量測系統與製程設備

3.1 引言

本章節將介紹研究需要使用到的各種量測系統以及製程設備。了解量測系統的原理以及架構，可以更有效地找出研究時的問題點，以及有利研究數據的分析與了解。此研究所利用到的儀器有觀測液晶排列情形的偏光顯微鏡（POM）、量測液晶參數的液晶分析系統（LCAS 3）、量測液晶盒反應速度的雷射系統，以及光譜儀等各種機密儀器。

3.2 Lambda 950光譜儀

光譜儀（Perkin Elmer Lambda 950）裝置如圖 3.2.1，可量測穿透率、反射率、和吸收值，反射率的量測又可分為固定角與可變角兩種不同的量測基座。量測的頻譜範圍可從紫外光、可見光到紅外光（波長 185 nm 到 3300 nm）。量測解析度最低可達到 0.05 nm，本實驗中採用解析度為 1 nm。但是由於量測精密而準確，所需量測的時間也比較長，在僅掃可見光波段（波長 400-800 nm）的情況下便需時 2 分鐘。

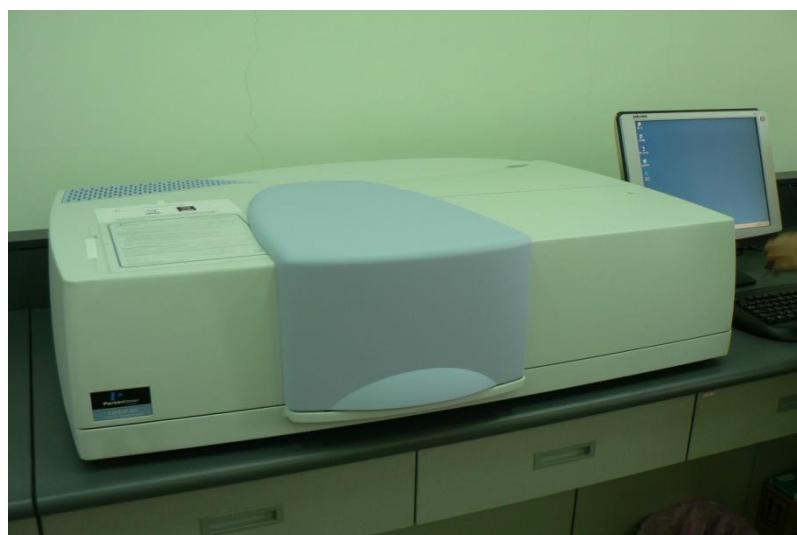


圖 3.2.1 UV/Vis spectrophotometer Lambda 950

3.2.1 穿透式量測

穿透模式在此主要是用來量測液晶盒間隙以及無表面配向的膽固醇液晶盒。無表面配向的膽固醇液晶因為缺乏排列，表面呈現散色霧狀，若以反射式量測，該選擇性反射的波段會因為反射光的散射而無法進入到光偵測器，結果將會得到近似於玻璃基板的反射頻譜。量測液晶盒間隙的原理為量測光在液晶盒中來回反射所造成的干涉值計算而來，如圖 3.2.2 所示[39]。定義 R_1 為上基板的反射係數， R_2 為下基板的反射係數，假設入射光強度為 $I = \cos \omega t$ 且兩基板表面皆無吸收，則總反射光為

$$R = R_1 \cos \omega t + \sum_{k=1}^{\infty} R_1^{k-1} R_2^k (1-R_1)^{1+k} \cos \omega(t - kt_0) \quad (\text{eq. 3-1})$$

其中 $\omega = 2\pi c n_{gap}^{1/2} / \lambda$ 、 $t_0 = 2d_{gap} n_{gap}^{1/2} / c$ ， c 為光在真空中的速率， λ 為入射光波長， d_{gap} 為兩基板間距， n_{gap} 為兩基板之間的折射率。

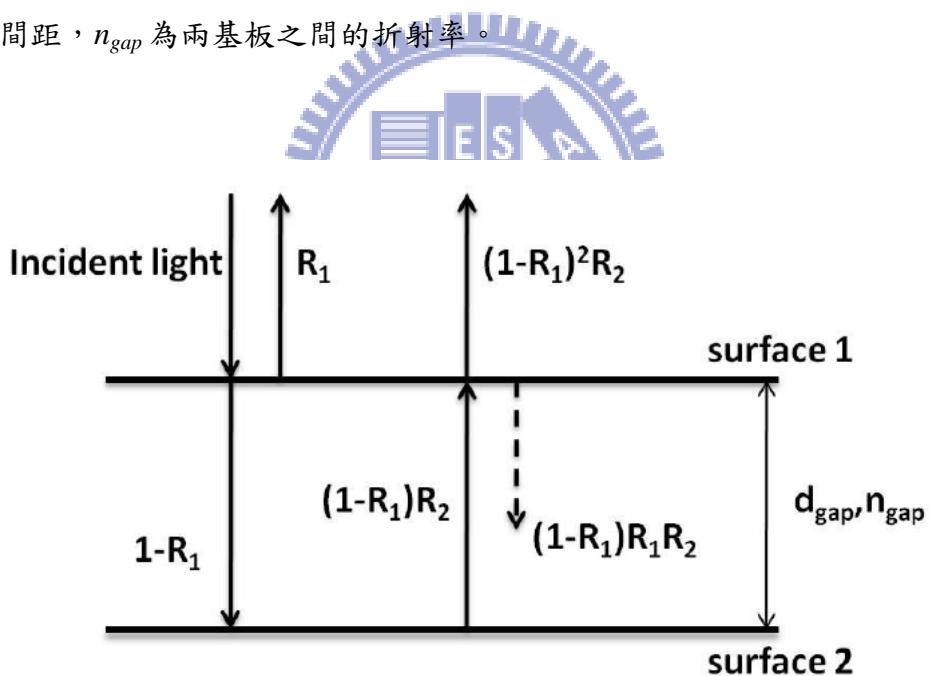


圖 3.2.2 光路示意圖

在(eq.3-1)中，因為反射係數 R_1 和 R_2 小於 1，所以 $k>1$ 的 cosine 項值遠小於 $k=1$ ，可以將其忽略改寫為

$$R = R_1 \cos \omega t + (1-R_1)^2 R_2 \cos(\omega t - \frac{4\pi n_{gap} d_{gap}}{\lambda}) \quad (\text{eq. 3-2})$$

反射光的光強度為

$$|R(\lambda)|^2 = R_1^2 + [(1-R_1)^2 R_2]^2 + 2R_1(1-R_1)^2 R_2 \times \cos(4\pi n_{gap}d_{gap}/\lambda) \quad (\text{eq. 3-3})$$

假設兩入射光波長 $\lambda=\lambda_1$ 和 $\lambda=\lambda_2$ ，可使 (eq.3-3) 中 $\cos(4\pi n_{gap}d_{gap}/\lambda)=\pm 1$ ，則

$$2n_{gap}d_{gap} = k_1\lambda_1/2 \quad (\text{eq. 3-4})$$

$$2n_{gap}d_{gap} = k_2\lambda_2/2 \quad (\text{eq. 3-5})$$

其中 k_1 和 k_2 為自然數。

假設 $\lambda_1 > \lambda_2$ ，令 $k_2 = k_1 + x$ ，其中 x 為自然數，則

$$n_{gap}d_{gap} = \frac{x\lambda_1\lambda_2}{4(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (\text{eq. 3-6})$$

x 值代表 $|R(\lambda)|^2$ 中 λ_1 和 λ_2 兩波長間的波峰與波谷個數和 +1。

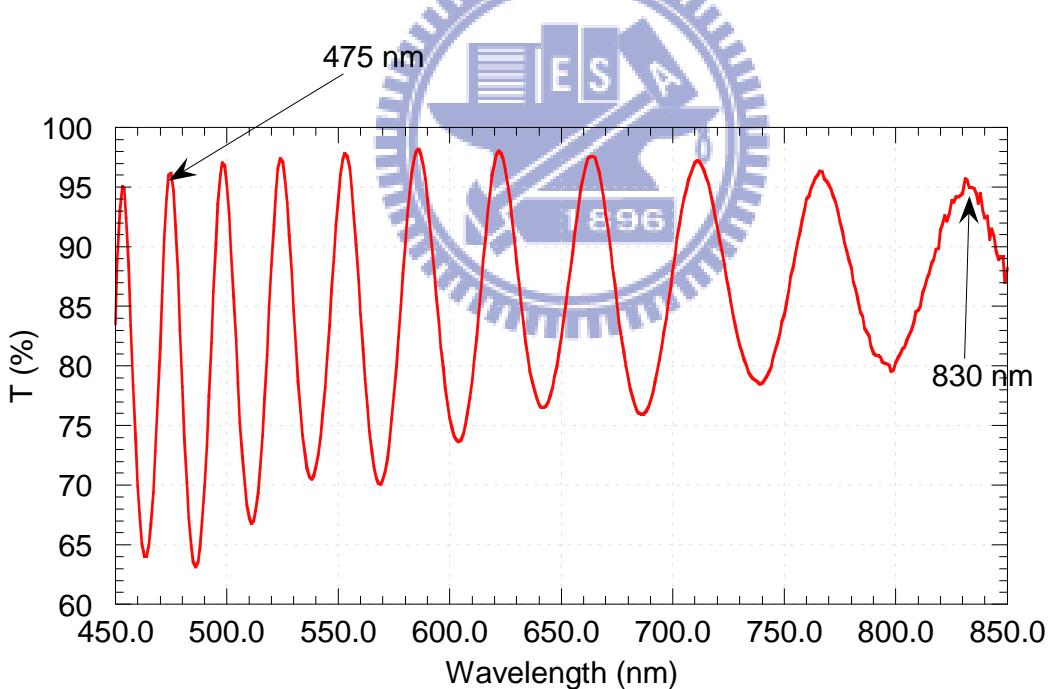


圖 3.2.3 量測空液晶盒間隙的光譜圖

圖 3.2.3 為實際量測的穿透頻譜圖，利用 (eq.3-6) 計算液晶盒間隙

$$n_{gap}d_{gap} = \frac{x\lambda_1\lambda_2}{4(\lambda_1 - \lambda_2)} = \frac{18 \times 830 \times 475}{4 \times (830 - 475)} = 5 \mu m$$

3.2.2 反射式量測

反射式量測以鋁鏡的反射率做為基準，量測元件表面的絕對反射率，並且可分為固定角與可變角兩種量測基座。固定角入射角為 6 度，近乎垂直入射，光路徑如圖 3.2.4 (a)，光源經過兩次反射後入射元件，並以對稱路徑反射進入光偵測計。可變角入射角可調整 15 度至 75 度，光路徑如圖 3.2.4 (b)，入射光同樣是先經過兩次反射後才入射元件，入射角為 b 。以上兩種由於光源皆經過兩次反射，因此不適用於太小或者低反射率的元件。此外，由於單一光束作為光源且光偵測計位置固定，所以也不適用於表面散射元件。在本實驗中，主要使用固定角量測有配向的膽固醇液晶盒，在有配向的情況之下，膽固醇液晶 planar state 可量測到將近 50% 的反射率。

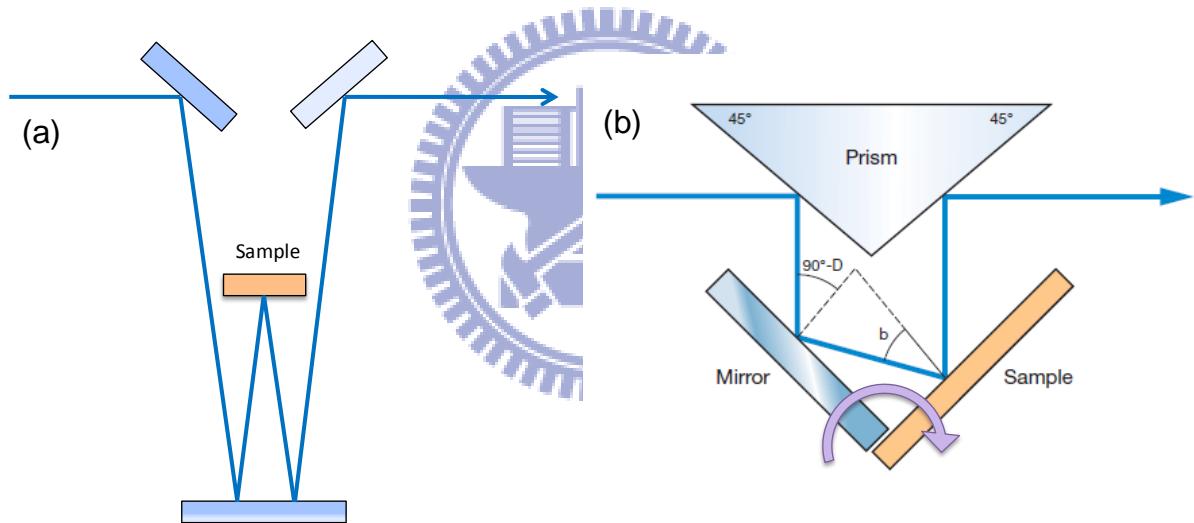


圖 3.2.4 (a)固定角量測光路圖，(b)可變角量測光路圖

3.3 Eye-one pro光譜儀

Eye one 系列產品是由國際性知名權威的色彩管理專業製造商 GretagMacbeth 所研發生產的，該公司經年以來專研於各類的高階精密之光學儀器設備，提供了最佳的色彩解決方案。Eye-one pro 可快速自訂或校正 CRT 或 LC 顯示器的色彩，確保您所查看的色彩為真實顯示的色彩；亦可以掃描反射頻譜，通常用於檢視印表機輸出顏色的標準，反射率以白色做為參考基準。實驗裝置如圖 3.3.1 (a)。

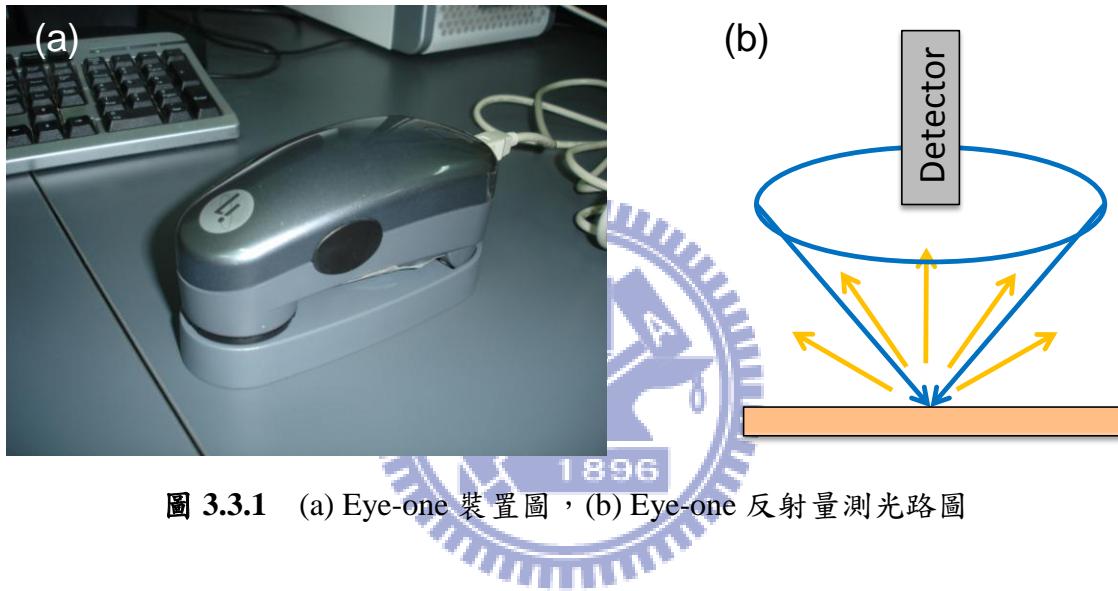


圖 3.3.1 (a) Eye-one 裝置圖，(b) Eye-one 反射量測光路圖

在本實驗中使用反射模式量測膽固醇液晶盒在無配向情況之下的反射頻譜，頻譜範圍從 380 奈米到 730 奈米，解析度為 10 奈米。Eye-one 相較於 Lambda-950，解析度比較差，量測較不準確，但量測時間較快速，一次量測所需時間僅數秒，可以觀察到短時間內的變化。此外，由於量測原理的不同，Eye-one 僅限定於在無表面配向條件之下的膽固醇液晶盒。光路原理如圖 3.3.1 (b)，以環狀光源 45 度角入射待測物表面，光偵測計在 0 度角法線方向，與入射角不對稱，由此可知 Eye-one 適用於量測表面散射的待測物。

3.4 液晶分析系統 (Liquid Crystal Analysis System 3, LCAS 3)

液晶各項物理參數的不同將會影響到光電量測上的表現，其重要性不言而喻。LCAS 3 為一套全自動量測系統，可量測鐵電型 (ferroelectric) 以及向列型 (nematic) 液晶許多重要的物理參數，包括電阻率、臨界電壓、介電異向性 (dielectric anisotropy, $\Delta\epsilon$) 、電壓保持率 (voltage holding ratio, VHR) 、表面錨定係數 (anchoring coefficient) 、彈性常數、黏滯係數等[40,41]。裝置如圖 3.4.1，本篇論文主要使用到介電異相性以及黏滯係數的量測。

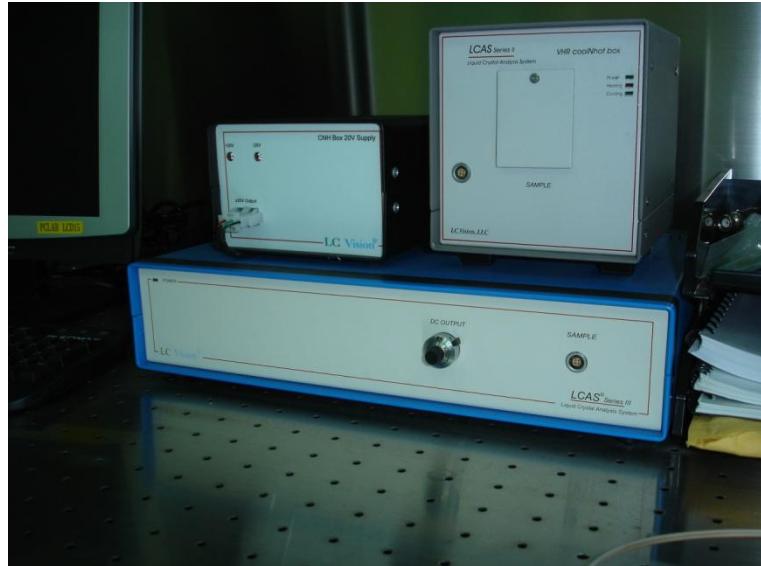


圖 3.4.1 液晶分析系統裝置圖

介電常數的量測，理論根據平行板電容公式 (eq.3-7)，量測電容值，進而推算介電常數 ϵ 。其中 A 為面積， d 為平行板間隙。

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (\text{eq. 3-7})$$

由於液晶分子同存在水平與垂直介電常數，因此在電壓驅動之下，隨著液晶分子的轉向，電容值也會有所變化。以正型液晶為例，在平面 (planar) 反平行配向的條件下，其電容隨電壓變化關係如圖 3.4.2 (a)，臨界電壓約為 0.8V。圖 3.4.2 (b)為電容隨臨界電壓—驅動電壓比值 (V_{th}/V_{rms}) 變化的曲線圖，曲線越趨近 Y 軸表示驅動電壓越大，圖

中漸進線延伸至 Y 軸交點為估計值，表示驅動電壓無窮大，此點電容值將會用於計算液晶的水平介電常數。

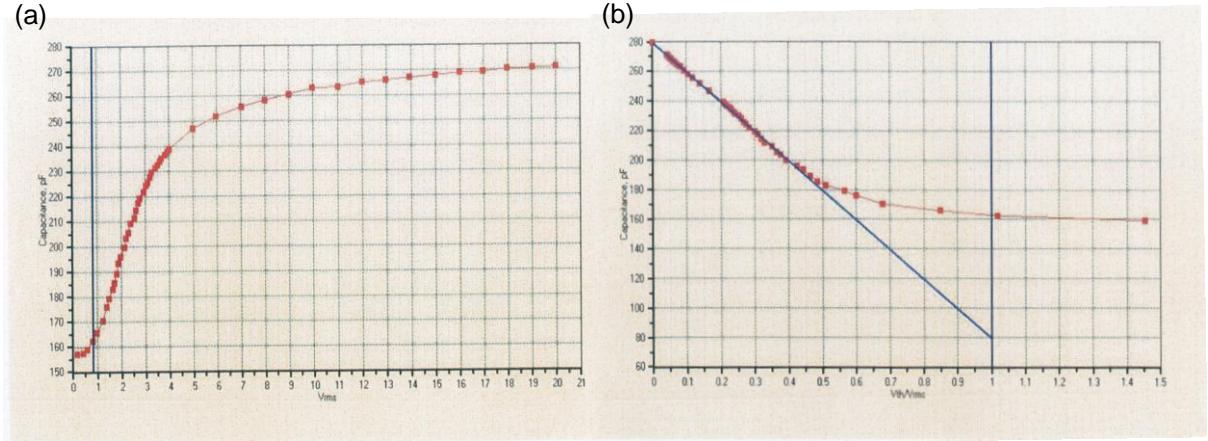


圖 3.4.2 (a) 電容—電壓關係圖，(b) 電容—(V_{th}/V_{rms}) 關係圖

液晶水平與垂直介電常數的量測可分別由 (eq. 3-8) (eq. 3-9) 得到

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{C_{\parallel}}{C_{empty}} \quad (eq. 3-8)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{C_{\perp}}{C_{empty}} \quad (eq. 3-9)$$

其中 C_{empty} 為灌入液晶之前的電容值，平行板中介質為空氣， $\varepsilon_{air} = 1$ 。

C_{\parallel} 為 $V_{th}/V_{rms} = 0$ 的電容值，此時假設驅動電壓為無窮大，液晶盒中分子長軸均指向垂直平行板的電場方向，圖 3.4.2 (b) 中可得 C_{\parallel} 約為 280 pF。

C_{\perp} 為 $V_{rms} << V_{th}$ 的電容值，此時驅動電壓尚未超過臨界電壓，液晶分子均順著配向方向平躺於液晶盒中，圖 3.4.2 (a) 中可得 C_{\perp} 約為 156 pF。

量測出水平及垂直介電常數，介電異向性便可由 (eq. 3-10) 計算出

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} \quad (eq. 3-10)$$

3.5 偏光顯微鏡

偏光顯微鏡 (polarized optical microscope, POM) 的用途為觀測液晶排列和亮暗態時的變化情形，裝置如圖 3.5.1。

儀器的構造有：

- (1) 光源：光源分為上下兩光源，上光源用於反射式樣品，下光源用於穿透式樣品。
- (2) 前後偏振片：光入射第一片偏振片使為偏振光，穿過 LC cell 之後再通過第二片偏振片，由於液晶相位延遲的差異而可得不同亮度影像。
- (3) 目鏡：儀器裝設有 10X 目鏡和攝影鏡頭，影像可用肉眼直接觀察或是經由電腦擷取畫面。
- (4) 物鏡：物鏡有 10X、20X、50X、100X 四種倍率，搭配 10X 目鏡可分別得 100X、200X、500X 和 1000X 四種放大倍率影像。
- (5) 載物台：放置樣品，可以調整高度使鏡頭對焦，先用粗調找到樣品影像，再用微調調整畫面至清晰。



圖 3.5.1 POM Olympus BX51 裝置

3.6 雷射光學系統

在研究中利用雷射光學系統來量測膽固醇液晶盒的反應速率（response time），系統架構如圖 3.6.1。系統組成裝置如下：

- (1) 波形產生器 (waveform generator)：負責供應液晶盒電壓，儀器有八組電壓輸出頭，最大輸出電壓為 100 V，最小的電壓訊號時間間格為 200 ns，可利用電腦程式設定任意波形輸出，型號為 WFG500 from FLC Electronics AB。
- (2) 雷射光源 (laser source)：為紅、綠、藍三種雷射光源，波長分別為 633 nm、532nm、432nm。
- (3) 光偵測器 (photodetector)：偵測通過液晶盒的雷射光強度變化，再將訊號強度送至數位電表。
- (4) 數位電表 (multimeter)：接收光偵測器的訊號得到直流電壓強度變化，可得知雷射光經過液晶盒的光強度變化情形。
- (5) 示波器 (oscilloscope)：接收通過液晶盒光強度變化和輸入電壓圖形，判讀液晶盒驅動的反應速率。
- (6) 電腦 (PC)：控制波形產生器的驅動和輸入電壓圖形、有連接各裝置的系統軟體，可以得到液晶盒的電壓-光訊號關係圖。

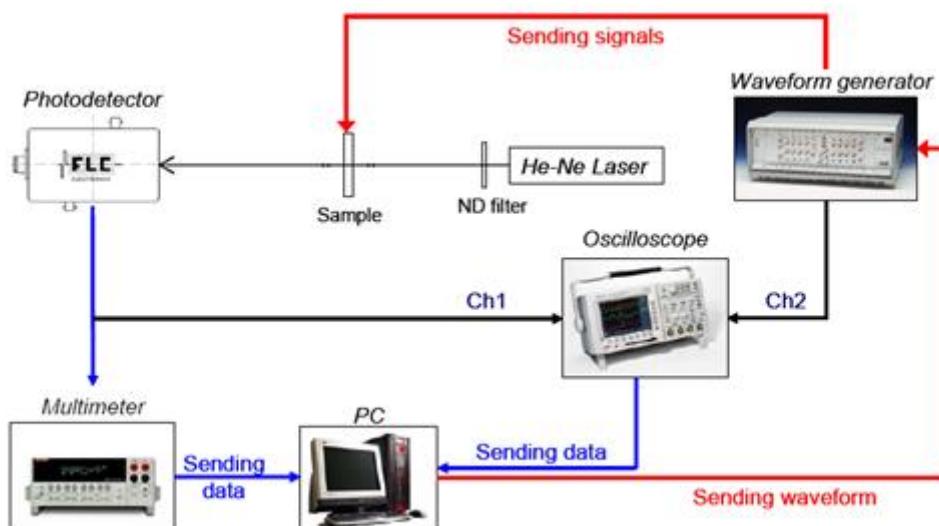


圖 3.6.1 雷射光學系統架構

3.7 實驗製程設備

(1) 定位式玻璃切割機

利用高壓氣體控制切割頭上下作用，裝設有 CCD 鏡頭可定位玻璃上之圖案位置切割。

(2) Wet Bench

無塵室 Class 100 級濕式工作台，在工作檯內清洗基板。

(3) 超音波振盪器

清洗基板後再利用超音波振盪器快速振盪將附著在基板上之雜質去除。

(4) 旋轉塗佈機

將基板置於轉軸中心以抽氣方式吸附，基板上方滴上配向層溶液材料，利用旋轉離心力甩去多餘的溶液並將溶液均勻塗佈在基板上形成薄膜，預轉控制成膜均勻性，快轉則決定膜厚。



(5) 配向研磨機

利用絨布快速旋轉在配向層上研磨，給予配向層應力作用使其對液晶有配向效果。

(6) Hot plane

可加熱烤乾基板，並有旋轉攪拌子功能使調配溶液混合均勻。

(7) UV-ozone

利用 UV 與 Ozone 反應產生大量具有強大氧化能力的自由基，將基板上的有機物雜質完全分解去除。

(8) Hot stage

可以設定加熱溫度及升降溫速度，負責控制液晶退火溫度與速率。

第四章 實驗製程與結果分析

4.1 引言

本章節將會介紹實驗的製程流程、各項製程參數以及實驗結果。實驗結果包含三個部分，第一個部分為膽固醇液晶在有／無配向條件之下的差異；第二部分為不同參數的膽固醇液晶其反射率－電壓的關係以及反應時間的量測；第三部分為膽固醇液晶在有配向條件之下灰階驅動。

4.2 實驗製程



圖 4.2.1 製程流程圖

4.2.1 清洗基板

- (1) 先將 ITO 基板先浸泡在丙酮溶液之中，放入超音波震盪器震盪 30 分鐘，再以去離子水沖洗 5 分鐘以確保無丙酮殘留。
- (2) 使用清潔劑 (detergent) 用手搓洗 3~5 分鐘至表面水膜不會破裂。
- (3) 放入超音波震盪器以去離子水震盪 30 分鐘。
- (4) 用氮氣槍將基板吹乾，放置於加熱板上加熱 110°C 一小時，使基板無水氣殘留。
- (5) 待玻璃降回室溫後可進行塗佈配向層製程。

4.2.2 旋轉塗佈配向層

- (1) 調配配向層溶液，將 PI (Polyimide) 與溶劑 (Solvent) 以 1:1 濃度均勻混合。PI 型號為 PIA-X201-G01，溶劑型號為 NBC-311，由 Chisso 所提供。
- (2) 將清洗乾淨的基板放入 UV-ozone 30 分鐘，去除表面殘留有機物，並使表面呈現親水性，更易於塗佈配向材料。
- (3) 用旋轉塗佈機將配向層溶液均勻塗佈於基板上，先上一層溶劑，接著在上調配好的 PI 溶液，其轉速如表 4.2.1。在此轉速之下，PI 膜的厚度約為 35 奈米。
- (4) 將塗佈 PI 之基板放置於加熱板上加熱 220°C 一小時

表 4.2.1 PI 配向層旋轉塗佈參數

Solvent (first)			50wt% Polyimide (second)		
	Time (sec.)	Speed (rpm)		Time (sec.)	Speed (rpm)
waiting	10	0	waiting	30	0
1st spin	10	800	1st spin	20	800
2nd spin	20	5000	2nd spin	40	5000

4.2.3 研磨配向

為了減少配向強度不一造成液晶分子驅動時的影響，以摩擦配向機（Rubbing machine）摩擦配向層，以達到穩定配向效果。摩擦配向機含有可旋轉絨布以及移動載台，可分別調整絨布轉速以及載台移動速率來控制配向強度，載台上有抽氣系統可固定基板，亦有旋轉刻度可精確調整配向角度。配向參數如表 4.2.2

表 4.2.2 基板配向參數

Pile impression (mm)	0.2
Rotation speed (rpm)	500
Advancing speed (mm/s)	7.3

4.2.4 後段製程

(1) 貼合液晶盒

使用 $4\mu\text{m}$ 及 $8\mu\text{m}$ 間隙物均勻混合 UV 膠 (NOA-65, from Norland)，滴於基板左右兩端，再將兩片基板貼合按壓使液晶盒間隙厚度均勻，最後照光固化 UV 膠形成固定間隙。

(2) 利用 lambda-950 光譜儀量測間隙厚度。

(3) 焊接電線

在兩側基板 ITO 端焊上電線，以利之後量測。電線在灌入液晶之前就先行焊上為的是避免高溫焊槍間接影響到液晶分子。

(4) 灌入液晶

再將液晶滴於基板交界處使其利用毛細現象自然吸入填滿液晶盒間隙。

(5) 退火 (Annealing)

已注入液晶之液晶盒再 hot stage 控制降溫速率退火，從 isotropic 狀態開始緩慢降溫，一方面去除灌入液晶盒所留下的痕跡，同時也使液晶排列整齊。

4.3 表面配向對膽固醇液晶的影響

膽固醇液晶盒中，配向條件使表面的液晶分子得以規則排列，同時也影響了螺旋結構的堆疊狀態，而膽固醇液晶的顏色是由於布拉格反射造成的效果，因此層狀螺旋結構堆疊的越完整，反射的效果也越好，直接影響在反射率之上。其次，驅動狀態以及 Focal conic state 穩定性等也都會有所影響。

4.3.1 反射型態影響

以簡單的示意圖來說明膽固醇液晶 Planar state 的排列，如圖 4.3.1，圖中矩形代表一層具完整螺旋結構的液晶排列。在有配向的情況下，分子間有序的排列，層狀結構堆疊整齊，外觀呈現鏡面的反射，反射率較高；而在沒有配向的情況下，邊界的分子沒有特定方向，層狀結構較為散亂，整體呈現擴散的反射。

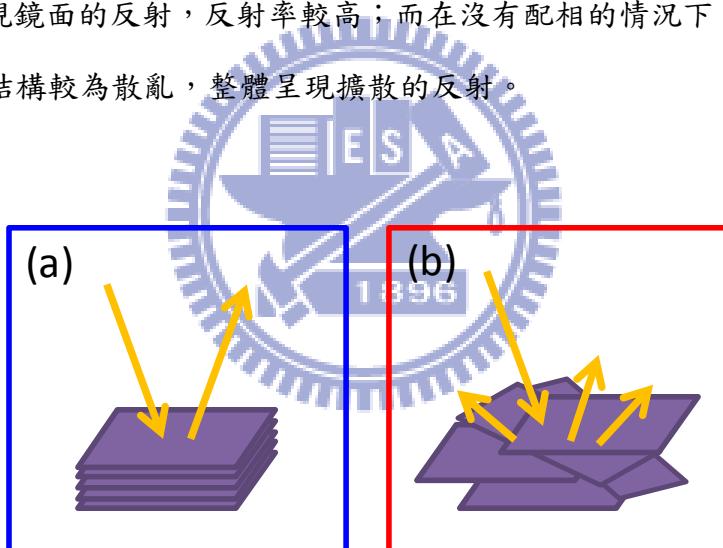


圖 4.3.1 膽固醇液晶排列情況示意圖，(a)有配向，(b)無配向

圖 4.3.2 為膽固醇液晶從 Homeotropic state 放去電壓後 15 秒的 POM 圖，液晶盒在兩垂直偏振片之間並以穿透模式拍攝。從 Homeotropic state 放去電壓後，膽固醇液晶會漸漸轉變到 Planar state，圖中綠色區塊表示已經轉變為 Planar state，其餘缺陷會隨著時間增加也變為 Planar state。由圖中可看出有配向的條件下，綠色的分佈較為規則，邊界分明，且整體區域也較大，這顯示配向除了排列分子的作用之外，同時在轉變的過程中也會指引液晶較快速的回到穩定的狀態。

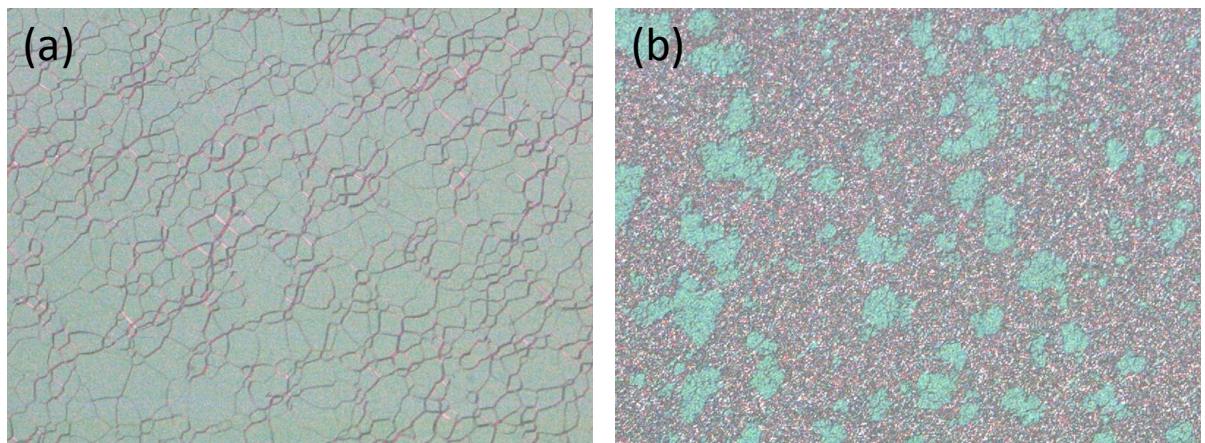


圖 4.3.2 膽固醇液晶 Planar state 排列的 POM 圖，(a)有配向，(b)無配向

將有／無表片配向的膽固醇液晶盒分別量測其反射頻譜，結果如圖 4.3.3。以 lambda-950 量測的結果，在有配向條件之下具有近 50% 的高反射率；而無配向條件之下，該選擇性反射的波段由於散射的影響，導致出現反射率反而降低的情形。以 eye-one 量測的結果則可看出在無配向條件之下，反射具備散射的特性，故可以量測到較高的反射率，但僅有 30%。由於配向的影響造成反射率及反射類型的差異，因此在量測上須選用適合的光譜儀，有配向使用 lambda-950，無配向使用 eye-one。

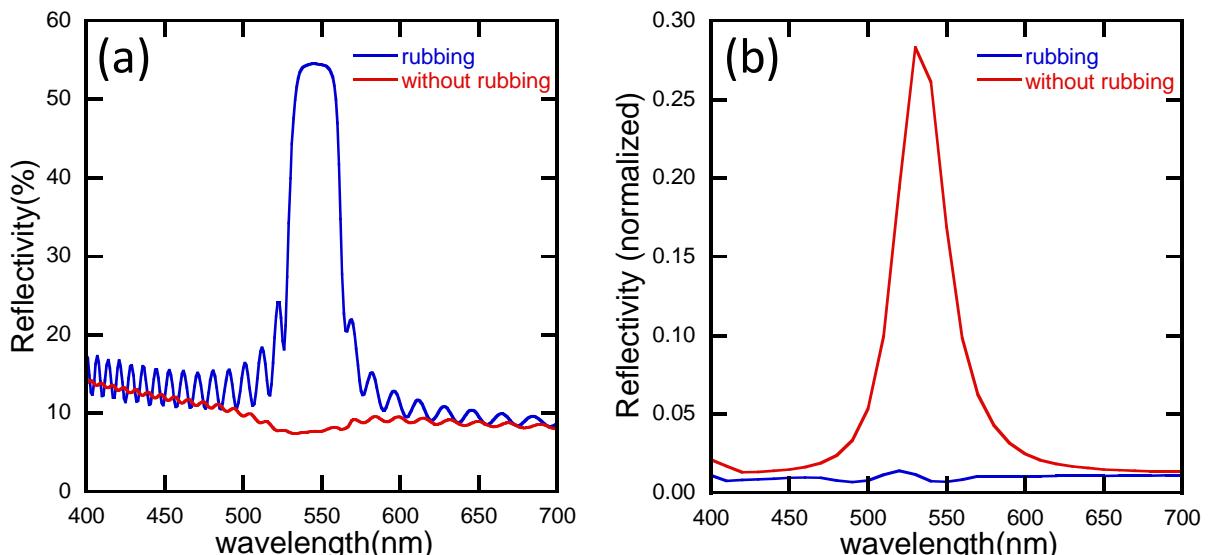


圖 4.3.3 在有／無配向條件下膽固醇液晶 Planar state 反射頻譜量測

(a) lambda-950 , (b) eye-one 量測

4.3.2 電壓驅動表現上影響

在有／無配向之下，Planar state 有著極大的差異，也因此當驅動至 Focal conic state 時，液晶的轉態變化也有所不同。圖 4.3.4 為有配向下液晶的轉態變化圖，其中液晶 V_{th} 為 12V，驅動電壓以 20V 做過飽和驅動（over driving）。當驅動 3 秒後，液晶盒表面顯示出些許點狀缺陷，此缺陷即代表 Focal conic state。隨著驅動時間增加，點狀缺陷會不斷擴張；而當驅動至 15 秒後，Planar state 的分佈已變得稀少，最終整個液晶盒將變成 Focal conic state。施加電壓僅要大於 V_{th} 便可以驅動至 Focal conic state，在此以 20V 驅動為的是要讓轉態更快速發生。

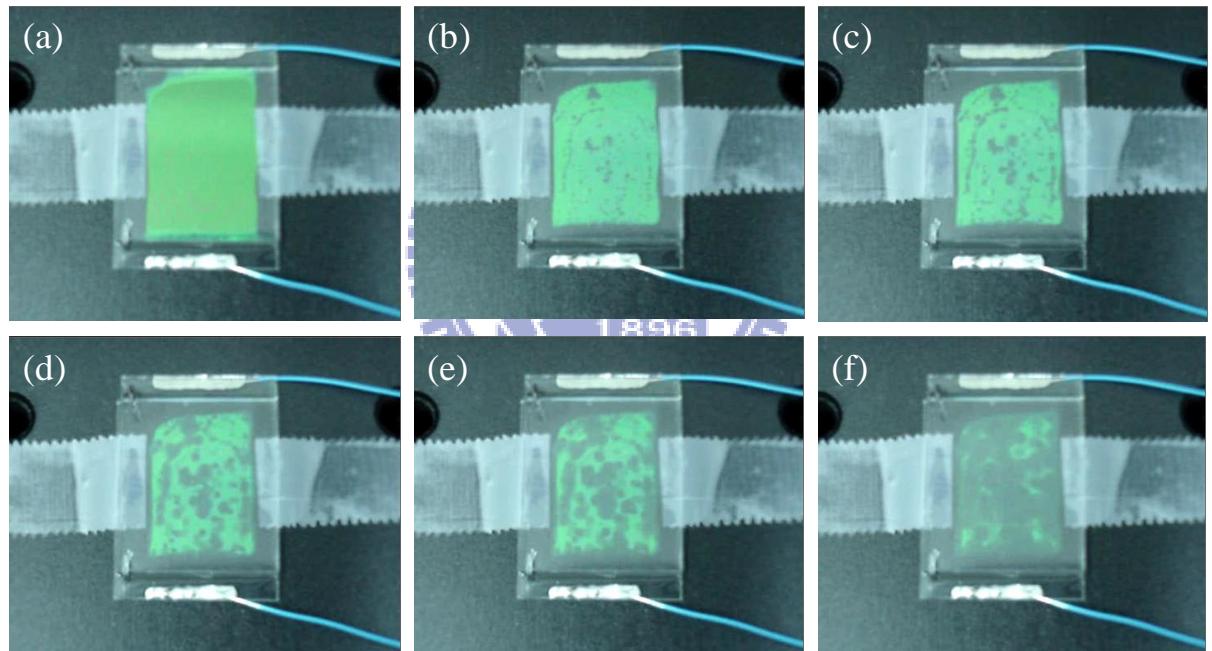


圖 4.3.4 有配向之膽固醇液晶 20V 驅動至 Focal conic state 狀態變化

(a) Planar，驅動後 (b) 3 秒 (c) 5 秒 (d) 8 秒 (e) 10 秒 (f) 15 秒

圖 4.3.5 為無配向下液晶的轉態變化圖，其中液晶 V_{th} 為 12V，驅動電壓為 12V。當驅動 10 秒後，外觀看不出有變化；而驅動 20 秒後，在液晶盒中間區塊反射變得較為暗淡，表示此處液晶轉變為 Focal conic state。在無表面配向的條件之下，Planar 及 Focal conic state 均為散射狀，故轉態的變化情況相較於有配向的結果較不明顯。

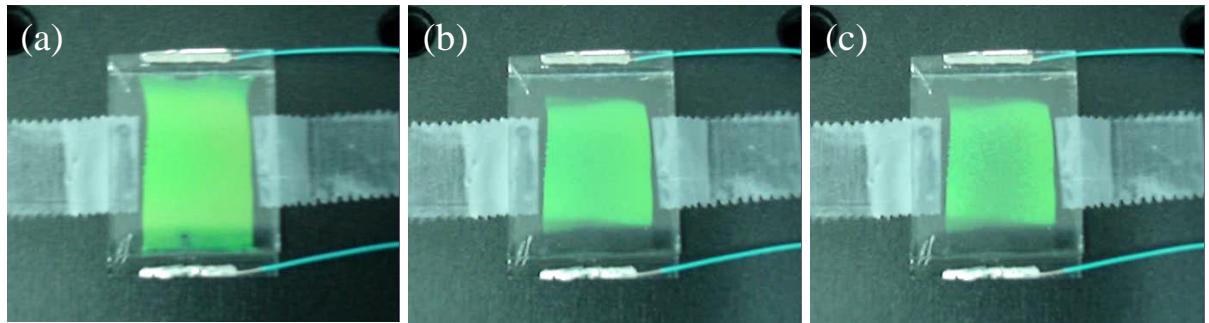


圖 4.3.5 無配向之膽固醇液晶 12V 驅動至 Focal conic state 狀態變化

(a) Planar, 驅動後 (b) 10s (c) 20s

為了更清楚了解無表面配向膽固醇液晶在電壓驅動至 Focal conic state 的狀態，以 POM 穿透模式觀察其變化，驅動電壓同為 12V，結果如圖 4.3.6。在驅動的過程中，液晶從某些缺陷開始轉態，隨著驅動時間增加而不斷擴張，最終涵蓋整個液晶盒。不同於有表面配向條件之處，在於缺陷點並無明確位置，而傾向於均勻散佈在液晶盒之間，故在無表面配向的轉態過程中，外觀變化較為連續。此外，由於缺陷點散佈較均勻，轉態的速度也較快。

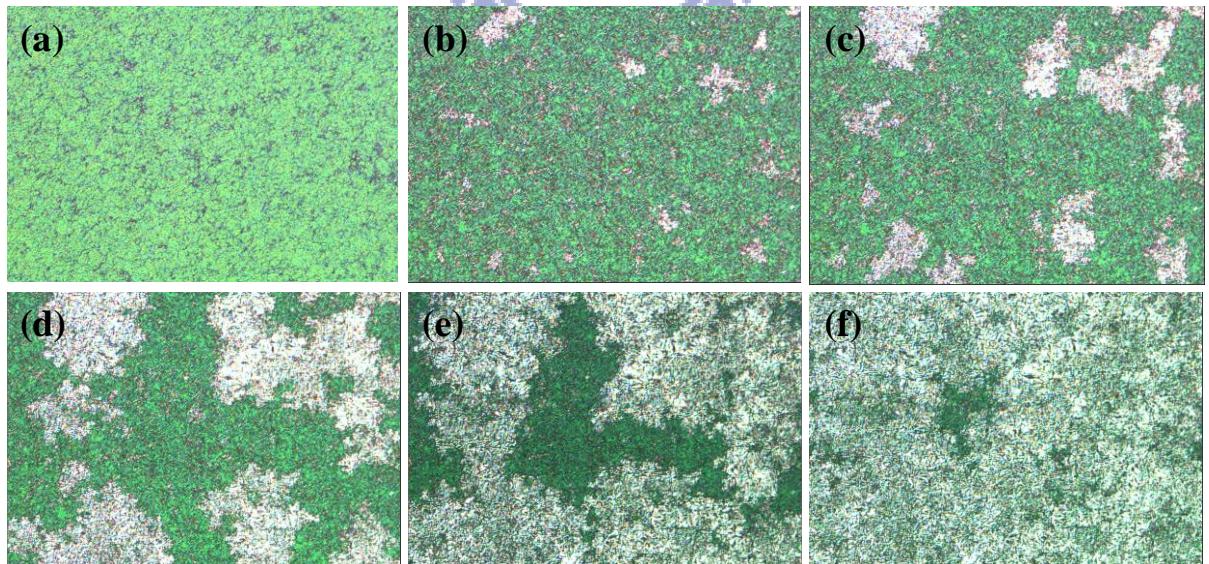


圖 4.3.6 無配向之膽固醇液晶驅動至 Focal conic state 狀態變化

(a) Planar, 驅動後 (b) 5 秒 (c) 10 秒 (d) 25 秒 (e) 20 秒 (f) 30 秒

藉由量測膽固醇液晶的反射頻譜，可以計算出一組色座標（ L, a, b ）。以色座標量化不同電壓驅動下的反射頻譜，並以 Planar state 為基準，實驗結果可以得到色偏-電壓的特性曲線，此色偏值涵蓋顏色（ a, b ）與亮度（ L ）上的差異[42]。圖 4.3.7 為有／無配向的色偏曲線，其中有配向使用 lambda-950，無配向使用 eye-one 量測。

兩色偏曲線變化均可分為 4 個區間，我們定義 1、2 區間交界所對應的電壓為臨界電壓（ V_{th} ）；3、4 區間交界所對應的電壓值為飽和電壓（ V_{sat} ）。此外，當電壓為 V_{reset} ，可驅動液晶至 Homeotropic state。以有配向為例，第 1 區間為 Planar state；第 2 區間中，Planar state 受電壓驅動而被打破，開始進入到 Focal conic state，變化過程如圖 4.3.4，由少部分缺陷點擴散而成；第 3 區間為 Focal conic state，此時液晶盒看起來已成霧狀，液晶排列的螺旋軸已被扭曲，但是仍保有膽固醇液晶的螺旋結構，故外觀看起來仍有顏色，隨著電壓上升，顏色會漸形漸淡；第 4 區間仍為 Focal conic state，此時已經看不出有顏色，整個變成白色散射的霧狀，隨著電壓上升會逐漸趨於 Homeotropic state。當電壓高於 V_{reset} ，液晶成為 Homeotropic state，外觀看起來呈現透明狀。

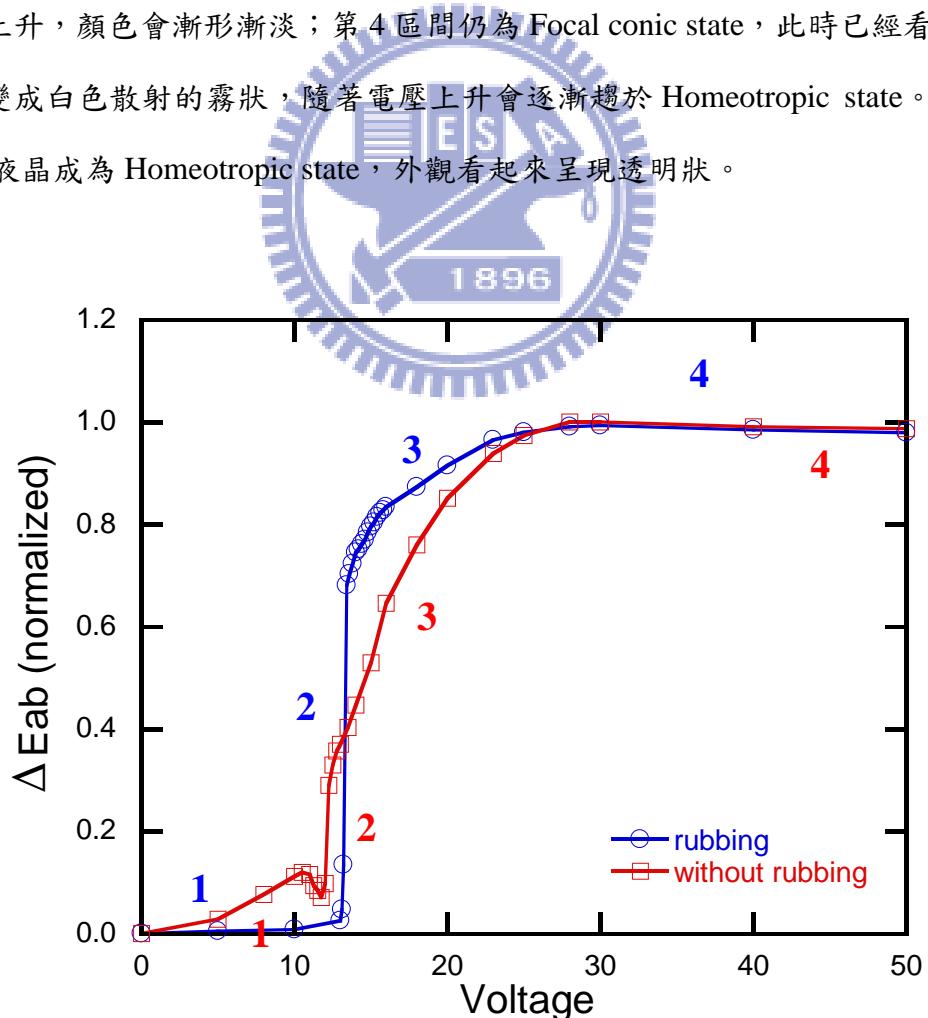


圖 4.3.7 在有／無配向條件下的色偏曲線

在有／無配向的情況下， V_{th} 、 V_{sat} 與 V_{reset} 均無明顯差異，顯示表面配向並不會影響電壓響應，但在色偏曲線中，第 2 區間卻有明顯落差。第 2 區間為 Planar 轉變到 Focal conic state 的過程，在有配向條件下，兩狀態的反射率差異很大，造成在計算色座標時，L 值有很大的改變，因此造成極大色偏差；在無配向條件下，兩狀態均為散射態，故色偏差較小。有配向的情況下，由於亮暗態之間的驅動在第 2 區間有極大不連續性，此問題將會導致灰階顯示上的難度。

4.3.3 穩定性影響

膽固醇液晶本身具有雙穩態的特性，分別在 Planar 與 Focal conic state 不需外加偏壓便可維持狀態，因此許多研究藉此設計低耗能的應用。我們分別對有／無配向條件下的膽固醇液晶做雙穩態的測試，在 Planar state 均可以穩定存在，但在 Focal conic state 却不如預期，其結果如圖 4.3.8。兩種配向條件下，液晶盒均以 30V 電壓驅動到 Focal conic state 後放掉電壓，量測色偏隨時間的變化。圖中時間為 0 代表尚未放掉電壓前的狀態，一放掉電壓的瞬間，由於液晶本身彈性能影響會有些許的回復作用，因此曲線在一開始色偏值均會降低。有配向使用 lambda-950，無配向使用 eye-one，由於量測儀器的不同使得色偏值在起始點有所差異。在無配向情況下的結果有如一般認知，放掉電壓以後呈現穩態，10 分鐘之內均無變化；但在有配向情況之下，色偏值隨著時間而降低。由此可知，表面配向的影響使得液晶分子受到配向力的作用，漸漸回復到 Planar state，但也由於作用力僅限於表面，液晶靠著自我排列（Self assembly）作用回復，因此回復的情況相當緩慢。

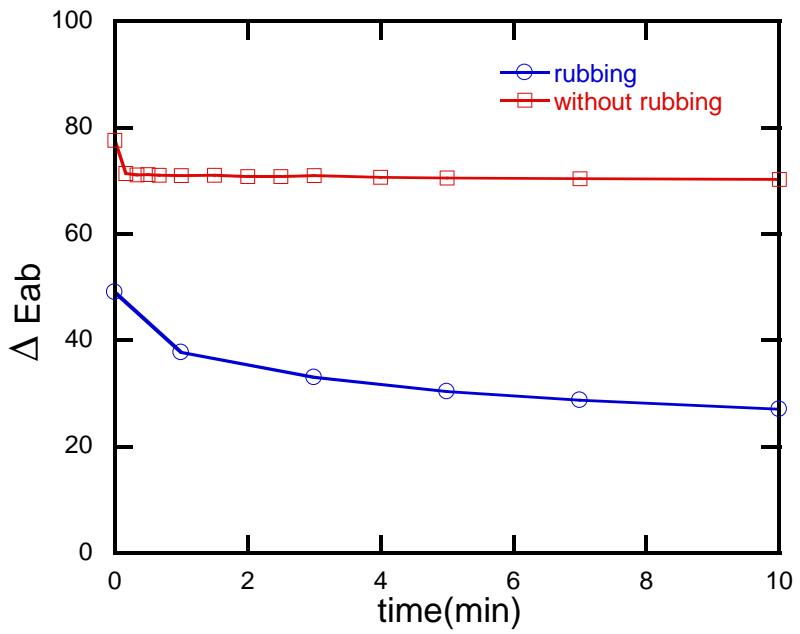


圖 4.3.8 在有／無配向條件下，以 30V 驅動至 Focal conic state，其穩態隨時間變化

4.3.4 結論

表面配向的影響使得膽固醇液晶盒有很好的反射率，但同時也帶來問題。當驅動電壓超過臨界電壓後，反射率會大幅掉落，造成不連續的色偏變化，對於灰階驅動上會有難度。此外，膽固醇液晶的雙穩態特性也受到表面配向的影響而有所改變，在驅動之後需要等待一定程度的時間才會漸趨穩定。

4.4 液晶參數的影響

液晶主要的物理參數包含折射率異向性（Optical Anisotropy, Δn ）、介電異向性（Dielectric Anisotropy, $\Delta \epsilon$ ）、彈性常數、黏滯係數、澄清點（Clearing Temperature, T_C ）等。在實驗所選用的液晶中，其黏滯係數相較於過去的研究還來的低，本節主要探討介電異向性及黏滯係數對膽固醇液晶光電性的影響，實驗會以有配向的條件做為主要量測的架構。

4.4.1 材料參數

實驗所採用的向列型液晶參數如表 4.4.1，折射率異向性均約為 0.1，主要差異在介電異向性及黏滯係數。液晶分子混合旋性物質而產生膽固醇液晶相，旋性分子化學式如圖 4.4.1，控制旋性分子的濃度來達到膽固醇液晶的選擇性反射波長在 550 nm 左右，濃度比例見表 4.4.1。

表 4.4.1 液晶材料參數

LC host	LCT-10-831	LCT-10-832	MJ01744
T_c (°C)	75.50	74.50	/
n_e	1.5841	1.5911	1.5725
n_o	1.4841	1.4900	1.4820
Δn	0.1000	0.1011	0.0905
$\epsilon_{ }$	13.80	8.30	11.46
ϵ_{\perp}	3.60	3.20	3.45
$\Delta \epsilon$	10.20	5.10	8.01
Viscosity (mPa · s)	67	62	260
Chiral dopant (wt%)	15.45	16.16	14.48

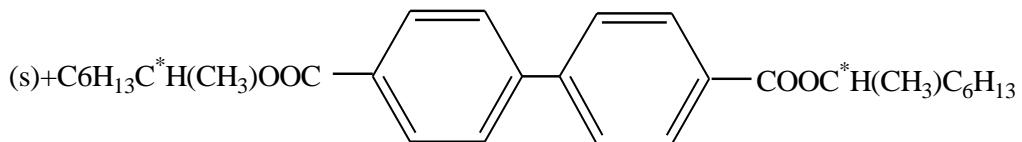


圖 4.4.1 旋性分子化學式

4.4.2 介電異向性影響

選用 LCT-10-831 與 LCT-10-832 兩種液晶，彼此僅在介電異向性有明顯差異，分別為 10.2° 與 5.1° 。控制液晶盒間隙大約在 $7.5\ \mu m$ ，量測電壓—色偏關係圖，其結果如圖 4.4.2。LCT-10-831 的臨界電壓為 $10V$ ，飽和電壓 $18V$ ；LCT-10-832 的臨界電壓為 $13V$ 與飽和電壓 $28V$ 。結果可明顯看出 $\Delta\epsilon$ 越大，受到電壓的影響越明顯，驅動電壓越小，此結果也與理論相符。此外，大 $\Delta\epsilon$ 曲線的 $V_{th}-V_{sat}$ 區間也較窄，這使得液晶可以更容易地控制亮暗的變化。LCT-10-831 色偏飽和值較低，主要原因可能來自於量測或製程誤差，導致一開始在 Planar state 的反射率不如 LCT-10-832 高，色座標 L 值比較小，所以計算出色偏也較小。

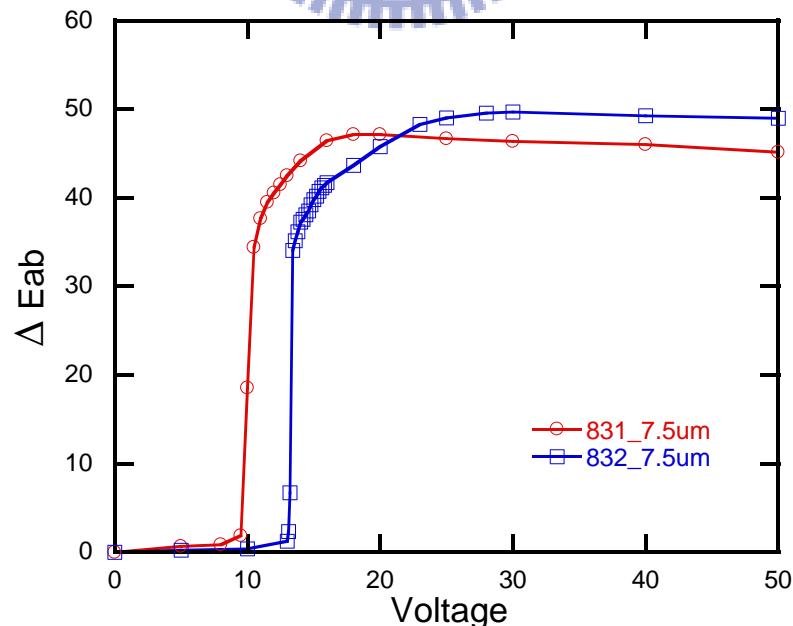


圖 4.4.2 LCT-10-831 與 LCT-10-832 的電壓響應結果

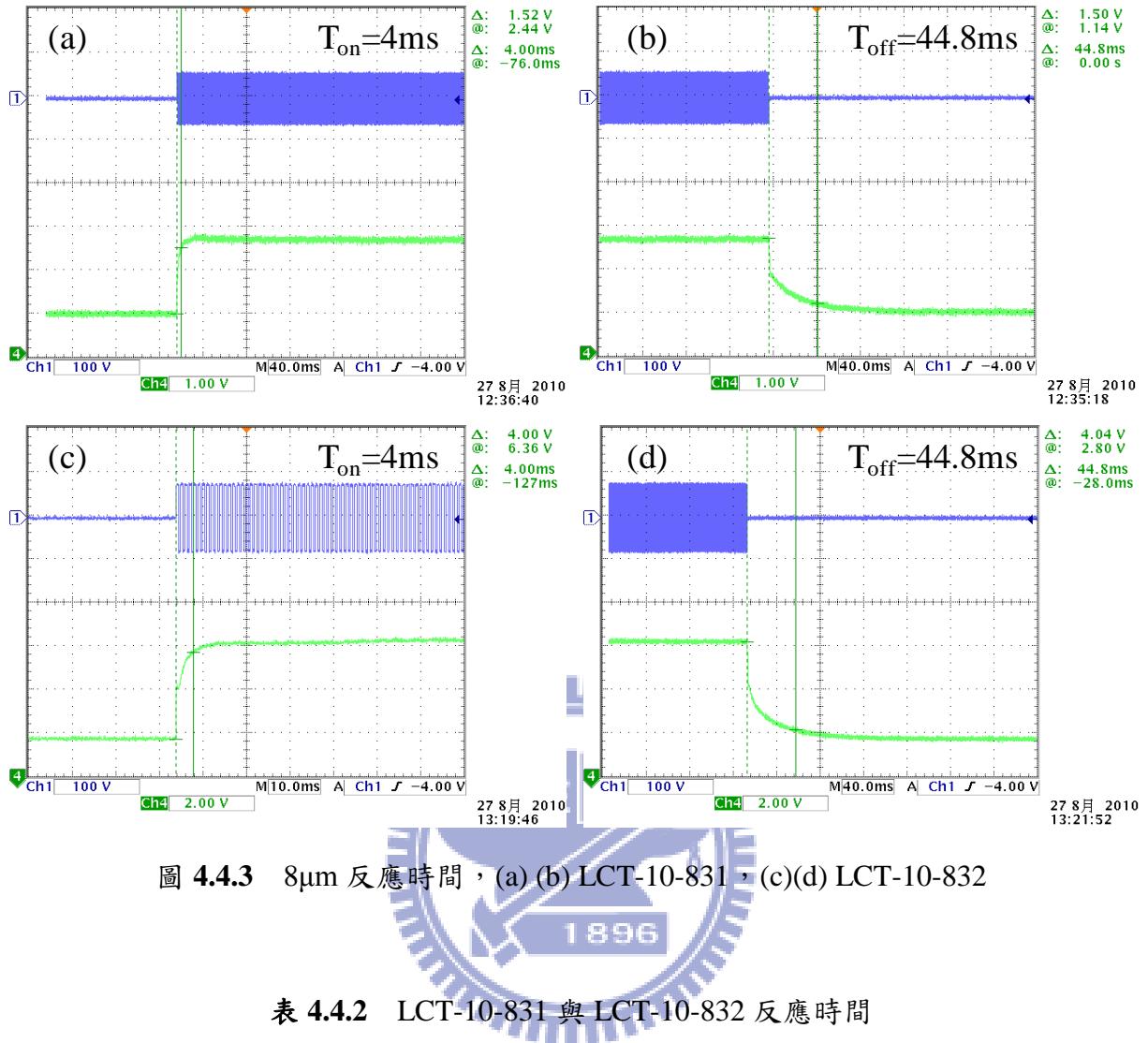


圖 4.4.3 $8\mu\text{m}$ 反應時間，(a)(b) LCT-10-831，(c)(d) LCT-10-832

表 4.4.2 LCT-10-831 與 LCT-10-832 反應時間

LC	Cell gap (μm)	V_{reset} (Volt)	T_{on} (ms)	T_{off} (ms)	Response time (ms)
LCT-10-831	7.2	57.0	4.0	44.8	48.8
LCT-10-832	7.4	77.0	4.0	44.8	48.8

反應時間為膽固醇液晶 Homeotropic 轉換到 Planar state 的量測，量測方式為穿透模式，當施加 1kHz 電壓 V_{reset} 到達 Homeotropic state 時，穿透最高，而鬆弛回復到 Planar state 後，因光散射及反射導致穿透率下降。由表 4.4.2 可知兩者的反應時間皆為 50 ms 左右。由於兩種液晶材料差異只有 $\Delta\epsilon$ 值大小，表示 $\Delta\epsilon$ 值只影響這兩種液晶的驅動電壓大小，對於液晶反應時間影響不大。

4.4.3 黏滯係數影響

MJ01744 相較於 LCT-10-831 及 LCT-10-832 的液晶參數，介電異向性介於兩者之間，黏滯係數為兩者的四倍左右。將此較高黏滯係數的液晶加入比較，量測結果如圖 4.4.4，其臨界電壓為 11V，飽和電壓為 20V。整體電壓—色偏的曲線圖可明顯看出 MJ01744 不論在臨界電壓與飽和電壓的比較上，均位於另兩個低黏滯性液晶之間，此結果較為符合介電異向性的趨勢，而黏滯係數雖然高出甚多，卻沒有表現出明顯的相關性。

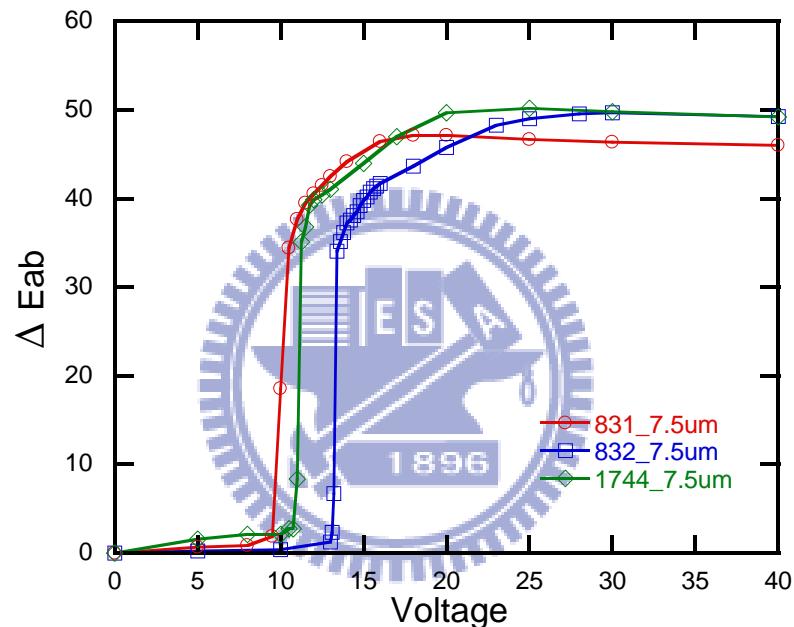


圖 4.4.4 LCT-10-831、LCT-10-832 與 MJ01744 的電壓響應結果

在反應時間的表現上，上一節的結果說明了 $\Delta\epsilon$ 值對於液晶反應時間影響不大，因此只要比較黏滯係數造成的影響即可。量測結果如表 4.4.3，可明顯看出 MJ01744 不論在 on time 及 off time 均需要較長的時間，整體反應時間為 84.8 ms。MJ01744 黏滯係數雖然為 831 及 832 的四倍，但反應時間卻不到兩倍，其中可能有其他因素影響，導致彼此關係不成比例；此外，驅動電壓選取也可能造成不同的 on time，當電壓越大，液晶受到電場的拉力會越強，反應會越快。在此僅可推論黏滯係數主要會影響到反應時間，尤其在 off time 的部分。

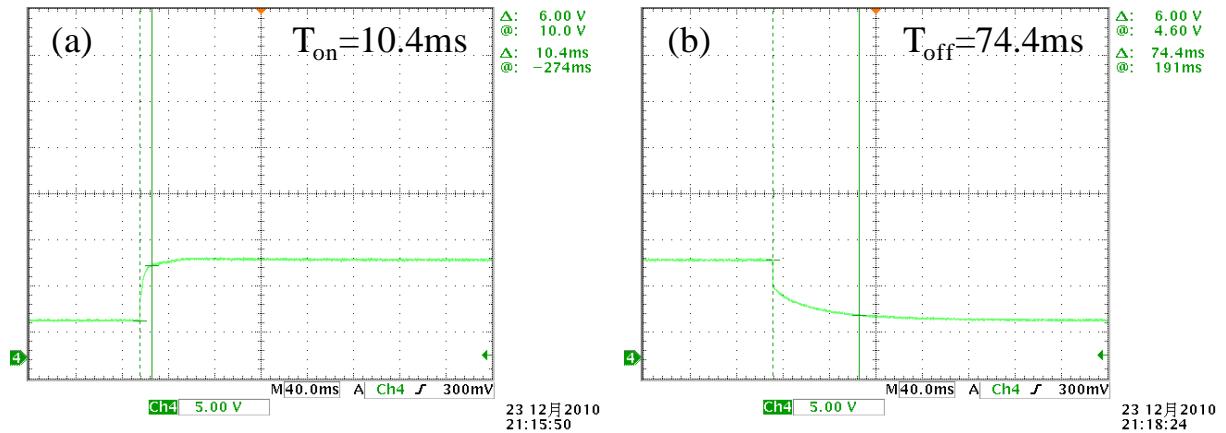


圖 4.4.5 MJ01744_8μm 反應時間，(a) on time，(b) off time

表 4.4.3 8μm 反應時間整理

LC	Cell gap (μm)	V _{reset} (Volt)	T _{on} (ms)	T _{off} (ms)	Response time (ms)
LCT-10-831	7.2	57.0	4.0	44.8	48.8
LCT-10-832	7.4	77.0	4.0	44.8	48.8
MJ01744	7.5	66.0	10.4	74.4	84.8

4.4.4 液晶盒間隙影響

降低液晶盒間隙，可有效改善驅動電壓，搭配大 $\Delta\epsilon$ 值的液晶，亮暗態的驅動可降低至 10V 以下，其電壓響應結果如圖 4.4.6 (a)。LCT-10-831 在 3.5 μm 的液晶盒間隙中，臨界電壓為 5.5V，飽和電壓為 9V，不同液晶參數及液晶盒間隙的特性曲線所相應的電壓值詳列於表 4.4.4。圖 4.4.6 (b)為 LCT-10-832 在不同液晶盒間隙中所量測的 Planar state 頻譜圖，降低液晶盒間隙同時也使反射率降低約 10%，其主要原因在於膽固醇液晶的層狀結構堆疊要在 10 個 pitch 以上才會有比較完整的反射。若以反射中心 550 nm 計算，10 個 pitch 大約是 3.7 μm，液晶盒間隙已略小於此值；此外，表面液晶受配向層影響，並非一開始便以螺旋結構排列，反射不完全導致反射頻譜成現彈頭型，反射率約為 30%。

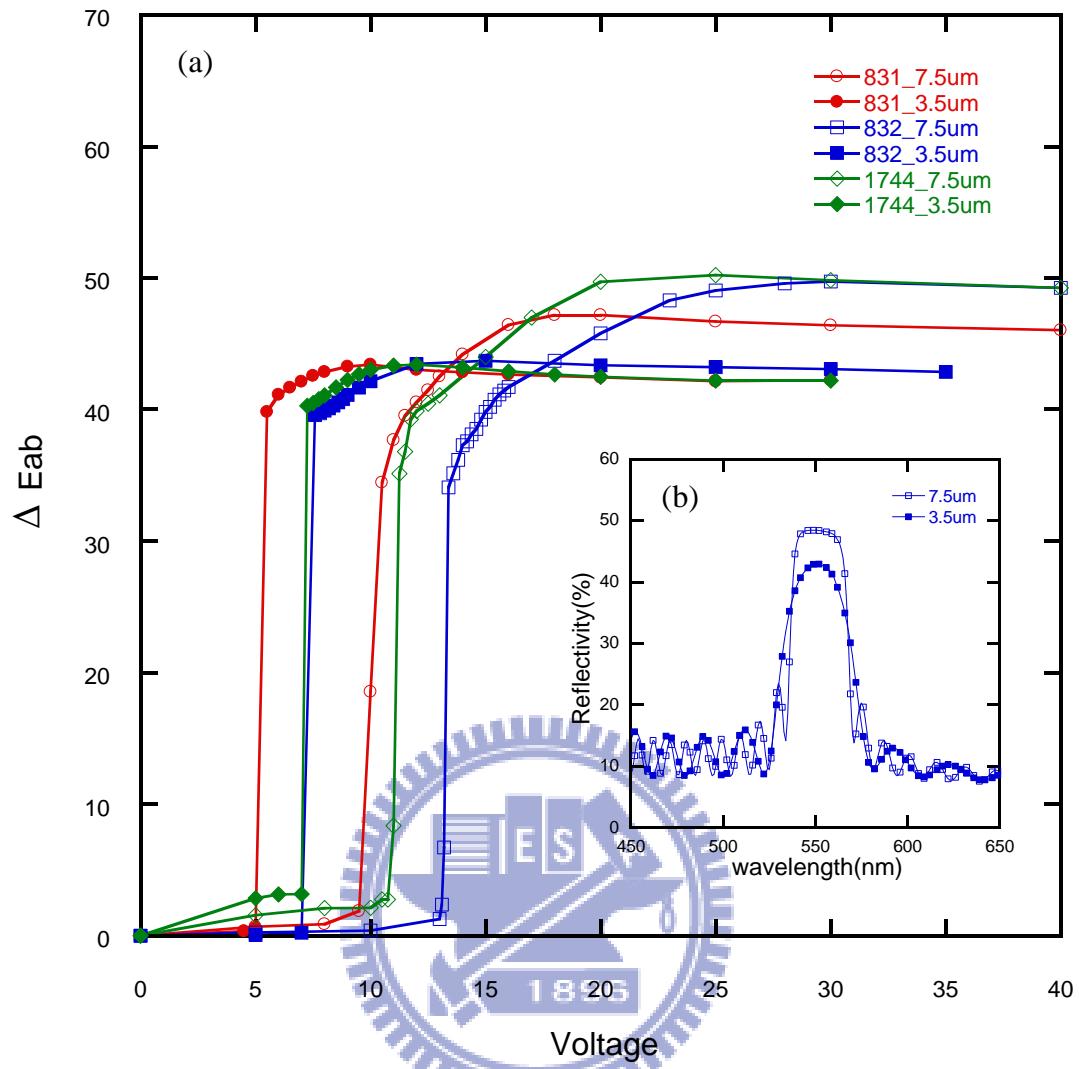


圖 4.4.6 (a)不同液晶與間隙之色偏曲線整理 (b) 不同液晶盒間隙 Planar state 比較

表 4.4.4 不同液晶與液晶盒間隙量測之色偏曲線相應電壓值

	Cell gap (μm)	V_{th}	V_{sat}	V_{reset}
LCT-10-831_7.5μm	7.5	10.0	18	56
LCT-10-831_3.5μm	3.5	5.5	9	28
LCT-10-832_7.5μm	7.6	13.0	28	79
LCT-10-832_3.5μm	3.6	7.5	12	38
MJ01744_7.5μm	7.4	11.0	20	66
MJ01744_3.5μm	3.7	7.0	11	31

降低液晶盒間隙在反應時間上產生很大的影響，結果如圖 4.4.7 及表 4.4.5。首先，反應時間的變化同上一節的結果，其趨勢相應於黏滯係數的改變，MJ01744 擁有較長的 off time，而 LCT-10-831 與 LCT-10-832 反應時間相近。其次，很明顯可以看出所有反應時間均變長並且遠大於 on time，其原因可能在於表面配向作用影響了膽固醇液晶回復到 Planar state 的變化。當液晶盒間隙很大時，在液晶盒中自然回復（free relaxation）的比例佔大多數，而當間隙減小時，表面效應自然被凸顯出來。為此，我們測試一個無表面配向的實驗，結果見圖 4.4.7 (d)。在無表面配向的情況下，液晶分子被表面被束縛的力量減小了，反應時間也明顯減少。

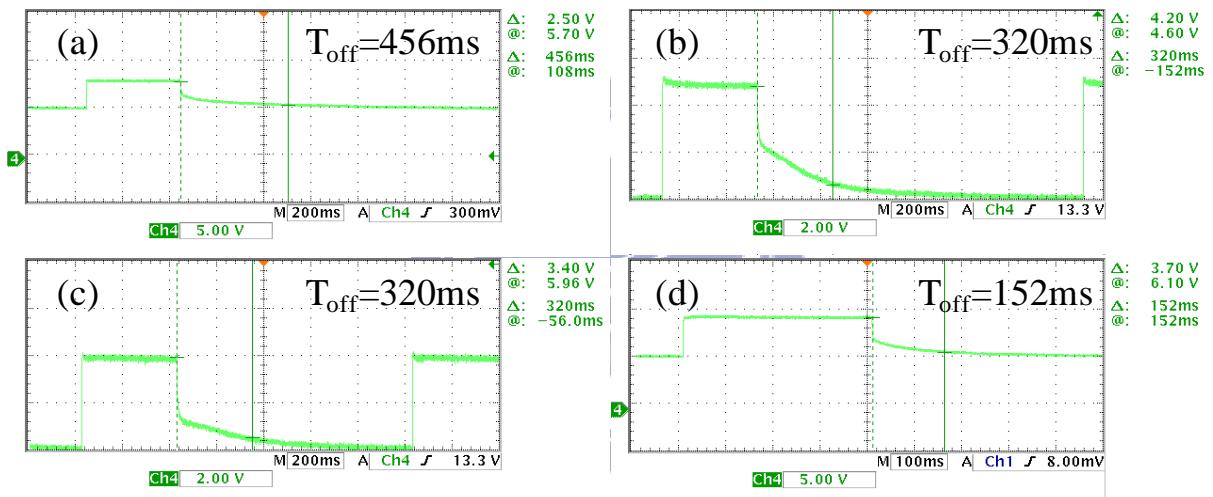


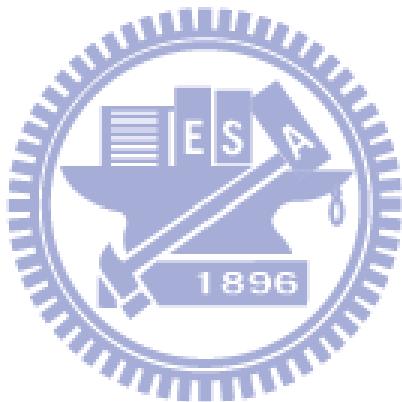
圖 4.4.7 $4\mu\text{m}$ 反應時間，(a) MJ01744，(b) LCT-10-831
(c) LCT-10-832，(d) LCT-10-832 無配向

表 4.4.5 $4\mu\text{m}$ 反應時間整理

LC	Cell gap (μm)	Rubbing	V_{reset} (Volt)	T_{off} (ms)	Response time (ms)
MJ01744	3.6	✓	31.0	456.0	456.0
LCT-10-831	3.5	✓	28.0	320.0	320.0
LCT-10-832	3.5	✓	38.0	320.0	320.0
LCT-10-832	3.7	✗	40.0	152.0	152.0

4.4.5 結論

液晶的物理參數對光電特性有很大的影響，介電異向性主要影響驅動電壓大小，其值越大，驅動電壓越低，臨界電壓 (V_{th})、飽和電壓 (V_{sat}) 及重置電壓 (V_{reset}) 均是如此。黏滯係數主要影響反應時間，其值越低，反應速度越快。降低液晶盒間隙可有效降低驅動電壓，但也凸顯出表面效應，使反應時加拉長五倍以上，研究結果顯示表面配向為主要影響因素之一。



4.5 高反射率膽固醇液晶的穩定灰階

無表面配向的情況下，藉由電壓脈衝與膽固醇液晶本身的穩態便可達到穩定灰階；然而在有表面配向的情況下卻有截然不同的表現。如同 4.3 節所敘述的問題，第一，在除去電壓以後並無法立即穩定在特定狀態，整體結構仍然會隨時間不停改變。第二，在無表面配向之下做電壓驅動，色偏曲線並不會瞬間有劇烈的改變，因此灰階可選擇適當電壓驅動來達成。若欲使在有表面配向之下達到灰階，即反射率要達到 20%、30% 及 40%，必須設法維持膽固醇液晶同時存在 Planar state 與 Focal conic state 狀態，利用部分 Planar state 的區塊提供不同程度的反射，區塊越多反射率會越高。圖 4.5.1 為 POM 底下兩狀態共存的照片，以光源穿透模式觀察，綠色部分為 Planar state，其他為 Focal conic state。

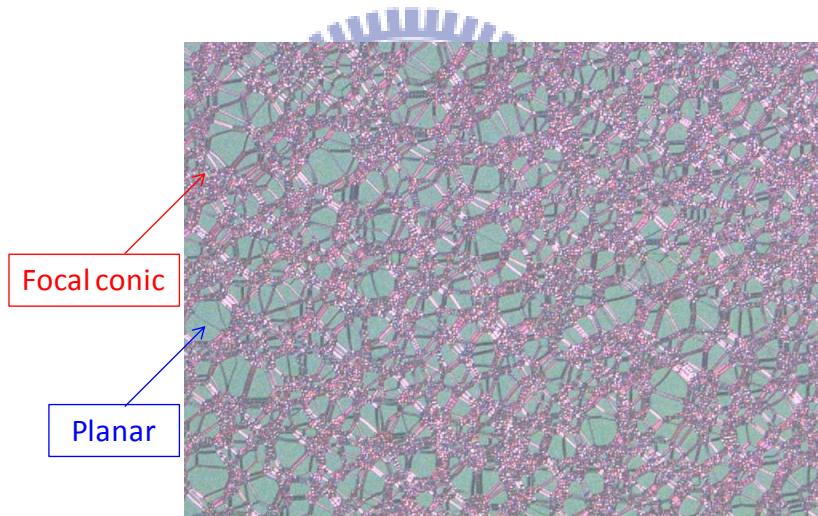


圖 4.5.1 POM 底下膽固醇液晶 planar state 與 focal conic state 共存狀態

4.5.1 穩定液晶狀態

為解決有表面配向的情況下，除去驅動電壓後色偏無法立即穩定的問題，實驗設計另一電壓驅動。色偏無法穩定的原因在於表面配向作用促使液晶傾向排列至 Planar state，為防止液晶分子排列平行於基板，施加一電壓將分子拉起，抵抗配向作用，當兩作用力平衡時，分子便不再運動。此一電壓必須小於臨界電壓，以防止液晶被驅動至 Focal conic state。為了尋找此電壓值，實驗中測試了最極端的狀況，將液晶 LCT-10-832_7.2 μm 驅

動至 Homeotropic state，放掉電壓後整個液晶盒均傾向回到 Planar state，在這過程中持續施加小電壓來阻止回復，結果如圖 4.5.2。當施加小電壓為 5V 時，經過連續 3 次量測後的結果顯示最終還是回復到完整的 Planar state，表示 5V 僅有減緩卻還不足以完全抵抗液晶回復。隨著小電壓的增加，減緩的作用越明顯，直至施加 6.5V 時，液晶回復與電壓驅動才能達到平衡，此時連續的量測均得到相同的頻譜。此外，圖 4.5.2 (d)同時也說明當失去小電壓的抵抗後，液晶會再度回到 Planar state。

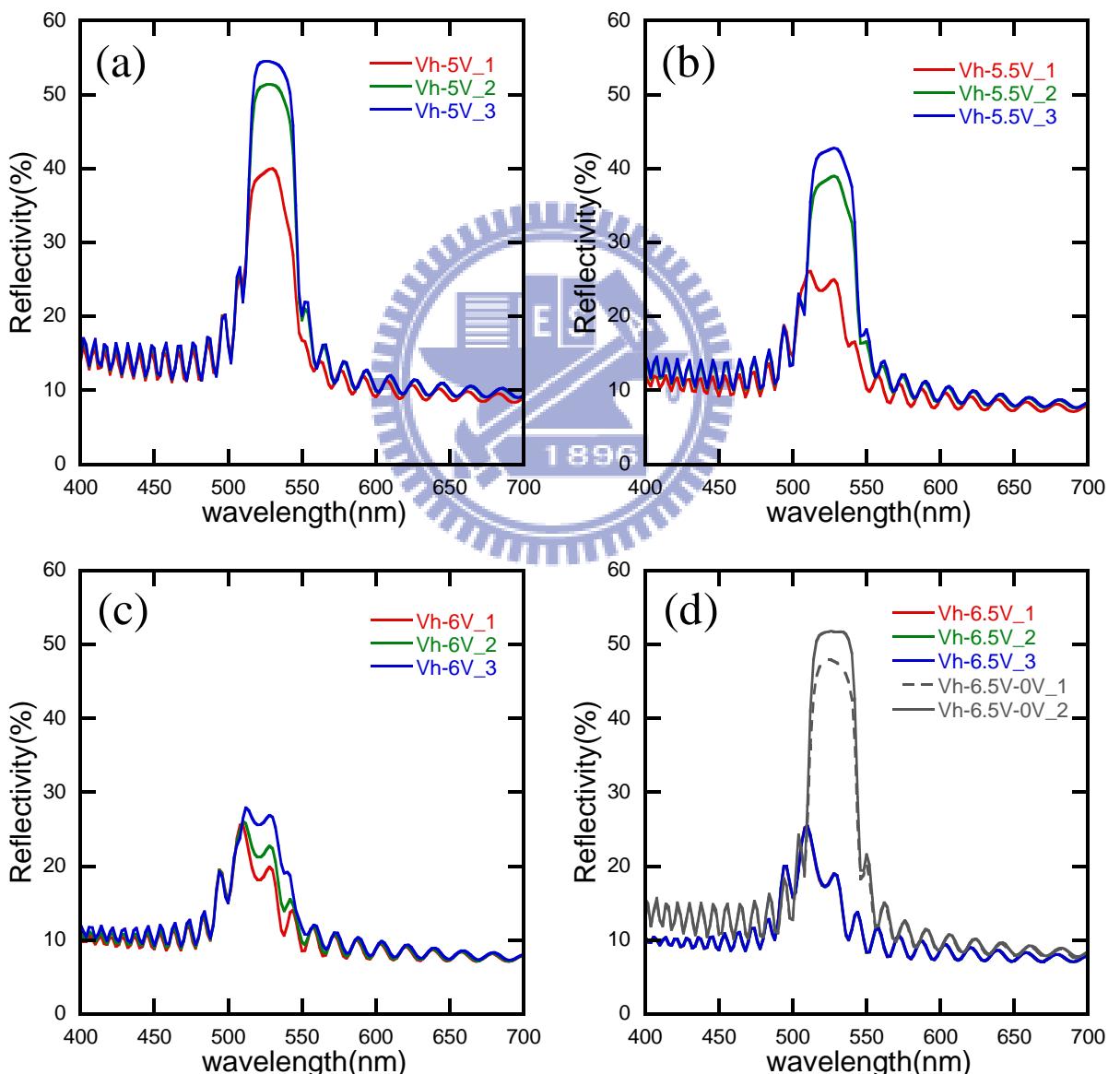


圖 4.5.2 V_{reset} 後，持續施加小電壓穩定液晶狀態之測試，

施加小電壓為 (a) 5V (b) 5.5V (c) 6V (d) 6.5V

4.5.2 灰階一：從 Focal Conic State 形成

先前 4.3 節中提到過，有表面配向的系統中，當液晶被驅動至 Focal conic state 並除去外加電壓後，色偏會隨著時間變化。然而，實驗發現這不穩定的變化卻也可以形成穩定灰階。在長時間的觀察之下，如圖 4.5.3 所示，以 30V 完全驅動到 Focal conic state 之後放掉電壓，受到表面配向的影響，液晶分子不斷改變排列，漸漸傾向 Planar state，但回復的程度有一定的極限，實驗量測經過了 35 分鐘之後，反射率穩定在大約 25% 處。而以 40V 完全驅動之後放掉電壓，最後停在反射率約 30% 處。以此類推可以發現有所趨勢，不同的電壓驅動可達到不同程度的穩態，以越高的電壓驅動至 Focal conic state，除去外加電壓後，液晶排列越接近 Planar state；而當電壓大於 V_{reset} ，其結果便直接轉變為 Planar state。利用這樣的特性可以達到較高反射率的灰階。

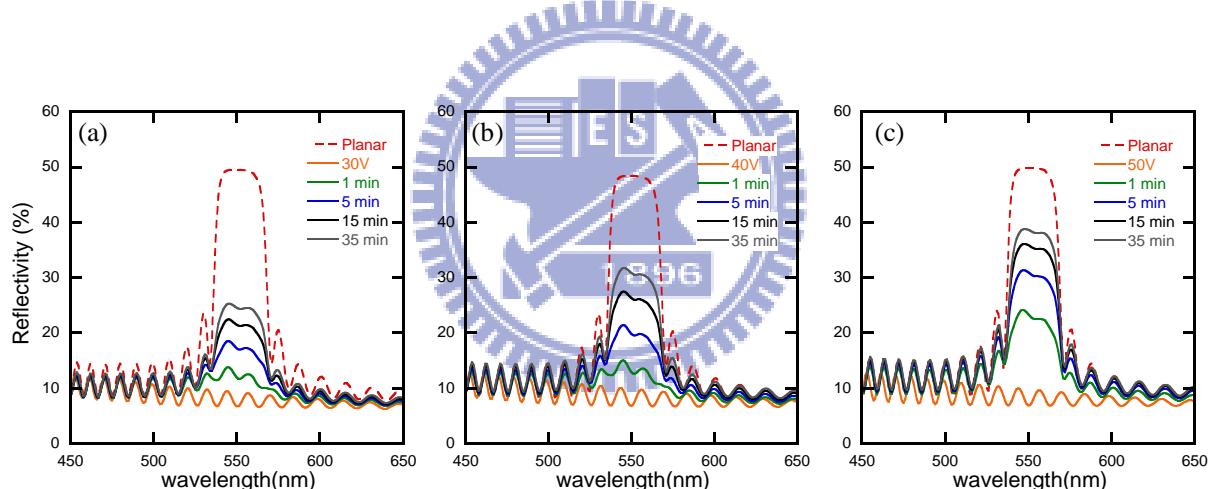


圖 4.5.3 有配向之下 Focal conic state 穩態變化，驅動至 Focal conic state 電壓 (a) 30V (b) 40V (c) 50V

圖 4.5.4 為有／無表面配向的結果比較，在有配向的情況下，色偏在短時間內仍不斷改變，但在長時間的轉變後，色偏值漸趨穩定。分別以不同電壓驅動，長時間的鬆弛後可形成穩定灰階。無表面配向的情況下，除去驅動電壓後，液晶顯示良好的穩定性，色偏值幾乎毫無改變。對於高反射率膽固醇液晶盒的穩定灰階，此法雖然可以在形式上達成，但等待時間過久，實際上可能應用性不大，接下來將會探討更快速形成穩定灰階的方法。

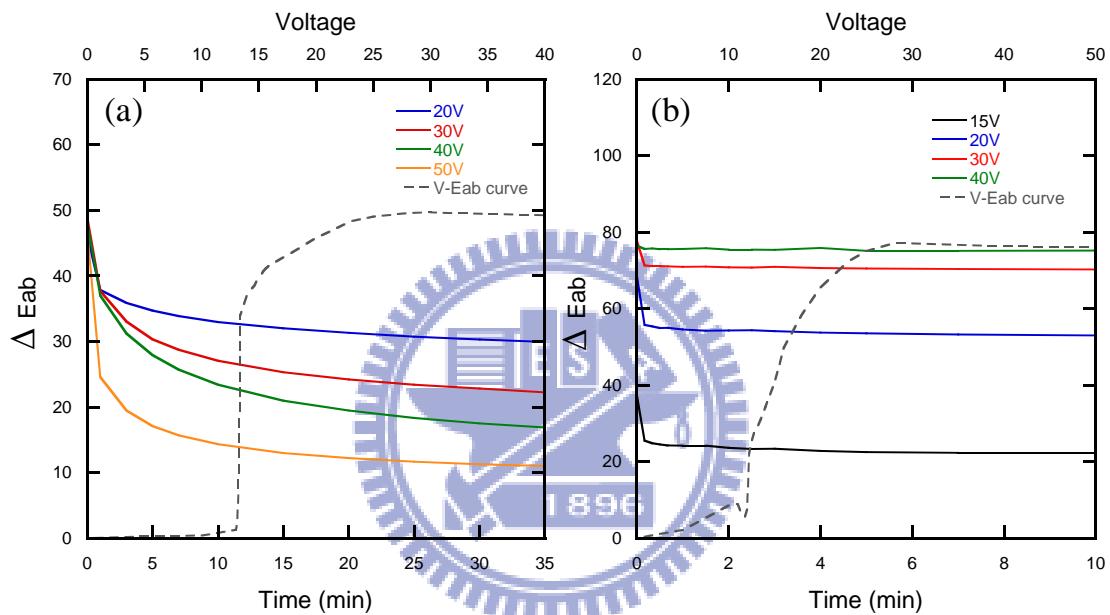


圖 4.5.4 Focal conic state 穩態比較，(a) 有配向 (b) 無配向

4.5.3 灰階二：從 Homeotropic State 形成

一般認知中，膽固醇液晶在驅動至 Homeotropic state 之後放掉電壓，液晶排列會回復至 Planar state，但這個轉態並不會立即發生。當放掉電壓的一瞬間，的確可以觀察到顏色產生，表示液晶回復其螺旋結構，而在有表面配向的情況底下，若要使螺旋結構排列整齊，反射率回復至 40% 以上，則仍需數秒的時間。圖 4.5.5 為 POM 下觀察到的變化過程，其中綠色部分表示 Planar state。在除去 V_{reset} 3 秒後，圖 4.5.5 (a) 可觀察到仍有許多缺陷存在，而隨著時間增加，缺陷越變越少，表示液晶排列更趨於完整的 Planar state，反射率也會因此提升。

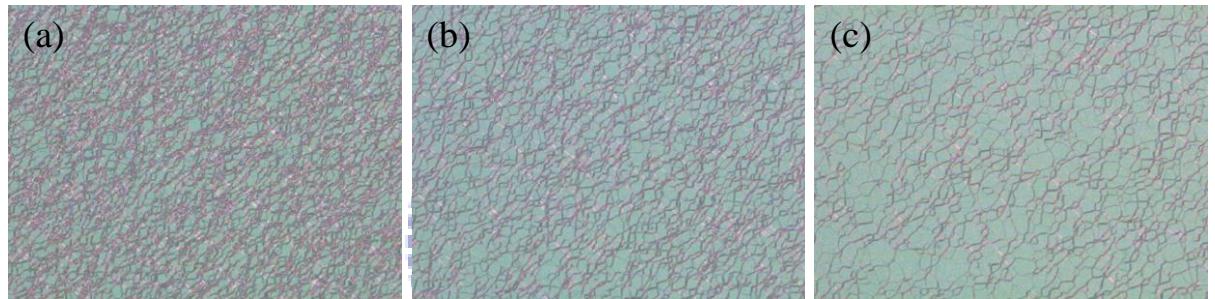


圖 4.5.5 有表面配向在 V_{reset} 放電壓之後的變化情形，(a)3 秒後 (b)5 秒後 (c)10 秒後

由上述的結果可以知道，從 Homeotropic 轉變到完全 Planar state 的過程中，液晶同時存在部分反射與部分散射的結構，轉變的時間越長，反射的區塊便會增加，控制反射區塊的比例，便可以達到不同的灰階。先前 4.5.1 節所提及，施加一小電壓可防止膽固醇液晶持續回復到 Planar state，因此實驗設計電壓驅動方式如圖 4.5.6，藉此來得到穩定灰階。首先給予 V_{reset} 使液晶處於 Homeotropic state，接著除去驅動電壓使液晶開始回到 Planar state，控制等待時間 (waiting time) 的長短來達到不同比例的反射區塊，最後持續施加一小電壓來維持此狀態。



圖 4.5.6 從 Homeotropic state 達到灰階之電壓驅動設計

實驗中以 LCT-10-832_7.2μm 做為量測，在此最後施加小電壓為 8V，結果如圖 4.5.7。

當 Waiting time 為 1 秒時，量測的結果反射率在 28%，連續 3 次的量測的結果，頻譜圖近乎一致，表示此時液晶具有良好穩定性；而 Waiting time 為 2 及 3 秒時，反射率分別為 34% 及 37%。由此方法，便可以成功達到穩定灰階。

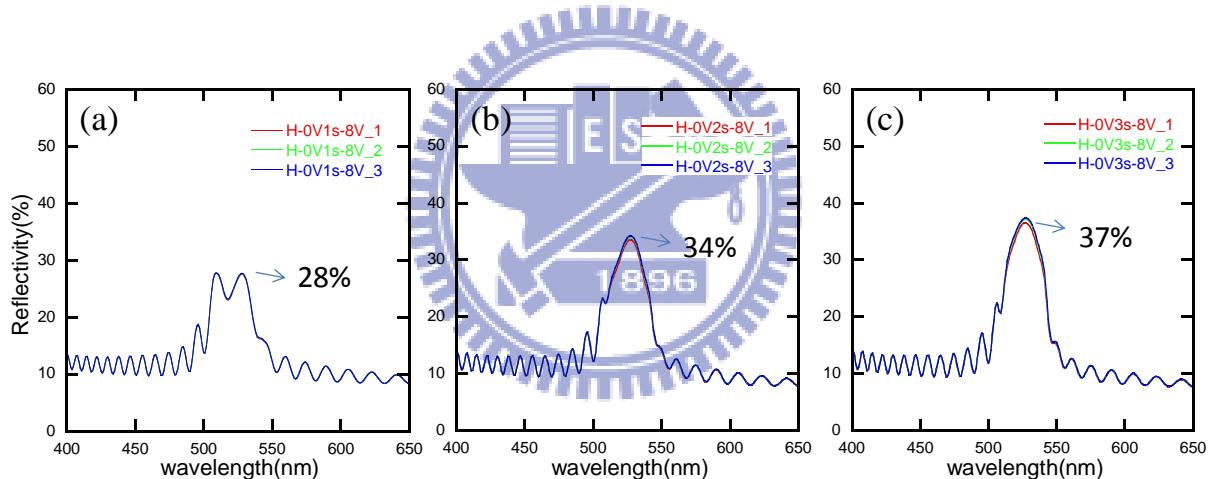


圖 4.5.7 從 Homeotropic state 達到灰階之驅動結果

waiting time 為(a) 1 秒 (b) 2 秒 (c) 3 秒

4.5.4 灰階三：從 Planar State 形成

在有表面配向的情況下，當驅動電壓大於 V_{th} ，液晶會先產生一些缺陷點，藉由缺陷點的擴張進而轉變成 Focal conic state。圖 4.5.8 與圖 4.5.9 分別以 20V 及 25V 驅動至 Focal conic state，在此 V_{th} 為 12V。當驅動電壓越大時，起始出現的缺陷點會更多且分布均勻，藉由更多缺陷點擴張，達到 Focal conic state 的速度也會更快。以 20V 驅動，完全達到 Focal conic state 需要約 30 秒；而以 25V 驅動僅需 15 秒。

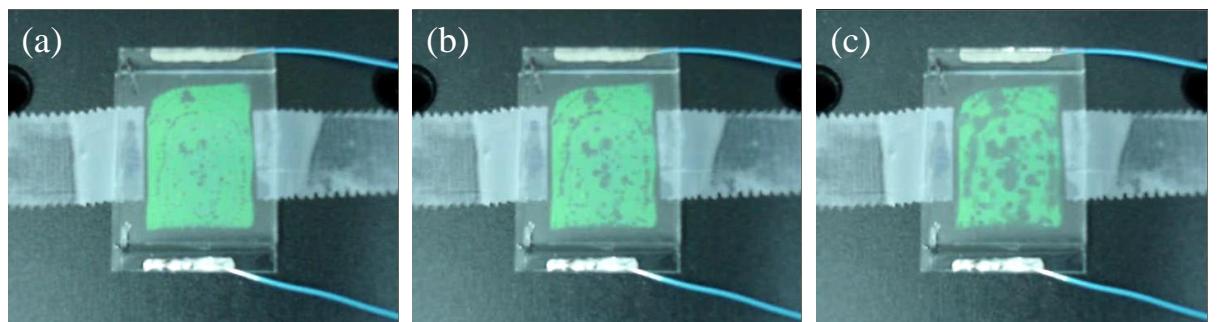


圖 4.5.8 以 20V 驅動之狀態變化，驅動後(a) 3 秒 (b) 5 秒 (c) 8 秒

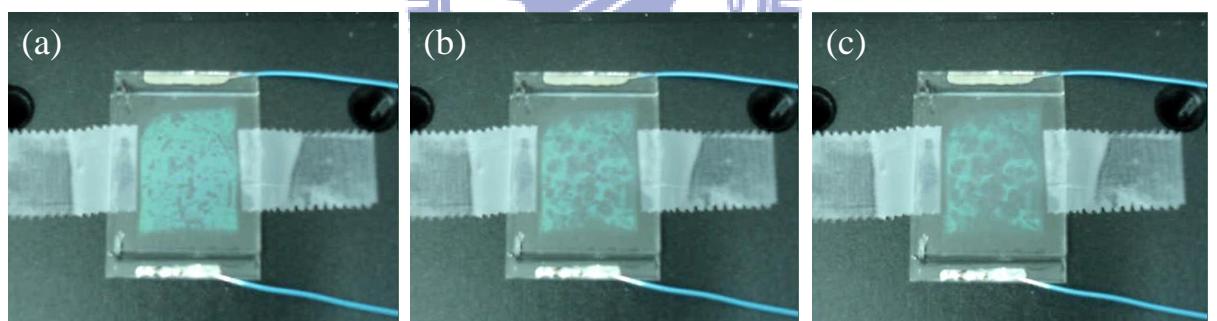


圖 4.5.9 以 25V 驅動之狀態變化，驅動後(a) 3 秒 (b) 4 秒 (c) 5 秒

由於缺陷點的產生，造成了 Planar 與 Focal conic state 共存的狀態，若以更高的電壓做過飽和驅動 (over driving)，可以造成更多的缺陷點，驅動時間增加則會使缺陷點擴大。利用這些特性，可以控制驅動電壓大小與時間來達到有配向情況下的灰階。為此，實驗設計電壓驅動方式如圖 4.5.10。首先給予一高電壓 V_x 做過飽和驅動 500 ms，此時液晶盒表面將會出現許多缺陷點，之後隨即施加小電壓 7.5V，以穩定此時的液晶狀態。

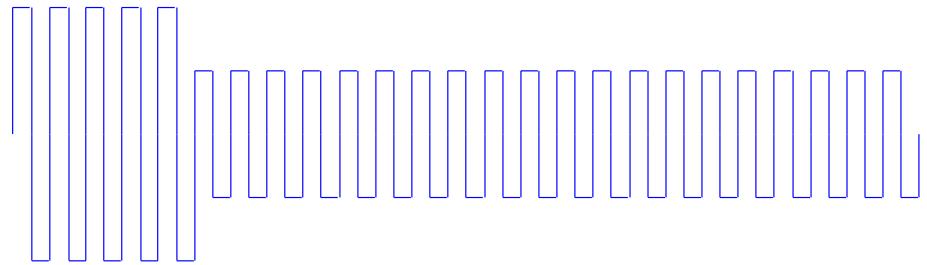


圖 4.5.10 從 Planar state 達到灰階之電壓驅動設計

實驗中以 LCT-10-832_7.2 μm 做為量測， V_x 分別為 32V、32.6V 及 33.2V，驅動結果如圖 4.5.11。當 V_x 為 32V 時，瞬間產生的缺陷點與原有 Planar state 共存的狀態下，量測反射率大約在 40%；而當 V_x 為 33.2V 時，較大驅動電壓導致更多的缺陷點產生，量測到的反射率也較小，大約在 20%。此外，實驗中同時做了穩定性的測試，以施加 7.5V 小電壓之時算起為 0 min，10 min 之內所量測的光譜曲線均無變化，表示其穩定性極佳。圖 4.5.12 為實驗結果所對應色偏-電壓曲線圖，此驅動模式可使色偏值分別穩定於 10、20、30，即穩定灰階。

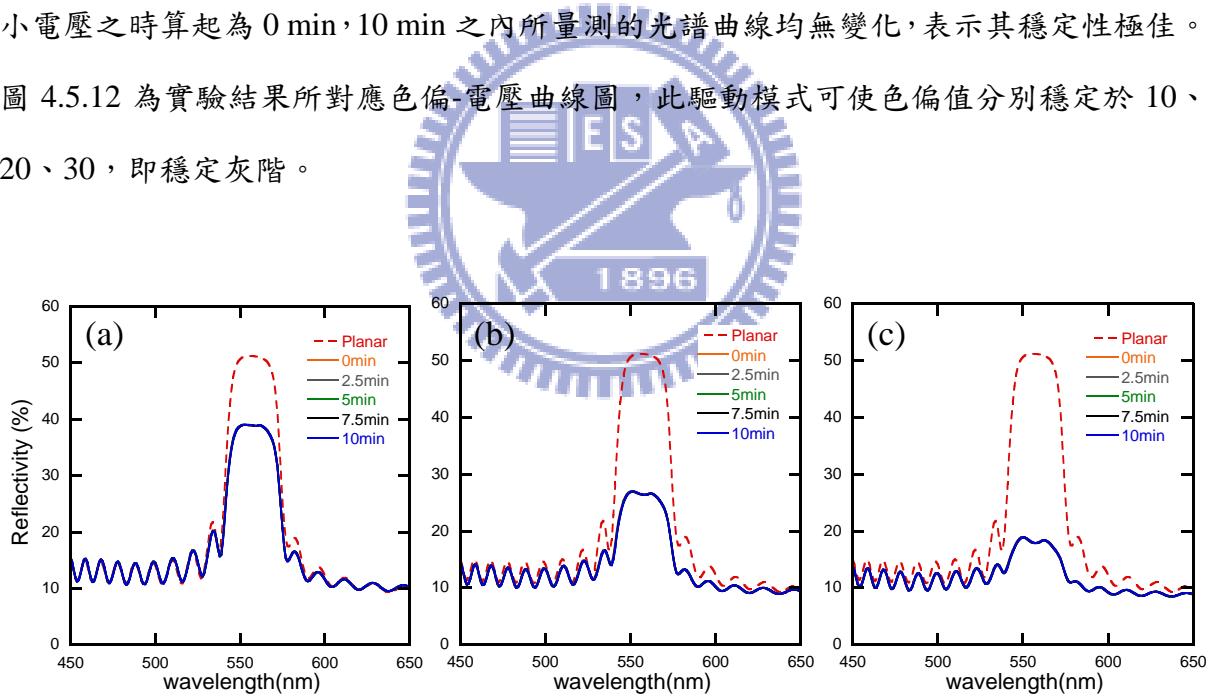


圖 4.5.11 從 Planar state 達到灰階之驅動結果， V_x 為(a) 32V (b) 32.6V (c) 33.2V

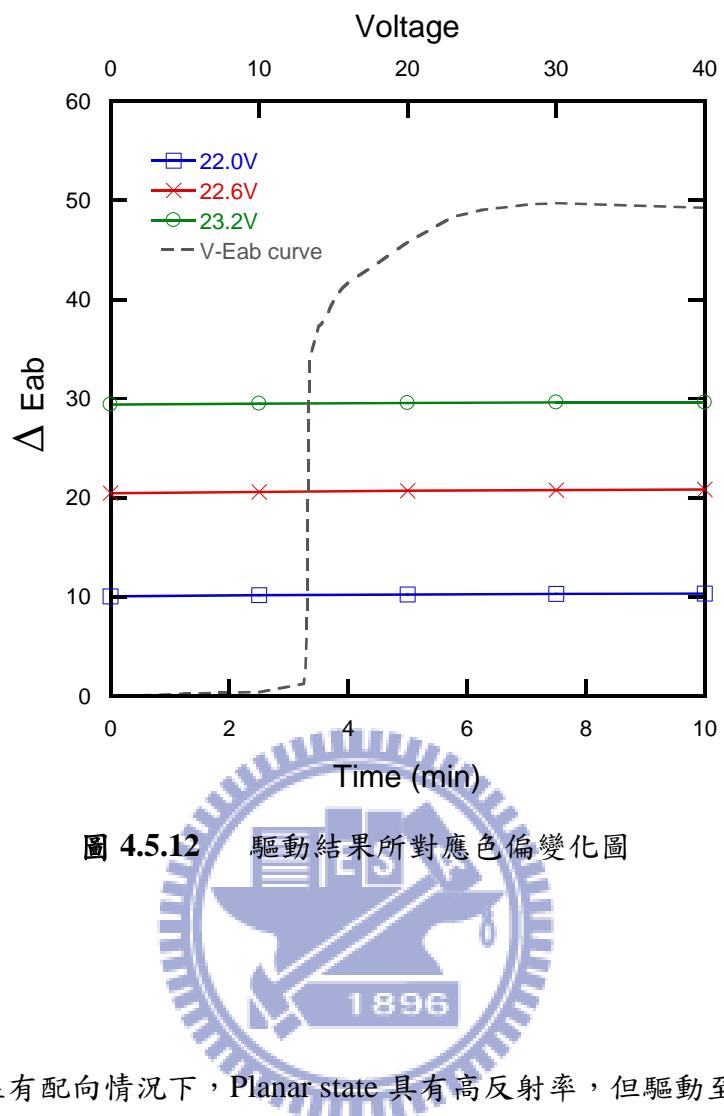


圖 4.5.12 驅動結果所對應色偏變化圖

4.5.5 結論

膽固醇液晶在有配向情況下，Planar state 具有高反射率，但驅動至 Focal conic state 後，反射率急遽下降，導致在電壓—色偏曲線上變化不連續，使灰階驅動有困難。本節中提出 3 種方式，分別從 Focal conic state、Homeotropic state 及 Planar state 達成。其中前兩種方式屬於被動驅動，需要依靠液晶本身自然回復而達成，因此回復速度取決於材料特性，結果顯示需要達到數秒至數分鐘才能得到灰階。第三種屬於主動驅動，可控制驅動電壓與時間，並且得到穩定灰階，較為可能做為實際應用。

第五章 結論

本研究中對於介電異向性、黏滯係數與液晶盒間隙的改變探討其變因對於光電特性的影响。介電異向性主要影響驅動電壓，其值越大，所需驅動電壓越小。黏滯係數主要影響反應時間，特別是在 off-time 的部分，黏滯係數越大，反應時間越長。降低液晶盒間隙更可以有效改善驅動電壓，實驗中所得最佳驅動結果， $V_{th}= 5.5\text{ V}$ ， $V_{sat}= 9\text{ V}$ ， $V_{reset}= 28\text{ V}$ ；但降低液晶盒間隙卻也同時造成反應時間的增加，間隙從 $8\mu\text{m}$ 降低至 $4\mu\text{m}$ ，反應時間從 50ms 增加至 300ms 左右，其原因可能是表面配向作用影響液晶自然回復至 Planar state 的趨勢，實驗中無表面配向的結果明顯較有表面配向的結果來的快。

在有表面配向的情況下，膽固醇液晶會得到將近理論極限的反射率，但缺點是配向作用影響液晶在 Focal conic state 的穩態，以及 Planar 與 Focal conic state 的反射率差異過大，形成灰階不連續的現象。為達到穩定灰階，必須維持 Planar 與 Focal conic state 共存，並防止兩狀態互相影響，同時也要防止液晶與表面配向互相影響，而造成不穩定的灰階。實驗中嘗試三種方式來達到穩定灰階，分別從 Focal conic、Homeotropic 及 Planar state 來達成。前兩種為被動式驅動，所需時間較長，均在秒以上等級；最後一種為主動式驅動，實驗中以過飽和驅動方式（over driving）驅動 500 ms ，可得到最快速且最穩定的灰階。

第六章 未來展望

降低液晶盒間隙後，轉態過程受到表面效應的影響使得反應時間變長，但為了得到低驅動電壓，降低間隙最為直接，效果也最好，因此試圖改善反應時間為未來必定的目標。目前的旋性分子參入液晶的量大約是 16 wt% 左右，若採用高 HTP 的旋性分子，混入向列型液晶的量可以更少，在黏滯性上可望更低。此外，高 HTP 也同時使得膽固醇液晶的彈性常數 K_{22} 更高，在回復的過程也會因此更快速，反應時間進而低，最好的結果便是希望回復的彈性力遠大於表面作用力的影響，此時反應時間便不會有延遲的現象產生。

在有配向的情況下，當驅動膽固醇液晶從 Planar state 至 Focal conic state 時，轉態從缺陷點 (defect) 開始擴張至整個液晶盒。轉態的變化類似驅動 OCB 液晶時的結晶成核 (nucleation) 現象，先前的研究顯示，含表面突起的配向層會改變表面的錨定能，使得 OCB 再轉態時更容易進入到 bend mode [43]。同理，未來可將含有奈米粒子的配向層表面應用於主動式穩態驅動。理論上膽固醇液晶的缺陷點會更容易出現，因此可以使用更小的電壓或更短的時間驅動來達到穩態灰階。

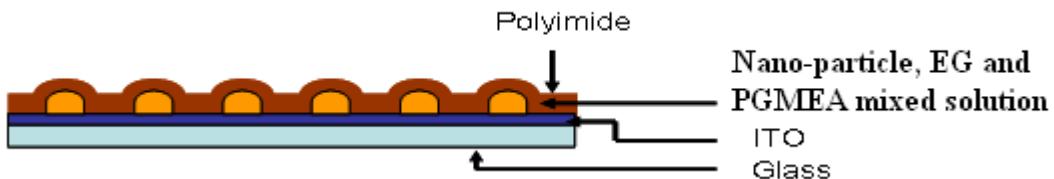


圖 5.2.1 奈米粒子突起之配向層表面

参考文献

- [1] J. Heikenfeld, *et al.*, "Review Paper: A critical review of the present and future prospects for electronic paper," *J. Soc. Inf. Disp.* **19**, 129-156 (2011)
- [2] F. Reinitzer, "Beiträge zur Kenntniss des Cholesterins," *Monatsh Chem.* **9**, 421-441 (1888)
- [3] O. Lehmann, "Ü ber fliessende Krystalle," *Z. Phys. Chem.* **4**, 462 (1889)
- [4] Y. Tanaka, *et al.*, "A new design to improve performance and simplify the manufacturing process of high-quality MVA TFT-LCD panels," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **30**, 206-209 (1999)
- [5] S. Matsumoto, *et al.*, "Phase grating using a ferroelectric liquid-crystal mixture with a photocurable liquid crystal," *J. Appl. Phys.* **99**, 113709 (2006)
- [6] J. L. West and V. Bodnar, "Optimization of Stacks of Reflective Cholesteric Films for Full Color Displays," *Proc. 5th Asian Symp. on Inf. Display* **29**, 29-32 (1999)
- [7] K. Hashimoto, *et al.*, "Reflective Color Display using Cholesteric Liquid Crystals," *J. Soc. Inf. Disp.* **6**, 239-242 (1998)
- [8] K.-T. Chen, *et al.*, "Full Color Cholesteric Liquid Crystal Display with High Color Performance," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **41**, 289-292 (2010)
- [9] H.-M. Tsai, *et al.*, "Ink-jet Printed Multi-Color Cholesteric Liquid Crystal Display," *Proceedings of the 13th International Display Workshops*, 1511-1514 (2006)
- [10] B.-Y. Lee, *et al.*, "Full Color Flexible Cholesteric Display on Single Substrate," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **41**, 286-288 (2010)
- [11] D.-K. Yang, L.-C. Chien, J. W. Doane, "Cholesteric liquid crystal polymer dispersion for

- haze-free light shutters," *Appl. Phys. Lett.* **60**, 3102 (1992)
- [12] I. Dierking, "Polymer Network–Stabilized Liquid Crystals," *Adv. Mater.* **12**, 167-181 (2000)
- [13] Case Western Reserve University, <http://plc.cwru.edu/>
- [14] S. Hurley, J. Ma and D.-K. Yang, "A Flexible Display Using Dye-Doped PSCT," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **40**, 1520-1523 (2009)
- [15] S. Hurley and D.-K. Yang, "The Scattering Profile of Polymer Stabilized Cholesteric Texture Displays," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **41**, 293-296 (2010)
- [16] R. Bao, C.-M. Liu and D.-K. Yang, "Smart Bistable Polymer Stabilized Cholesteric Texture Light Shutter," *Appl. Phys. Express* **2**, 112401 (2009)
- [17] Y.-H. Lin, *et al.*, "Polarization-independent and fast-response phase modulation using a normal-mode polymer-stabilized cholesteric texture," *J. Appl. Phys.* **98**, 043112 (2005)
- [18] H. Ren, S. Gauza and S.-T. Wu, "A High Contrast and Low Voltage PSCT Reflective Display," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **34**, 641-643 (2003)
- [19] J.-H. Liu, *et al.*, "Preparation and Electro-optical Behaviors of Polymer Stabilized Liquid Crystal Cells with Chiral Matrices Derived from (-)-Camphor," *J. Appl. Polym. Sci.* **98**, 88-96 (2005)
- [20] H. Ren and S.-T. Wu, "Reflective reversed-mode polymer stabilized cholesteric texture light switches," *J. Appl. Phys.* **92**, 797-800 (2002)
- [21] S. W. Stephenson, *et al.*, "Development of a Flexible Electronic Display Using Photographic Technology," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **35**, 774-777 (2004)
- [22] P. Drzaic, *Proceedings of the SPIE Liquid Crystal Displays and Application* **1257**, 29-36 (1990)
- [23] P. Drzaic, "Liquid Crystal Dispersions," (World Scientific, Singapore, 1995)
- [24] G. P. Crawford, "Flexible Flat Panel Displays," (John Wiley & Sons, New York, 2005)
- [25] A. Khan, *et al.*, "Progress in Flexible and Drapable Reflective Cholesteric Displays," *J.*

Soc. Inf. Disp. **15**, 9-16 (2007)

- [26] A. Khan, *et al.*, "Recent Progress in Color Flexible Reflective Cholesteric Display," *J. Soc. Inf. Disp.* **16**, 245-250 (2008)
- [27] D.-K. Yang, *et al.*, "Bistable Polymer Dispersed Cholesteric Reflective Display," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **34**, 959-961 (2003)
- [28] D. Coates, "Low-Power Large-Area Cholesteric Displays," *Information Display* **25**, 16-19 (2009).
- [29] D. W. Berreman and T. J. Scheffer, "Bragg Reflection of Light from Single-Domain Cholesteric Liquid-Crystal Films," *Phys. Rev. Lett.* **25**, 577-581 (1970)
- [30] W. D. St. John, W. J. Fritz, Z. J. Lu and D.-K. Yang, "Bragg reflection from cholesteric liquid crystals," *Phys. Rev. E* **51**, 1191-1198 (1995)
- [31] P. S. Salter, *et al.*, "Alignment of the Uniform Lying Helix Structure in Cholesteric Liquid Crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, 101302 (2009)
- [32] I. Dierking, "Textures of Liquid Crystals," (Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2003)
- [33] O. D. Lavrentovich and D.-K. Yang, "Cholesteric cellular patterns with electric-field-controlled line tension," *Phys. Rev. E* **57**, R6269-R6272 (1998)
- [34] W. Helfrich, "Deformation of Cholesteric Liquid Crystals with low threshold voltage," *Appl. Phys. Lett.* **17**, 531-532 (1970)
- [35] J. P. Hurault, "Static distortions of a cholesteric planar structure induced by magnetic or ac electric fields," *J. Chem. Phys.* **59**, 2068-2075 (1973)
- [36] S.-T. Wu and D.-K. Yang, "Reflective Liquid Crystal Display," (John Wiley & Sons, New York, 2001)
- [37] D.-K. Yang, "Flexible Bistable Cholesteric Reflective Displays," *J. Disp. Technol.* **2**, 32-37, (2006)
- [38] N. Ohta and A. R. Robertson, "Colorimetry : fundamentals and applications," (John

Wiley & Sons, New York, 2005)

- [39] F. Bruyneel, *et al.*, "Method for measuring the cell gap in liquid-crystal displays," *Opt. Eng.* **40**, 259–267 (2001)
- [40] S.-T. Wu, D. Coates and E. Bartmann, "Physical properties of chlorinated liquid crystals," *Liquid Crystals* **10**, 635-636 (1991)
- [41] Masahiro Imai, *et al.*, "Method for Determination of Rotational Viscosity in Nematic Liquid Crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, L119-L121(1994)
- [42] C.-F. Jheng, H.-M. P. Chen and W.-C. Cheng, "Color Management for Multiple-Primary Flexible Cholesteric-LCD," *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **41**, 1667-1670 (2010)
- [43] Y.-Y. Chang, "The study of Transition free Liquid Crystal Reactive Monomer Modified OCB Cell," 國立交通大學顯示科技研究所碩士論文 (2009)

