

國立交通大學

電子物理系研究所 碩士論文



兆赫波段下可調式電控液晶相位延遲器反應時間之改善
Improvement on the response time of electrically tunable
liquid crystal terahertz phase shifter

研究生：盧中平

指導教授：趙如蘋 教授

中華民國九十九年六月

兆赫波段下可調式電控液晶相位延遲器反應時間之改善
Improvement on the response time of electrically tunable
liquid crystal terahertz phase shifter

研究生：盧中平

Student : Chung-Ping Lu

指導教授：趙如蘋 教授

Advisor : Prof. Ru-Pin Pan

國立交通大學

電子物理系研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Electrophysics

College of Science

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Electrophysics

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

兆赫波段下可調式電控液晶相位延遲器反應時間之改善

研究生：盧中平

指導教授：趙如蘋 教授

國立交通大學電子物理系研究所



液態晶體被廣泛應用在可見光波段之光學元件上，但在兆赫波段之元件卻相當缺乏。本實驗室已成功製作出兆赫波段下電控液晶相位延遲器，但是此元件的厚度較厚，使得反應時間較慢。本論文利用雙頻液晶不同頻率擁有不同介電異方性的特性來改善元件的反應時間。

由實驗結果發現利用雙頻液晶所製作的兆赫波段下電控液晶相位延遲器擁有很快的 turn back 反應時間，但 turn on 反應時間卻相當慢。經由配向膜和操作頻率的改進，成功利用垂直配向的雙頻液晶、操作頻率在 500Hz 和 100kHz 之間切換，可增快兆赫波段下電控液晶相位延遲器的反應時間達 5% 。

Improvement on the response time of electrically tunable liquid crystal terahertz phase shifter

Student : Chung-Ping Lu

Advisor : Prof. Ru-Pin Pan

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Liquid crystal (LC) has been widely used for optical components in visible light range. However, it is short of optical components in the terahertz (THz) frequency range. Our group had demonstrated an electrically controlled liquid crystal THz phase shifter. Because the LC layer of these THz components is thick, the response time is very slow. In this thesis, the response time is improved by using dual-frequency liquid crystal with different dielectric anisotropy at different applying frequencies.

In this work, the dual-frequency liquid crystal THz phase shifter has been demonstrated. The turn back response time of this THz phase shifter is fast, but the turn on response time is very slow. By using switching frequency between 500Hz and 100kHz in a homeotropically aligned dual-frequency liquid crystal THz phase shifter, we have succeeded in reducing the response time up to 5 % .

致謝

首先要感謝趙如蘋老師在我碩士班這兩年時間細心的指導，老師除了在研究上教導我很多觀念、方法及嚴謹的態度外，也在做人處事上教導我很多東西，使我獲益良多。

感謝台灣默克光電公司(Merck)的許時紹先生，他不厭其煩的幫助我詢問世界各地默克分公司有無雙頻液晶庫存，非常幸運的最後在日本找到了MLC-2048 雙頻液晶，使我的實驗能順利進行下去。

感謝家任學長、宗達學長和卓帆學長在實驗研究上的指導和協助，每當我在實驗上遇到困難時你們總是盡全力地幫助我想辦法解決或提供改善的意見，使我能順利度過難關。也感謝正彬學長、韋達學長、呈暉學長、天昱學長和孟秋學姊教導我許多研究的寶貴經驗，並提供我很棒的想法去嘗試，在生活上也非常照顧我，謝謝你們。

感謝家圻、志昌和啟元這兩年大家一起修課、做實驗、互相討論問題、互相幫忙，一起奮鬥的生活真令人難忘。感謝學弟耀德、融臻和國豪的幫忙，你們的加入使生活更加精采。

感謝爺爺、爸爸、媽媽和弟弟的支持，使我能專心在學業上努力、充滿動力去完成碩士學業。

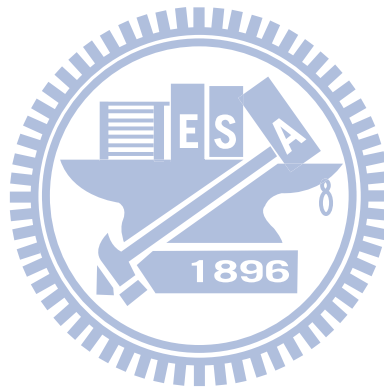
謝謝曾經幫助過我的每一個人，讓我能順利地完成碩士學業。

中平

目錄

摘要	i
ABSTRACT	ii
致謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vi
第一章 緒論	1
1-1 實驗動機與目的	1
1-2 液態晶體簡介	3
1-3 雙頻液晶特性簡介	4
第二章 基本原理	5
2-1 加電壓之穿透率	5
2-2 兆赫波量測系統介紹	7
2-3 兆赫波段下的折射率分析	10
2-4 相位延遲(Phase shift)	13
2-5 反應時間	15
2-6 反應時間的量測方法	18
第三章 樣品製作	19
3-1 液晶樣品的製作	19
3-2 清洗玻璃	19
3-3 鍍配向膜	20
3-3-1 鍍水平配向膜	20
3-3-2 鍍垂直配向膜	21
3-4 磨刷配向膜	21
3-5 切割間隙物(Spacer)	22
3-6 封裝液晶樣品盒	22
第四章 實驗結果與分析	23
4-1 調變頻率之加電壓量穿透率求 K_i	24
4-2 兆赫波段下雙頻液晶的折射率 n_e 、 n_o	28
4-3 相位延遲實驗結果	32
4-3-1 雙頻液晶(MLC-2048)的相位延遲	34
4-3-2 正型液晶(E7)的相位延遲	36
4-3-3 正型液晶(MDA-00-3461)的相位延遲	37
4-4 反應時間實驗結果	38
4-4-1 三種液晶反應時間的結果與比較	40
4-4-2 不同的表面配向膜對反應時間的影響	45

4-4-3 改變操作頻率對反應時間的影響	49
4-4-4 反應時間量測的結果和理論之比較	53
第五章 結論與未來展望	55
5-1 結論	55
5-2 未來展望	56
參考文獻	57



表目錄

表 4.1 三種液晶的基本參數	23
表 4-3 MLC-2048、E7 和 MDA-00-3461 三種液晶的 n_e 、 n_o 和 Δn	32

圖目錄

圖 1-2.1 液晶的種類 (a)向列型液晶 (b)層狀液晶 (c)膽固醇型液晶	60
圖 2-1 座標轉換示意圖	61
圖 2-2.1 THz-TDS 系統架設圖	62
圖 2-2.2 天線示意圖	62
圖 2-2.3 (a)兆赫波時域訊號 (b)兆赫波頻譜圖	63
圖 2-3 (a)兆赫波通過液晶樣品的示意圖 (b)兆赫波通過參考樣品的示意圖	64
圖 2-4 兆赫波傳播方向示意圖	64
圖 2-5 反應時間推導樣品示意圖	65
圖 2-6 量測反應時間方法示意圖	65
圖 4-1.1 加電壓量穿透率實驗裝置圖	66
圖 4-1.2 (a)具有 ITO 圖形的玻璃	66
(b)兩片經過相同步驟處理過的 ITO 玻璃夾成反平行液晶盒的示意圖	66
圖 4-1.3 (a)水平配向頻率操作在 1kHz，光強度和外加電壓的關係圖	67
(b)水平配向頻率操作在 1kHz，相位和外加電壓的關係圖	67
(c)水平配向頻率操作在 10kHz，為光強度和外加電壓的關係圖	67
(d)水平配向頻率操作在 10kHz，相位和外加電壓的關係圖	67
圖 4-1.4 (a)垂直配向頻率操作在 100kHz，光強度和外加電壓的關係圖	67
(b)垂直配向頻率操作在 100kHz，相位和外加電壓的關係圖	67
圖 4-1.5 (a) 水平配向的樣品臨界電壓對不同外加頻率的關係圖	68
(b) 垂直配向的樣品臨界電壓對不同外加頻率的關係圖	68
圖 4-1.6 介電異方性和外加電壓頻率的關係圖	69
圖 4-2.1 (a)厚石英玻璃相位和頻率的關係圖	70
(b)厚石英玻璃折射率實部和頻率的關係圖	70
(c)厚石英玻璃折射率虛部(κ)和頻率的關係圖	70
圖 4-2.2 (a)參考樣品折射率實部和頻率的關係圖	71
(b)參考樣品折射率虛部和頻率的關係圖	71
圖 4-2.3 折射率樣品示意圖	72
圖 4-2.4 製作好的樣品在正交偏振片下所看到的亮暗態	72

圖 4-2.5 (a)非尋常光(Extraordinary Ray, e-ray)折射率實部和頻率的關係圖	73
(b)非尋常光折射率虛部(κ_e)和頻率的關係圖	73
圖 4-2.6 (a)尋常光(Ordinary Ray, o-ray)折射率實部和頻率的關係圖	74
(b)尋常光折射率虛部(κ_o)和頻率的關係圖	74
圖 4-3.1 垂直配向相位延遲器結構示意圖	75
圖 4-3.2 MLC-2048、E7 和 MDA-00-3461 的 conosopic patterns	75
圖 4-3-1 (a)雙頻液晶(MLC-2048)相位延遲器在不同外加電壓下量測到的兆赫波時域訊號	76
圖 4-3-1 (b)雙頻液晶在不同外加電壓下的相位延遲關係圖	76
圖 4-3-2 E7 在不同外加電壓下的相位延遲關係圖	77
圖 4-3-3 MDA-00-3461 在不同外加電壓下的相位延遲關係圖	77
圖 4-4-1.1 雙頻液晶在垂直配向下的驅動操作示意圖	78
圖 4-4-1.2 (a)雙頻液晶 turn on 階段利用 $0V_{rms} \sim 1kHz$ $100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	79
圖 4-4-1.2 (b)雙頻液晶 turn on 階段利用 $100kHz$ $100V_{rms} \sim 1kHz$ $100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	79
圖 4-4-1.3 (a)雙頻液晶 turn back 階段利用 $1kHz$ $100V_{rms} \sim 100kHz$ $100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	80
圖 4-4-1.3 (b)雙頻液晶 turn back 階段利用 $1kHz$ $100V_{rms} \sim 0V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	80
圖 4-4-1.4 垂直配向雙頻液晶 MLC-2048 反應時間比較圖	81
圖 4-4-1.5 E7 樣品兆赫波訊號強度和時間之關係圖	81
圖 4-4-1.6 MDA-00-3461 樣品兆赫波訊號強度和時間之關係圖	82
圖 4-4-1.7 三種液晶 turn on 反應時間的比較	82
圖 4-4-1.8 三種液晶 turn back 反應時間的比較	83
圖 4-4-2.1 水平配向相位延遲器結構示意圖	84
圖 4-4-2.2 雙頻液晶在水平配向下的驅動操作示意圖	84
圖 4-4-2.3 (a)雙頻液晶 turn on 階段利用 $0V_{rms} \sim 100kHz$ $100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	85
圖 4-4-2.3 (b)雙頻液晶 turn on 階段利用 $1kHz$ $100V_{rms} \sim 100kHz$ $100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	85
圖 4-4-2.4 (a)雙頻液晶 turn back 階段利用 $100kHz$ $100V_{rms} \sim 1kHz$ $100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	86
圖 4-4-2.4 (b)雙頻液晶 turn back 階段利用 $100kHz$ $100V_{rms} \sim 0V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	86
圖 4-4-2.5 水平配向雙頻液晶 MLC-2048 反應時間比較圖	87
圖 4-4-2.6 把水平配向($0V_{rms} \sim 100kHz$ $100V_{rms}$)和垂直配向($100kHz$ $100V_{rms} \sim 1kHz$ $100V_{rms}$)較快的操作方式拿來和 E7、MDA-00-3461 比較 turn on 反應時間	87

圖 4-4-2.7 把水平配向($100\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 1\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$)和垂直配向($1\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$)較快的操作方式拿來和 E7、MDA-00-3461 比較 turn back 反應時間	88
圖 4-4-3.1 (a)垂直配向雙頻液晶 turn on 階段利用 $0V_{\text{rms}} \sim 500\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	88
圖 4-4-3.1 (b)垂直配向雙頻液晶 turn on 階段利用 $100\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 500\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	89
圖 4-4-3.2 (a)垂直配向雙頻液晶 turn back 階段利用 $500\text{Hz } 100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	89
圖 4-4-3.2 (b)垂直配向雙頻液晶 turn back 階段利用 $500\text{Hz } 100V_{\text{rms}} \sim 0V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	90
圖 4-4-3.3 垂直配向 500Hz 下雙頻液晶 MLC-2048 反應時間比較圖	90
圖 4-4-3.4 水平配向雙頻液晶 turn on 階段利用 $500\text{Hz } 100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	91
圖 4-4-3.5 水平配向雙頻液晶 turn back 階段利用 $100\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 500\text{Hz } 100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖	91
圖 4-4-3.6 為水平配向雙頻液晶 MLC-2048 相位延遲器反應時間比較圖	92
圖 4-4-4.1 turn on 反應時間理論和實驗比較圖	93
圖 4-4-4.2 turn back 反應時間理論和實驗比較圖	93
圖 5-1.1 各種狀態下的總反應時間比較圖	94



第一章 緒論

1-1 實驗動機與目的

液態晶體(Liquid Crystal, LC)，是介於固態和液態之間的一種狀態，具有晶體規則排列性與液體的流動性。

西元 1888 年，奧地利的植物學家 Friedrich Reintzer 發現膽固醇苯酯 (Cholesteryl Benzoate, $C_6H_5CO_2C_{27}H_{45}$) 在 $145.5^{\circ}C$ 時為固體，當溫度逐漸上升此物質會轉變為白色的混濁液體，溫度升到 $178.5^{\circ}C$ 後，才轉變為透明、清澈的液體，當溫度稍微冷卻，又會變成白色的混濁液體。這就是液態晶體，簡稱「液晶」。

西元 1889 年，德國的物理學家 O. Lehmann 以具有加熱功能的偏光顯微鏡探討升降溫度過程對膽固醇苯酯的影響，並發現膽固醇苯酯具有異方性(anisotropy)，特有的雙折射性質(birefringence)結合 1970 年後在液晶研究上的快速發展，利用液晶材料的產品陸續出現在市場上。為了使液晶產品達到更好的效能，許多相關的研究不斷地在進行。

在過去由於一直缺乏適當的光源及偵測器，導致兆赫波(Terahertz wave, THz wave)的研究無法快速發展，在電磁波頻譜的研究中便留下了一個兆赫波波段的斷層，這樣的現象被稱之為“兆赫波鴻溝(terahertz gap)”。兆赫波段的相關研究之所以重要，在於兆赫波段中包含了大多數分子的轉動及振動能階，因此在影像技術[1]、遙測、生物、醫學[2]應用

上非常具有潛力，如：影像技術可應用在機場海關和港口的保安檢查上；生物醫學上可利用兆赫波非游離性、低能量及敏銳穿透的特性，長時間觀察或研究癌症細胞、蛋白質結構……等，不破壞待測體的本質。且隨著高速資訊時代的到來，各種元件的操作頻率也相對的提高，使得在兆赫波段下適用的元件開發更顯重要。

兆赫波技術尚未成熟時，在液晶的光學特性研究及應用上，主要都以可見光波段與遠紅外光波段為主。但隨著飛秒級的超短脈衝雷射成功研發，兆赫波技術迅速發展，適用於此波段的光學元件必定和可見光波段與遠紅外光波段不同，為了研發兆赫波的光學元件，如：相位延遲器 (phase shifter)、偏振器 (polarizer)……等，我們希望能利用液晶的特性製作出上述元件，將液晶光學性質研究延伸到兆赫波段。

本實驗室已成功製作出兆赫波段下液晶相位延遲器[3]，但由於液晶層厚度在此元件中相當厚，使得此元件的反應時間不夠快，只能適用於不需時常調變的情況下，無法符合現實使用的需求，而且也損失我們使用液晶來製作元件的主要目的，因為使用液晶就是希望能利用它受外場快速調變的特性，本論文主要就是希望能承接[3]製作的結構，來改善元件的反應時間。

1-2 液態晶體簡介

液晶可分成：(1)向列型液晶(Nematic Liquid Crystal, N)，(2)層狀液晶(Smectic Liquid Crystal, S)，(3)膽固醇型液晶(Cholesteric Liquid Crystal, N^{*})。

向列型液晶因在顯微鏡下看起來有如絲線一般，故又稱絲狀液晶，此液晶分子為長型或圓盤狀，質心位置排列無秩序性，但方向矢(director)有一個平均的方向性，如圖 1-2.1 (a)。本實驗是使用此型的液晶。

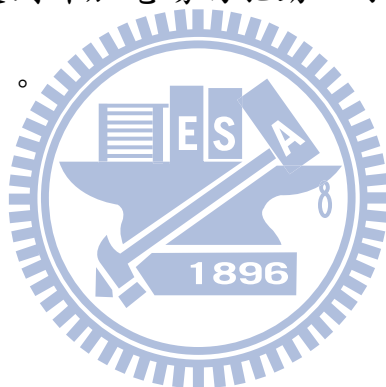
層狀液晶又稱皂狀液晶，如圖 1-2.1 (b)，因其結構如同肥皂溶液般具有層狀結構而稱之，是三種液晶分類中最有規則性的，其單層分子質心位置無秩序性，但是同層分子的方向矢有一個平均的方向性。

膽固醇型液晶，如圖 1-2.1 (c)，因此類液晶為膽固醇的衍生物而命名；此液晶分子排列局部來看和向列型液晶相似，但其方向矢會隨空間某一方向變化，即方向矢的方向會如螺紋般旋轉。

液晶分子不只具有雙折射性，同時也具有介電常數與磁化率之異方性，故可透過外加電場或磁場來改變液晶分子的排列方向，分子會往能量較小的方式排列；本實驗即是使用外加電場的方式使液晶分子轉向。

1-3 雙頻液晶特性簡介

雙頻液晶的特性指此液晶的介電異方性(dielectric anisotropy, $\Delta\epsilon$)是頻率的函數，會隨頻率的改變而變化，因此切換機制就是利用兩種不同頻率間的切換使 $\Delta\epsilon$ 切換正負，高頻時為負型液晶，低頻時為正型液晶。正型液晶代表當外加電場時液晶分子會平行於電場方向排列，負型液晶代表當外加電場時液晶分子會垂直於電場方向排列。雙頻液晶利用改變不同頻率就可以使液晶分子轉動，而不需要用以往改變電壓的方式，這個方法使液晶分子一直受到外加電場的驅動，可以改善以往關掉電壓讓液晶自然回復的反應時間。



第二章 基本原理

2-1 加電壓之穿透率

在液晶的研究上我們常用 Jones Matrix 來推導通過液晶樣品的穿透光強度與旋轉角度及相位延遲間的關係式。

假設起偏器(Polarizer)的偏振方向為 XY 座標系的 X 軸，而液晶分子長軸與起偏器的偏振方向夾了一個角度 θ ，如圖 2-1，我們在液晶長軸和短軸方向上定義一個新座標系 X'Y'。

電場的偏振狀態可以用 Jones Vector 來表示，當光通過起偏器後電場的偏振狀態為：


$$E_{\text{polarizer}} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_{XY} \quad (2-1-1)$$

接著當光通過液晶樣品時會分成兩個分量，分別為入射光在長軸上的分量及入射光在短軸上的分量，所以我們將電場分量由 XY 座標系轉換到 X'Y' 座標系，旋轉矩陣型式 R：

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2-1-2)$$

$E_{\text{polarizer}}$ 經過旋轉後可得：

$$E'_{\text{polarizer}} = R E_{\text{polarizer}} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix}_{X'Y'} \quad (2-1-3)$$

電場分量在通過液晶的相位延遲後為：

$$E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} e^{in_{//}kd} & 0 \\ 0 & e^{in_{\perp}kd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} e^{in_{//}kd} \cos \theta \\ -e^{in_{\perp}kd} \sin \theta \end{pmatrix}_{X'Y'} \quad (2-1-4)$$

再將 E'_{LC} 由 $X'Y'$ 座標系轉換回 XY 座標系：

$$E_{LC} = R^{-1} E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{in_{//}kd} \cos \theta \\ -e^{in_{\perp}kd} \sin \theta \end{pmatrix}$$

$$= E_0 \begin{pmatrix} e^{in_{//}kd} \cos^2 \theta + e^{in_{\perp}kd} \sin^2 \theta \\ e^{in_{//}kd} \cos \theta \sin \theta - e^{in_{\perp}kd} \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix}_{XY} \quad (2-1-5)$$

接著通過檢偏器 (Analyzer) 的電場分量為：

$$E_{Analyzer} = E_0 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{in_{//}kd} \cos^2 \theta + e^{in_{\perp}kd} \sin^2 \theta \\ e^{in_{//}kd} \sin \theta \cos \theta - e^{in_{\perp}kd} \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$= E_0 \begin{pmatrix} 0 \\ e^{in_{//}kd} \sin \theta \cos \theta - e^{in_{\perp}kd} \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix}_{XY} \quad (2-1-6)$$

代表最後只剩下 Y 分量的電場到達光偵測器 (Photodetector)：

$$\vec{E}_{Analyzer} = E_0 e^{in_{//}kd} \sin \theta \cos \theta - e^{in_{\perp}kd} \sin \theta \cos \theta \hat{y}$$

$$= E_0 e^{i\bar{n}kd} \sin \theta \cos \theta (e^{i\frac{\Delta n}{2}kd} - e^{-i\frac{\Delta n}{2}kd}) \hat{y}$$

$$= E_0 e^{i\bar{n}kd} \sin \theta \cos \theta (2i \sin \frac{\Delta n kd}{2}) \hat{y} \quad (2-1-7)$$

$$\text{其中 } \bar{n} = \frac{n_{//} + n_{\perp}}{2}$$

$$\Delta n = n_{//} - n_{\perp}$$

因此由光偵測器所偵測到的光強度為：

$$I = |\vec{E}_{Analyzer}|^2 = I_0 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (2-1-8)$$

其中 $\Delta\Phi = \Delta n kd$ 為光電場的相位延遲。

因此在我的加電壓量穿透率實驗中，是藉由改變上式中的 $\Delta\Phi$ 來觀察穿透液晶樣品後的光強度變化。

2-2 兆赫波量測系統介紹

兆赫(terahertz)波段，指的是頻率在 10^{12} Hz 附近的電磁頻譜，它包含了部分毫米波段(~ 0.1 THz)到遠紅外區(~ 25 THz)的一段電磁頻譜。(1THz = 10^{12} Hz, $\lambda = 0.3$ mm)

本實驗所使用的兆赫波量測系統為兆赫波時域頻譜儀 (THz-TDS)[4]，系統架設圖 2-2.1。系統使用砷化鎵光導天線作為兆赫波激發器及偵測器，砷化鎵光導天線的結構為在矽基板上低溫成長一層砷化鎵(LT-GaAs)，並在上面製作由 Ni/Ge/Au 合金的導線，如圖 2-2.2。天線產生兆赫波脈衝的方式為利用增益介質為鈦藍寶石、重複率 90MHz、波長約 820nm 的飛秒脈衝雷射來激發砷化鎵中的載子從價帶跳到導帶 [5][6]。再透過外加 1kHz、5V_{pp} 方波偏壓使載子加速輻射出電磁波，由馬克斯威爾方程式可知電流隨著時間變化時，會輻射出電磁波，此電磁波即為兆赫波。

偵測天線結構和激發天線完全相同，也需要超快雷射去激發載子，唯一不同的地方就是它不需要外加偏壓，當激發天線產生的兆赫波打入偵測天線時會提供順變電場，此電場會驅動載子在天線間隙中流動，可以藉由鎖相放大器收集電流訊號，電流訊號的大小和兆赫波的電場大小有關。若要完整得到兆赫波脈衝時域的圖形，可藉由延遲激發光的光程來得到完整的時域訊號。量測得到的兆赫波訊號的值是相對的，值的正

負代表電場的方向。

將波長約 820nm 的雷射光導入我們的兆赫波時域頻譜儀中，利用分光鏡(Beam Splitter)將導入的雷射光分成兩道：一道以功率 35mW 垂直射入激發天線，另一道以功率 30mW 垂直射入偵測天線。在雷射光射入天線前放置一個無色散的聚焦透鏡使雷射光能準確打在天線中間的間隙上。在天線的後面貼了矽半球，主要功能為增加激發出來兆赫波的收集率。接著兆赫波入射拋物面鏡，我們製作的待測樣品放置於兩拋物面鏡中訊號最大處來進行量測。為了使兆赫波能完全從樣品中通過，會在樣品靠近入射兆赫波那面放置光圈，可隨著樣品的大小來調整光圈的大小。本實驗系統所產生的兆赫波偏振方向為水平方向（平行光學桌），若以圖 2-2.2 天線擺放的方向來說，激發出的兆赫波偏振方向為左右方向，因此偵測天線必須配合激發天線的方向才能偵測到訊號。

我們可以透過延遲激發光的光程來得到完整的兆赫波脈衝時域訊號。剛開始雷射光經分光鏡分別射入激發天線及偵測天線的光程是相同的，此時令 $t=0$ 且偵測器測得的兆赫波電場強度是 $t=0$ 時的強度，當我們改變步進馬達的位置時，激發光的光程就跟著改變，激發光延遲了 t' 秒，此時測得的是經過 t' 秒的兆赫波電場強度。利用移動步進馬達改變光程的方法就可以將兆赫波脈衝的時域訊號記錄下來。

我們利用 THz-TDS 量測兆赫波訊號時，在沒有經過氮氣除濕過的

THz 主訊號後面會有波動的现象，如圖 2-2.3 (a)中黑線為相對濕度約 50% 的 THz 訊號，會有此波動现象是因為有水氣吸收所造成的；而有經過氮氣除濕過的 THz 訊號就平滑許多，如圖 2-2.3 (a)中紅線為相對濕度約 3% 的 THz 訊號。因此實驗時會用自製罩子把整個系統罩住，並充入氮氣以排除 THz-TDS 系統內的水氣。藉由快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)分析得到圖 2-2.3 (b)中兩個訊號的頻譜圖，可以發現在 1.5THz 以下幾個明顯的水氣吸收線和文獻[7]一致，顯示出我們的 THz-TDS 系統解析能力是很好的，訊噪比約為 $10^6:1$ 。



2-3 兆赫波段下的折射率分析

本小節之推導方法為參考[8]、[9]。

我們假設兆赫波訊號是平面波且垂直入射液晶樣品，可以將穿透過液晶樣品的兆赫波的電場部分寫成下面的形式：

$$E_{LC}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(f) \tilde{t}_{AW} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_W d_{W1}}{c}\right)} \tilde{t}_{WS} FP_{LC}(f, d_S) e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S}{c}\right)} \tilde{t}_{SW} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_W d_{W2}}{c}\right)} \tilde{t}_{WA} e^{-i2\pi f t} df \quad (2-3-1)$$

如圖 2-3 (a)，其中 $E_0(f)$ 是入射兆赫波的電場， d_{W1} 和 d_{W2} 分別為液晶樣品兩片玻璃基板的厚度， d_S 是液晶層的厚度， $\tilde{n}_A = n_A + i\kappa_A$ ， $\tilde{n}_W = n_W + i\kappa_W$

和 $\tilde{n}_S = n_S + i\kappa_S$ 是空氣、玻璃和液晶的複折射率， $\tilde{t}_{AW} = \frac{2 \times \tilde{n}_A}{\tilde{n}_A + \tilde{n}_W}$ ，

$\tilde{t}_{WS} = \frac{2 \times \tilde{n}_W}{\tilde{n}_W + \tilde{n}_S}$ ， $\tilde{t}_{SW} = \frac{2 \times \tilde{n}_S}{\tilde{n}_S + \tilde{n}_W}$ ， $\tilde{t}_{WA} = \frac{2 \times \tilde{n}_W}{\tilde{n}_W + \tilde{n}_A}$ ，分別代表空氣對玻璃界面、

玻璃對液晶界面、液晶對玻璃界面、玻璃對空氣界面的菲涅耳複穿透係數(Fresnel Transmission Coefficient)， $FP_{LC}(f, d_S)$ 是考慮在液晶和玻璃的

界面會有 Fabry-Perot 多次反射項，如下：

$$\sum_{m=0}^N \left[\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S \times 2m}{c}\right)} \right] \quad (2-3-2)$$

其中 $\tilde{r}_{SW} = \frac{\tilde{n}_S - \tilde{n}_W}{\tilde{n}_S + \tilde{n}_W}$

我們也可以將穿透過參考樣品的兆赫波的電場部分寫成下面的形式：

$$E_{ref}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(f) \tilde{t}_{AW} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_W d_{W3}}{c}\right)} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_W d_{W4}}{c}\right)} \tilde{t}_{WA} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_A (d_S + \Delta d)}{c}\right)} e^{-i2\pi f t} df \quad (2-3-3)$$

如圖 2-3 (b)，其中 d_{w3} 和 d_{w4} 分別為參考樣品兩片玻璃基板的厚度。

為了比較 $E_{LC}(t)$ 和 $E_{ref}(t)$ ，我們假設兆赫波通過液晶樣品或參考樣品的總厚度相同：

$$\begin{aligned} d_w + d_s &= d'_w + d_s + \Delta d \\ \Delta d &= d_w - d'_w \end{aligned} \quad (2-3-4)$$

其中 $d_w = d_{w1} + d_{w2}$ ， $d'_w = d_{w3} + d_{w4}$ ， Δd 為液晶樣品兩片玻璃基板厚度和參考樣品兩片玻璃基板厚度的差值。

將(2-3-1)式除以(2-3-3)式，可以得到下面的式子：

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{T_{LC}}{T_{ref}}} e^{i(\phi_{LC} - \phi_{ref})} &= \frac{E_{LC}(t)}{E_{ref}(t)} \\ &= \tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} FP_{LC}(f, d_s) e^{i \frac{2\pi f}{c} (\tilde{n}_w(d_{w1} + d_{w2}) + \tilde{n}_s d_s - \tilde{n}_w(d_{w3} + d_{w4}) - \tilde{n}_A(d_s + \Delta d))} \\ &= \tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} FP_{LC}(f, d_s) e^{i \frac{2\pi f}{c} (\tilde{n}_w d_w + \tilde{n}_s d_s - \tilde{n}_w d'_w - \tilde{n}_A(d_s + \Delta d))} \\ &= \tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} FP_{LC}(f, d_s) e^{i \frac{2\pi f}{c} (\tilde{n}_w \Delta d + \tilde{n}_s d_s - \tilde{n}_A d_s - \tilde{n}_A \Delta d)} \\ &= \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} FP_{LC}(f, d_s) e^{\frac{-2\pi f}{c} [(\kappa_s - \kappa_A)d_s + (\kappa_w - \kappa_A)\Delta d]} \right] \times e^{i \frac{2\pi f}{c} [(n_s - n_A)d_s + (n_w - n_A)\Delta d]} \end{aligned} \quad (2-3-5)$$

其中 $\phi_{LC} - \phi_{ref}$ 代表代表電場通過液晶樣品與電場通過參考樣品的相位差。

若將(2-3-5)式左右兩邊取自然對數並整理，可得：

$$\ln \sqrt{\frac{T_{LC}}{T_{ref}}} = \operatorname{Re} \left\{ \ln \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left[\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i 2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_s d_s}{c} \times 2m \right)} \right] \right] \right\} - \frac{2\pi f}{c} [(\kappa_s - \kappa_A)d_s + (\kappa_w - \kappa_A)\Delta d] \quad (2-3-6)$$

$$\phi_{LC} - \phi_{ref} = \operatorname{Im} \left\{ \ln \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left[\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i 2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_s d_s}{c} \times 2m \right)} \right] \right] \right\} + \frac{2\pi f}{c} [(n_s - n_A)d_s + (n_w - n_A)\Delta d] \quad (2-3-7)$$

將(2-3-6)和(2-3-7)整理可得：

$$n_s = \frac{1}{2\pi f \frac{d_s}{c}} \left[(\phi_{LC}) - \arg \left(\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left[\tilde{r}_{SW} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_s d_s}{c} \right)} \right]^{2m} \right) \right] + n_A - \frac{(n_W - n_A) \Delta d}{d_s} \quad (2-3-8)$$

$$\kappa_s = \frac{1}{-2\pi f \frac{d_s}{c}} \ln \left[\frac{\sqrt{T_{LC}}}{\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left[\tilde{r}_{SW} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_s d_s}{c} \right)} \right]^{2m}} \right] + \kappa_A + \frac{(\kappa_W - \kappa_A) \Delta d}{d_s} \quad (2-3-9)$$

實驗中我們假設空氣的複折射率 $\tilde{n}_A = 1$ ，從(2-3-9)和(2-3-10)式可以得到 2 個方程式及 2 個未知數 n_s 、 κ_s ，但每個方程式裡面又有 n_s 、 κ_s 這兩個未知數，所以必須藉由疊代的方法逼近精確的 n_s 、 κ_s 。



2-4 相位延遲(Phase shift)

當入射向列型液晶分子的光偏振方向和液晶分子長軸垂直時， $n = n_o$ ；當入射向列型液晶分子的光偏振方向和液晶分子長軸平行時， $n = n_e$ ；當入射向列型液晶分子的光傳播方向和液晶分子長軸夾了一個角度 θ 時，

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

當一極化的電磁波通過向列型液晶樣品後，會產生相位延遲 δ

$$\delta = \Delta n k d = (n_{eff} - n_o) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \quad (2-4-2)$$

其中 λ 為電磁波波長、 d 為液晶層厚度

當液晶的方向矢偏轉時，對應之等效折射率 n_{eff} 就會跟著改變，所以可以利用外加電場或磁場的方式使液晶分子偏轉，達到不同相位的效果。

外加電場使液晶分子偏轉，必須施加大於臨界電場才能使液晶開始偏轉，稱為 Fréedericksz transition。

臨界電壓公式：

$$V_{th} = \pi \left(\frac{L}{d} \right) \sqrt{\frac{K_i}{\epsilon_0 |\Delta \epsilon|}} \quad (2-4-3)$$

其中 L 為兩電極間距、 d 為液晶層厚度、 K_i 為彈性常數、

$\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ ，為介電異方性

ϵ_0 為真空中的介電常數

根據文獻[3]可以推得不同外加電壓下的相位延遲，推導如下：

$$\delta(V) = \int_0^d \frac{2\pi f}{c} \Delta n_{eff}(V, z) dz \quad (2-4-4)$$

其中 $\Delta n_{eff}(V, z)$ 會隨著所在位置 z 的不同而有所改變， z 的方向為沿著 THz 傳播方向，如圖 2-4。等效折射率可以寫成：

$$\Delta n_{eff} = \left(\frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} \right)^{1/2} - n_o \quad (2-4-5)$$

其中 θ 是偏轉後和原始狀態之夾角。

當 $V > V_{th}$ 時，每個位置 z 所對應的偏轉角度 θ ，可以從下列式中得到[10]：

$$\frac{z}{d} = \frac{V_{th}}{\pi V} \int_0^{\theta} \left(\frac{1 + q \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta} \right)^{1/2} d\theta \quad (2-4-6)$$

其中 $q = \frac{K_1 - K_3}{K_3}$ ， θ_m 是在液晶層中間 $z = d/2$ 處液晶分子最大的偏轉

量，會和 V/V_{th} 有以下的關係：

$$\frac{V}{V_{th}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\theta_m} \left(\frac{1 + q \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta} \right)^{1/2} d\theta \quad (2-4-7)$$

由上述關係是求出(2-4-4)式中的 $\delta(V)$ 。

2-5 反應時間

根據文獻[11]的推導可得垂直配向樣品的反應時間，樣品結構示意圖如圖 2-5 所示，由 Erickson-Leslie equation 對液晶方向矢動力學的描述如下：

$$(K_1 \sin^2 \theta + K_3 \cos^2 \theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} + (K_3 - K_1) \times \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)^2 + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta = -\gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2-5-1)$$

假設 $K_1 \sim K_3$ (single elastic constant approximation)、 θ 很小，則 $\sin \theta \sim \theta$ (small angle approximation)

$$K_3 \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \theta = -\gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2-5-2)$$

$$\text{可解出 } \theta(z,t) = [\theta_s \sin(\beta z) + \theta_m \cos(\beta z)] \cdot \exp(-t/\tau) \quad (2-5-3)$$

假設上下玻璃基板配向條件相同： $\theta_s = 0$

θ_m 為在液晶層中間處的傾角 ($\theta_{z=0} = \theta_m$)

所以

$$\theta(z,t) = \theta_m \cos(\beta z) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (2-5-4)$$

當 anchoring energy 很強且在玻璃表面的預傾角為零時：

$$\text{邊界條件 } \theta_{z=\frac{d}{2}} = \theta_p = 0$$

$$\Rightarrow \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 - K_3 \beta^2 = \frac{\gamma_1}{\tau} \quad (2-5-5)$$

又因為液晶分子在無外加電場作用下自然回復反應時間的條件為 $E=0$

$$\Rightarrow \tau_{off} = \left| \frac{-\gamma_1}{K_3 \beta^2} \right| = \frac{\gamma_1}{K_3 \beta^2}$$

$$\tau_{on} = \frac{\gamma_1}{|\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| E^2 - \beta^2 K_3|}$$
(2-5-6)

由邊界條件 $\theta_p = 0 = \theta_m \cos(\beta \cdot \frac{d}{2})$

$$\Rightarrow \beta \cdot \frac{d}{2} = \pm \frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow \beta = \pm \frac{\pi}{d}$$

取正： $\beta = \frac{\pi}{d}$ 代回 τ_{off} 、 τ_{on}

$$\Rightarrow \tau_{off} = \frac{\gamma_1 d^2}{K_3 \pi^2}$$

$$\tau_{on} = \frac{\gamma_1}{|\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| E^2 - \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 K_3|}$$

$$= \frac{\tau_{off} K_3 \pi^2}{d^2}$$

$$= \frac{\tau_{off}}{|\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| E^2 - \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 K_3|}$$

$$= \frac{\tau_{off}}{\left| \frac{\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| E^2 d^2}{K_3 \pi^2} - 1 \right|}$$

$$= \frac{\tau_{off}}{\left| \frac{V^2}{\pi^2 K_3} - 1 \right|}$$

$$= \frac{\tau_{off}}{\left| \left(\frac{V}{V_{th}}\right)^2 - 1 \right|}$$

(2-5-7)

其中 $V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_3}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon|}}$

臨界電壓公式： $V_{th} = \pi \left(\frac{L}{d}\right) \sqrt{\frac{K_i}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon|}}$

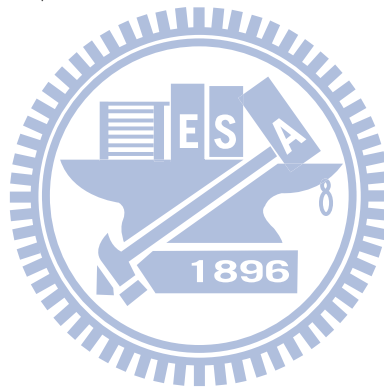
其中 L 為兩電極間距

d 為液晶層厚度

K_i 為彈性常數

$\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$ ，為介電異方性

ϵ_0 為真空中的介電常數



2-6 反應時間的量測方法

反應時間的量測方法以實驗量測出的 THz 時域訊號來說明，圖 2-6 是我在外加電壓分別為 $0V_{\text{rms}}$ 和 $1\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$ 下所量測的結果，我們可以發現隨著電壓的增加，液晶分子會從原本的 n_o 狀態慢慢轉向成為 n_e 狀態，因此 THz 主訊號會向右偏移，藉由以上的變化特性，我們可以先把步進馬達的位置移動到 $0V_{\text{rms}}$ 時 THz 主訊號的尖端處(peak)，當我們從 $0V_{\text{rms}}$ 切換至 $1\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$ 的同時也一邊記錄 THz 的主訊號強度隨時間的變化曲線。當 THz 的主訊號強度不再隨時間而變化時，代表液晶分子已經轉向到該外加電壓所應對應之折射率大小，則停止計時。

在分析 THz 的主訊號強度隨時間的變化曲線時，我們定義 THz 的主訊號強度開始急遽變化到訊號強度為 36.8% 的這段時間為反應時間。

第三章 樣品製作

3-1 液晶樣品的製作

本實驗的樣品所使用的玻璃基板有兩種，一種是 ITO(Indium Tin Oxide)玻璃，此玻璃基板的其中一面鍍有 ITO 導電膜；另一種是石英玻璃(Fused silica)，石英玻璃在兆赫波段下的穿透率較 ITO 玻璃高，所以在兆赫波段下進行量測的樣品本實驗室都會使用石英玻璃。

本實驗因為是使用雙頻液晶，在使用上可以調整頻率來達到所需的排列狀態，因此在製作樣品時水平配向和垂直配向都會用到，使用磨刷配向法[12][13]和化學配向在玻璃基板表面產生配向膜。



3-2 清洗玻璃

- 1.將切割好大小的玻璃先用吹球將玻璃表面的微小灰塵吹乾淨，再用沾有酒精的無塵紙擦拭。
- 2.用清水將玻璃表面沖洗乾淨後放入燒杯內，加入中性玻璃清潔劑，加水使液面蓋過玻璃，再將燒杯放入超音波振盪器中振盪清洗 10 分鐘。
- 3.使用清水將玻璃表面的清潔劑沖洗乾淨後，用氮氣將玻璃表面吹乾，將玻璃放置到另一個乾燥的燒杯內，加入丙酮(Acetone)使丙酮液面蓋過玻璃，再將燒杯放入超音波振盪器中振盪清洗 10 分鐘。振盪結束後將丙酮回收以免污染。
- 4.使用丙酮將玻璃表面沖洗乾淨後，用氮氣將玻璃表面吹乾，將玻璃放置

到另一個乾燥的燒杯內，加入甲醇(Methanol)使甲醇液面蓋過玻璃，再將燒杯放入超音波振盪器中振盪清洗 10 分鐘。振盪結束後將甲醇回收以免污染。

5.使用甲醇將玻璃表面沖洗乾淨後，用氮氣將玻璃表面吹乾，將玻璃放置到另一個乾燥的燒杯內，加入去離子水(DI Water)到燒杯內，使去離子水液面蓋過玻璃，再將燒杯放入超音波振盪器中振盪清洗 10 分鐘。

6.使用去離子水將玻璃表面沖洗乾淨，用氮氣吹乾玻璃表面，放入烤箱中烤乾水氣(烤箱溫度設定 100°C，烤乾時間為半小時)，冷卻備用。

(清洗完成的玻璃必須在一天內完成配向劑的塗佈，以免玻璃被污染，配向劑無法附著)



3-3 鍍配向膜

3-3-1 鍍水平配向膜

1.本實驗室使用的水平配向劑是 Nissan SE-130B。使用前先將配向劑從冰箱拿出，待其回復到室溫再開始使用。

2.將清洗乾淨的玻璃放在旋轉塗佈機(Spin-coater)上面，先用吹球將玻璃上方表面的微小灰塵清除乾淨，用微量滴管吸取配向劑數滴均勻滴在玻璃表面上，並設定好旋轉步驟，其條件設定為第一步 2000 rpm(1 sec)、2000 rpm(15 sec)，第二步 4000 rpm(1 sec)、4000 rpm(25 sec)。整個塗佈過程中，濕度控制在 40% R.H.以下。

- 3.將塗佈好配向劑的玻璃放在加熱板上軟烤 80°C，時間為 5 分鐘，目的是使配向劑中的溶劑揮發。
- 4.將軟烤完的玻璃放入已預熱高溫 170°C 的烤箱中，硬烤 1 小時。
- 5.硬烤完成後，將玻璃取出放入培養皿中冷卻備用。

3-3-2 鍍垂直配向膜

1. 本實驗室使用的垂直配向劑是 DMOAP 溶液，配置的 DMOAP (N,N-dimethyl-N-octadecyl-3-aminopropyltrimethoxysilyl chloride) 溶液
體積比：
DMOAP : DI water : 醋酸 = 1 : 96 : 3
- 2.將清洗乾淨的玻璃放入 DMOAP 溶液的燒杯中，用超音波振盪器振 20 分鐘。
- 3.振盪完後，用 DI water 沖洗並用氮氣吹乾。
- 4.放入烤箱烘烤，烘烤溫度 100°C，烘烤 1.5 個小時。
- 5.烘烤完成後，將玻璃取出放入培養皿中冷卻備用。

3-4 磨刷配向膜

- 1.將鍍好配向膜的玻璃基板放在磨刷機的平移台上，先用吹球將玻璃上方表面的微小灰塵清除乾淨。
- 2.設定絨布以 900 rpm 的轉速磨刷玻璃基板，使玻璃表面的配向膜產生配

向效果。

3.為了加強配向效果，對每一個玻璃基板都磨刷了三次。

3-5 切割間隙物(Spacer)

本論文中的不同實驗會需要不同的樣品，所使用到的間隙物有三種：間隙物薄膜(Mylar)、鐵氟龍(Teflon)、銅片。

將切割好的間隙物表面清潔乾淨後放置於培養皿中備用。

3-6 封裝液晶樣品盒

取兩片已經配向磨刷好的玻璃基板，磨刷面朝內以反平行(Anti-parallel)的方式夾合，中間放入切割好的間隙物，將液晶盒三邊以AB膠封合，留下要灌入液晶的缺口。

待AB膠乾了之後，由玻璃基板的缺口灌入液晶，以AB膠封合缺口，製作成AP液晶樣品。

參考樣品則是清洗完玻璃後，不需要表面配向以及夾間隙物，由兩片石英玻璃基板直接緊密黏貼組成。

第四章 實驗結果與分析

本實驗所使用的 MLC-2048 雙頻液晶是默克(Merck)公司所製作的，但是從默克公司提供的液晶基本資料中，並沒有提供 MLC-2048 雙頻液晶之操作頻率及對應之特性，因此除了查文獻上有無實驗室使用過此款液晶的操作方式外，也進行了基本特性量測，如：調變不同頻率的加電壓量穿透率實驗可求出液晶的彈性常數、THz 下液晶的折射率。表 4.1 為三種液晶的基本參數，表中沒有任何標記的數值為默克公司提供。本實驗的環境溫度皆控制在 23°C~26°C。

data sheet : at +20°C , Merck 提供

	Clearing point	$\Delta\epsilon$	K_1	K_3
MLC-2048	106.2°C	1kHz : $\Delta\epsilon = +3.2$	16.52 pN (experiment)	23.15 pN (experiment)
		100kHz : $\Delta\epsilon = -3.4^*$		
E7	61°C	1kHz : $\Delta\epsilon = 13.8$	11.10 pN	17.10 pN
MDA-00-3461	92°C	1kHz : $\Delta\epsilon = 11.2$	12.6 pN	15.4 pN

* 為文獻上查到的數值、experiment 為我們實驗求得

表 4.1 三種液晶的基本參數

4-1 調變頻率之加電壓量穿透率求 K_i

因為雙頻液晶會隨著外加電壓頻率的不同，而有不同的介電異方性 $\Delta\epsilon$ 。 $\Delta\epsilon$ 除了有正負之分外，在正型液晶的範圍還會隨著頻率的不同， $\Delta\epsilon$ 的大小也會跟著不同；負型液晶亦是如此。我們可以從文獻[14][15]大致了解雙頻液晶 MLC-2048 對外加電壓頻率所表現出來的特性。

文獻[14][15]中提到 MLC-2048 雙頻液晶操作方式為：操作頻率在 1kHz 時，介電異向性 $\Delta\epsilon = +3.2$ 為正型液晶；操作頻率在 100kHz 時，介電異方性 $\Delta\epsilon = -3.4$ 為負型液晶，或操作頻率在 50kHz 時，介電異方性 $\Delta\epsilon = -3.1$ 為負型液晶；臨界頻率約 12kHz。

這部份的實驗裝置如圖 4-1.1，準備了兩個樣品來量測，都是利用具有 ITO 的玻璃製作而成的薄樣品，如圖 4-1.2(a)為具有 ITO 圖形的玻璃，中間 1.5cm×1.5cm 是鍍有 ITO 的區域，箭號代表磨刷的方向，圖 4-1.2 (b)是兩片經過相同步驟處理過的 ITO 玻璃夾成反平行液晶盒的示意圖，圖中黃色的部份是間隙物 Mylar 放置位置，中間橙色的部份為主要的量測區域。這兩個樣品不同的地方是一個在 ITO 玻璃上鍍上水平配向膜 (Nissan SE-130B)，利用此樣品來進行雙頻液晶的正型液晶特性量測，此樣品的液晶層厚度為 23.41 μm ，預傾角 (pretilt angle) 為 2.57°；另一個則是在 ITO 玻璃上鍍上垂直配向膜 (DMOAP)，利用此樣品來進行雙頻液晶的負型液晶特性量測，此樣品的液晶層厚度為 31.72 μm ，預傾角為 89.88°。

實驗結果如下：

圖 4-1.3 (a)為水平配向樣品光強度和外加電壓的關係圖，將此圖的數據依照 $I = I_0 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right)$ 換成相位和外加電壓的關係圖，如圖 4-1.3

(b)，利用圖 4-1.3 (b)來分析臨界電壓。

圖 4-1.3 (a)和圖 4-1.3 (c)的差別在(a)為頻率操作在 1kHz，(c)為頻率操作在 10kHz，從圖中可以發現隨著頻率的增加，圖中上下振盪的曲線會跟著往高電壓區移動，由此可知操作頻率增加，臨界電壓也會增加，也就代表 $|\Delta\varepsilon|$ 會降低。

圖 4-1.4 (a)為垂直配向樣品光強度和外加電壓的關係圖，隨著頻率的增加，圖中上下振盪的曲線會跟著往低電壓移動，由此可知操作頻率增加，臨界電壓會降低。圖 4-1.4 (b)為相位和外加電壓的關係圖，用來分析臨界電壓。

水平配向樣品臨界電壓對不同外加頻率的關係整理如圖 4-1.5 (a)，相同顏色的連線代表同一次量測的結果，不同顏色代表不同次量測的結果，從圖中可以發現隨著外加頻率的增加，臨界電壓也會跟著變大，因此雙頻液晶的正型液晶範圍中，最適合的操作頻率為 1kHz，不但臨界電壓低(較容易驅動)，而且實驗的一致性較佳，從圖中可以發現越高頻每次量測的差異越大，所以正型液晶的操作以越低頻越好。

垂直配向樣品臨界電壓對不同外加頻率的關係整理如圖 4-1.5 (b)，相

同顏色的連線代表同一次量測的結果，不同顏色代表不同次量測的結果，從圖中可以發現隨著外加頻率的增加，臨界電壓會變小，因此雙頻液晶的負型液晶範圍中，最適合的操作頻率為 100kHz，因為臨界電壓低(較容易驅動)，而在一致性方面，從圖中可以發現每次量測的差異不大。

藉由加電壓調變不同頻率的穿透率實驗來了解雙頻液晶的特性，除了可以從此實驗得到不同頻率對應不同的臨界電壓外，還可以從實驗得到的臨界電壓反推出雙頻液晶的彈性常數 K_1 、 K_3 。

由臨界電壓的公式：

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_i}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon|}}$$

$$\Rightarrow K_i = \frac{\epsilon_0 |\Delta\epsilon| (V_{th})^2}{\pi^2}$$



此式子中的 $|\Delta\epsilon|$ 是根據[14][15]中的數值代入，操作頻率在 1kHz 時，介電異向性 $\Delta\epsilon = +3.2$ ，可得 $K_1 = 16.52 \text{ pN}$ ；操作頻率在 100kHz 時，介電異方性 $\Delta\epsilon = -3.4$ ，可得 $K_3 = 23.15 \text{ pN}$ 。

由 $V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_i}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon|}} \Rightarrow \Delta\epsilon = \frac{K_i \pi^2}{\epsilon_0 (V_{th})^2}$ 可以把不同頻率下量測到的臨界電

壓關係圖和文獻[16]比較看看趨勢是否相近。圖 4-1.6 為介電異方性和外加電壓頻率的關係圖，圖中黑色的點線為[16]國立中正大學光機電整合工程研究所李曾申的碩士論文中實驗的結果，其他顏色的點線為不同次量測到的結果(水平配向樣品的 K_i 要代 K_1 ，垂直配向樣品的 K_i 要代 K_3)。

由圖中可以發現趨勢大致符合：正型液晶的範圍是在低頻區，頻率越低 $|\Delta\varepsilon|$ 越大，表示液晶分子越容易順著電場排列，介電異方性隨頻率的變化較大；負型液晶的範圍是在高頻區，頻率越高 $|\Delta\varepsilon|$ 越大，表示液晶分子越容易垂直電場排列，介電異方性隨頻率的變化較小。[16]的臨界頻率約在 25kHz，而我們的臨界頻率約在 13kHz，和[14][15]臨界頻率約在 12kHz 非常接近。



4-2 兆赫波段下雙頻液晶的折射率 n_e 、 n_o

剛開始先拿已知折射率的石英玻璃進行折射率量測，主要目的是要確認新架設的 THz-TDS 系統能夠準確地把材料的特性量測出來。

厚度為 3.174mm 的石英玻璃量測出來的結果如圖 4-2.1 (a)(b)(c)，紅色線是新架設好的 THz-TDS 系統所量測得到的結果，黑色線是 Tsung-Ta Tang 博士論文[9]中量到的結果，圖 4-2.1 (a)為厚石英玻璃相位和頻率的關係圖，兩者得到的結果非常吻合。相位和頻率會成正比的關係，從圖中可以發現兩者都是通過原點的一條斜直線和理論相符。我們也可以由相位和頻率的關係圖看出此系統可信範圍約在 0.2 THz ~ 2 THz 之間。

圖 4-2.1 (b)是厚石英玻璃折射率實部和頻率的關係圖，可以得到一條水平線，代表石英玻璃不會隨頻率改變而改變，我們量測出來的結果在 0.2 THz ~ 2 THz 之間折射率實部為 1.954。Tsung-Ta Tang 的結果在 0.2 THz ~ 2 THz 之間折射率實部為 1.955。兩者的折射率量測結果非常接近。

圖 4-2.1 (c)是厚石英玻璃折射率虛部(extinction coefficient, κ)和頻率的關係圖，我們量測出來的結果在 0.2 THz ~ 2 THz 之間折射率虛部小於 0.01。Tsung-Ta Tang 的結果在 0.2 THz ~ 2 THz 之間折射率虛部小於 0.01。代表兩者對兆赫波的吸收是很小的，沒有明顯的吸收峰值，因此非常適合拿石英玻璃當作兆赫波段下使用元件的基板，但是隨著頻率的增加，此種材料對兆赫波的吸收有變大的趨勢。

參考樣品(reference sample)是由兩片厚度約 1mm 的石英玻璃組成，厚度為 2.154mm。實驗分析上，我們必須藉助參考樣品的訊號來準確分析出我們液晶的性質。圖 4-2.2 (a)(b)是參考樣品折射率實部和頻率的關係圖及折射率虛部和頻率的關係圖，此兩張圖的結果相較於前面圖 4-2.1 (b)(c)來說比較振盪，沒有像圖 4-2.1 (b)(c)那麼平滑，原因在於所有樣品放在 THz-TDS 系統中進行量測時都會產生反射訊號，光程等於折射率乘上所走的距離，厚樣品因為較厚，所走的距離較長，反射訊號被延遲到比較後面，不會被我們量測到，因此反射訊號不會影響的分析結果。量測出來的結果在 0.3 THz ~ 1.7 THz 之間折射率實部(n)為 1.957，折射率虛部小於 0.01。結果也和 4-2.1(b) (c)非常接近。

在 THz 波段下對應的波長約在 0.03mm~3mm 之間，所以量測的樣品厚度要厚，量測雙頻液晶折射率的樣品是水平配向，液晶厚度 279 μ m，示意圖如圖 4-2.3，樣品規格如圖所示，上下兩個黃色長方形區域為間隙物(鐵氟龍)放置的位置，箭號為上下石英玻璃基板磨刷的方向，中間黃色圓形區域為樣品量測區域，也就是在樣品前面放至光圈擋掉直徑 0.6cm 以外的 THz 訊號。

圖 4-2.4 為製作好的樣品在互相垂直的偏振片(crossed polarizer)下所看到的亮暗態，有亮暗態的變化代表我們的樣品是有配向且均勻的，對比度沒有很好的原因是因為樣品的厚度較厚，靠近中間層的液晶不容易受

表面配向膜的影響而配向，僅能靠臨近液晶分子間的凡得瓦力轉向。

我們藉由旋轉液晶樣品使磨刷方向和 THz 偏振方向平行及垂直來量測 n_e 、 n_o 。圖 4-2.5 (a)是非尋常光(Extraordinary Ray, e-ray)折射率實部和頻率的關係圖，圖中的三條曲線分別是同一個樣品量測三次的結果， n_e 是一條水平線，代表 n_e 不會隨頻率改變而改變，訊號在 0.3 THz ~ 1.7 THz 之間為可信範圍。因為後面設計的相位延遲器(Phase Shifter)希望能在 1THz 下使用，所以只寫出 1THz 下的 n_e ，三次測得的結果 $n_e=1.682$ 、 1.671 、 1.686 ，平均值 $n_e=1.680$ 。

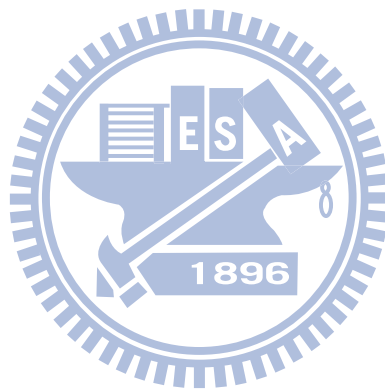
圖 4-2.5 (b)是非尋常光折射率虛部(κ_e)和頻率的關係圖，在 1THz 附近沒有明顯的吸收，折射率虛部小於 0.03。我們比對折射率虛部在約 0.36THz 處有一個峰值出現，想說它會不會對我們的折射率有影響？結果發現折射率虛部的峰值對應到折射率實部的位置並沒有在波峰或波谷，因此對於我們的折射率沒有影響。

圖 4-2.6 (a)是尋常光(Ordinary Ray, o-ray)折射率實部和頻率的關係圖，圖中的三條曲線分別是同一個樣品量測三次的結果，可以發現 n_o 會隨著頻率增加而變小，是一個和頻率相關的函數。訊號在 0.3 THz ~ 1.7 THz 之間為可信範圍，在 1THz 下三次測得的結果 $n_o=1.493$ 、 1.522 、 1.517 ，平均值 $n_o=1.511$ 。

圖 4-2.6 (b)是尋常光折射率虛部(κ_o)和頻率的關係圖，在 1THz 附近

沒有明顯的吸收，折射率虛部小於 0.05。

經過上面分析得到在 1THz 下雙頻液晶的 Birefringence $\Delta n = 0.169$ ，此結果比 E7 的 Birefringence $\Delta n = 0.13$ [17]還要大，非常適合用來製作各種元件。



4-3 相位延遲實驗結果

本節主要的內容是承接上一節求得的雙頻液晶(MLC-2048)折射率 n_e 、 n_o ，把折射率代入第二章第五節所討論的理論中，如此就可以設計出 90° 的相位延遲器， 90° 的相位延遲器又稱為四分之一波長板，主要是利用在線偏振光與圓偏振光之間的轉換。表 4-3 為 MLC-2048、E7 和 MDA-00-3461 三種液晶的 n_e 、 n_o 和 Δn 。

	n_e	n_o	Δn
MLC-2048	1.680	1.511	0.169
E7	1.71	1.58	0.13
MDA-00-3461	1.716	1.535	0.181

表 4-3 MLC-2048、E7 和 MDA-00-3461 三種液晶的 n_e 、 n_o 和 Δn

因為反應時間和液晶層厚度有關，厚度愈薄，反應時間愈快，但是為了配合本研究的主題改善反應時間，所以希望使用不同液晶的樣品能在相同的條件下去比較它們之間反應的快慢，因此這節所製作樣品盒的條件皆相同，如：間隙物的厚度 d 皆約為 $600\mu\text{m}$ 、電極間距 L 皆為 12mm 、配向膜皆為垂直配向(DMOAP)且經過磨刷、相同的清洗玻璃程序……等，只有所灌入的液晶不同，樣品結構示意圖如圖 4-3.1。

在製作相位延遲器樣品前要先用砂紙把銅片表面氧化的部份磨掉以增加銅片的導電能力，且盡量把使用的銅片壓平以降低樣品在石英玻璃基板和銅片間的空隙。

灌液晶進入樣品的步驟為：先灌入約 2/3 的液晶→抽真空(把石英玻璃基板和銅片間的空氣抽出)→灌入液晶→抽真空→灌入液晶→...，重複多次後確定裡面沒有殘留的空氣在用 AB 膠把液晶灌入口封住。在灌液晶的時候發現雙頻液晶 MLC-2048 比 E7 和 MDA-00-3461 還要稠，所以在進行上述抽真空步驟時會花比較長的時間。

本論文中總共使用三種液晶，分別為雙頻液晶(MLC-2048)、正型液晶(E7 和 MDA-00-3461)，這三種液晶皆為默克(Merck)公司所製作的產品。製作好樣品後檢驗液晶的配向狀況，液晶配向效果的好壞，可利用錐光干涉(conoscopy)實驗來檢驗，主要原理是雷射光通過正交偏振片，在正交偏振片中間經由透鏡的聚焦及擴束使通過液晶樣品時產生光程差，最後會在後方屏幕上產生明暗的干涉條紋，利用干涉條紋來判別液晶配向效果的好壞，如圖 4-3.2 為 MLC-2048、E7 和 MDA-00-3461 的 conoscopic patterns，由圖可知樣品中的液晶垂直配向的效果很明顯。

本節量測的方法皆為降壓量測，即從高電壓開始往低電壓進行量測。

4-3-1 雙頻液晶(MLC-2048)的相位延遲

接下來說明實驗及理論模擬出來的結果。圖 4-3-1 (a)為雙頻液晶在不同外加電壓下量測到的兆赫波時域訊號，縱軸為兆赫波電場強度，橫軸為延遲的時間。圖中可以看出剛開始沒加電壓時兆赫波的偏振方向是垂直液晶分子長軸，量測到的是 n_o ，當外加的電壓大小超過臨界電壓 $55.94V_{rms}$ 後，液晶分子開始慢慢轉向到順著電場方向排列，也就是液晶分子慢慢從 n_o 轉向 n_e ，因為 n_e 大於 n_o ，所以在逐漸加大電壓時 n_{eff} 也逐漸變大，兆赫波主訊號的位置會被延遲到更後面才會出現，因此我們從圖 4-3-1 (a) 可以看到兆赫波主訊號的位置會隨著外加電壓逐漸增加而向右偏移(Shift)。此外，圖中也可以發現兆赫波主訊號的強度會隨著電壓增加而增加，其原因可從兩方面來解釋：一、我們由 4-2 節中圖 4-2.5 (b) 和圖 4-2.6 (b) 可以得到雙頻液晶 κ_o 大於 κ_e ，也就是說 n_o 狀態的吸收比 n_e 狀態大，所以經過液晶樣品後 n_o 的兆赫波主訊號強度會比 n_e 小；二、在石英玻璃和液晶之間的 Fresnel Reflection，如果是垂直入射 $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$ 其中 n_1 是介質 1 的折射率， n_2 是介質 2 的折射率，石英玻璃折射率為 1.957，在 1THz 下 $n_e=1.680$ 、 $n_o=1.511$ ，反射越多，穿透樣品的強度就越小。

雙頻液晶除了在沒有外加電壓下靠著表面配向呈現 n_o 狀態外，也可以透過外加電壓但是頻率不同於正型液晶的 1kHz，而是 100kHz 達到 n_o 狀態，圖 4-3-1 (a) 中 100kHz 100V_{rms} 為在負型液晶狀態下的操作頻率及電壓

大小，量測的結果和沒有外加電壓下的結果差異不大，所以使用雙頻液晶的相位延遲器只需改變操作頻率即可達到快速切換的效果。

圖 4-3-1 (b)為 MLC-2048 在不同外加電壓下的相位延遲關係圖，紅點為利用正型液晶的操作頻率 1kHz 所得到不同外加電壓的相位減去沒有外加電壓下的相位結果，藍點為利用負型液晶的操作頻率 100kHz 100V_{rms} 所得到的相位減去沒有外加電壓下的相位結果，黑色實線為理論模擬的結果。實驗得到的結果和理論模擬兩者的趨勢是大致符合的，只是在實際的數值上有些差異，如：在 100V_{rms} 時理論得到 117.16°，但是我們實驗只量到 87.76°，推測有兩個原因：一、雙頻液晶的介電異方性 $\Delta\epsilon$ 太小，導致液晶分子不容易平行或垂直電場方向排列，也就是利用電場驅動分子轉向的能力不佳；二、實驗室最大電壓只能加到 100V_{rms}，而此樣品的臨界電壓太大(55.94V_{rms})，如果能把電壓加到更大，驅動的效果應該會改善。

圖 4-3-1 (b)我們利用操作頻率 1kHz 100V_{rms} 的相位減去操作頻率 100kHz 100V_{rms} 的相位可得 89.69°，代表此樣品可以應用於四分之一波長板(Quarter Wave Plate)。

4-3-2 正型液晶(E7)的相位延遲

圖 4-3-2 為 E7 在不同外加電壓下的相位延遲關係圖，紅點為操作頻率 1kHz 所得到不同外加電壓的相位減去沒有外加電壓下的相位結果，黑色實線為理論模擬的結果。實驗得到的結果和理論模擬的結果兩者非常符合，而在實際的數值上也非常接近，如：在 $100V_{\text{rms}}$ 時理論得到 93.60° ，我們實驗量到 90.04° ，推測的原因和前面相同：一、E7 的介電異方性 $\Delta\epsilon$ 是我使用三種液晶中最大的，所以液晶分子很容易平行電場方向排列，也就是利用電場驅動分子轉向的能力很好；二、臨界電壓只有 $23.51V_{\text{rms}}$ 對於實驗室最大電壓能加到 $100V_{\text{rms}}$ 來說已經足夠了。此樣品可以應用於四分之一波長板。



4-3-3 正型液晶(MDA-00-3461)的相位延遲

圖 4-3-3 為 MDA-00-3461 在不同外加電壓下的相位延遲關係圖，紅點為操作頻率 1kHz 所得到不同外加電壓的相位減去沒有外加電壓下的相位結果，黑色實線為理論模擬的結果。實驗得到的結果和理論模擬的結果兩者相當接近，如：在 $100V_{\text{rms}}$ 時理論得到 130.31° ，我們實驗量到 117.46° ，推測的原因和前面相同：一、MDA-00-3461 的介電異方性 $\Delta\epsilon$ 比 MLC-2048 大，但是比 E7 小，所以利用電場驅動分子轉向的能力介於 E7 和 MLC-2048 中間；二、臨界電壓只有 $24.77V_{\text{rms}}$ 和 E7 非常接近，所以對於實驗室最大電壓能加到 $100V_{\text{rms}}$ 來說也相當足夠。此樣品可以應用於四分之一波長板。



4-4 反應時間實驗結果

由上一節的結果可知三種不同的液晶在相同條件的液晶盒中皆可達到 90 度的相位延遲，可以應用於四分之一波長板，本小節延續上一節所使用的樣品進行反應時間的量測。

我們量測反應時間是使用 LabVIEW 程式去記錄 THz field 強度隨著時間變化的關係。

在本節開始前，為了後面描述的方便，先定義兩個之後會一直用到的名詞：

1. turn on：液晶分子從原本不加外場、隨著基板表面配向的方向排列，變化成受外場作用而轉向的過程，稱為 turn on。
2. turn back：液晶分子從受外場作用而排列的方向回復到原本基板表面配向方向的過程，稱為 turn back。

在還沒有實際去量測雙頻液晶的反應時間前，我們都認為用它製作的樣品反應時間應該會很快，但是經過實驗量測後發現雙頻液晶在 turn on 階段的反應時間明顯比 turn back 慢很多，所以希望能在相同製作的條件下製作出灌入 E7 的液晶樣品，將 E7 和雙頻液晶的反應時間作比較。

到實驗中期時，因為默克(Merck) 公司不再販售 E7，他們建議我們取代的液晶為 MDA-00-3461，為了之後研究上可能會以此液晶設計元件，所以也把此液晶製作成樣品量測它的反應時間。

因為雙頻液晶在 turn on 階段反應時間的表現沒有很好，所以
4-4-2~4-4-3 兩小節則針對這個問題嘗試做些改善。



4-4-1 三種液晶反應時間的結果與比較

圖 4-3.1 是這小節三種液晶樣品的結構示意圖，皆為垂直配向。圖 4-4-1.1 為雙頻液晶在垂直配向下的驅動操作示意圖，棕色的部份為銅片，有 2 個功用分別是樣品的間隙物和電極，剛開始未加電壓時液晶分子是垂直基板排列如圖的左半部，當兆赫波通過樣品時會量測到 n_o ，當外加一個頻率為 1kHz 方波的電壓時，液晶分子開始往順著電場方向排列(正型液晶特性)，如圖中的右半部，我們定義從圖中的左半部變化到右半部的過程為 turn on；使液晶回復到初始狀態的過程我們定義為 turn back，雙頻液晶在此階段有 2 種操作方式：一種是如圖所示外加一個頻率為 100kHz 方波的電壓使液晶分子往垂直於電場方向排列(負型液晶特性)；另一種則是利用關電壓(turn off)，使液晶分子自然回復。雙頻液晶在 turn on 階段也有 2 種方式：一種是從未加電壓到 1kHz 的過程，另一種是利用調變頻率從 100kHz 到 1kHz 的過程。

在正型液晶 E7 和 MDA-00-3461 的驅動方式只有一種，也就是 turn on 階段為從未加電壓到外加 1kHz 的過程，turn back 階段則是關電壓使液晶分子自然回復，即一般稱的 turn off。

先從雙頻液晶反應時間的結果開始介紹。圖 4-4-1.2 (a)(b)為雙頻液晶在 2 種不同 turn on 方法下量測得到的結果，(a)(b)2 圖量測的位置皆在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，縱軸為兆赫波主訊號的強度，橫軸為

時間，當外加頻率為 1kHz 電壓後，液晶分子開始從 n_o 轉向成為 n_e ，折射率變大，兆赫波主訊號會向右偏移，因此會量測到兆赫波訊號強度隨著時間增加而減小的關係圖。如果外加頻率改為 100kHz、或關電壓，則兆赫波訊號強度隨著時間增加而增加，如圖 4-4-1.3 (a)所示。圖 4-4-1.2 (a) 為雙頻液晶 0V~1kHz 100V_{rms} 所量到的關係圖，可以從圖中發現剛開始時兆赫波訊號強度沒有明顯變化，過了一段時間後兆赫波訊號強度才開始急遽變化，根據一般工業界定義反應時間的方法及 2-6 小節推得的反應時間形式，我們分析反應時間的方法為前面變化不明顯的那段不看，直接從兆赫波訊號強度開始急遽變化處開始計算到 e^{-1} 處(36.8%)即為反應時間，經過分析可得 turn on 的反應時間為 400 秒，圖 4-4-1.2 (b) 為雙頻液晶 100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 所量到的關係圖，前面也會出現一段不明顯的兆赫波訊號強度變化，經過分析可得 turn on 的反應時間為 377 秒。

經過多次重複量測得到 0V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 的 turn on 的反應時間為 518±175 秒；100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 的 turn on 的反應時間為 485±143 秒。由上述結果可以發現雙頻液晶在垂直配向樣品中 turn on 的反應時間以利用調變頻率的方式 100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 會比 0V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 來的快。

圖 4-4-1.3 (a)(b) 為雙頻液晶在 2 種不同 turn back 方法下量測得到的結果，圖中可以發現 2 種不同的 turn back 方法前面階段皆不會有兆赫波

訊號強度變化不明顯的現象出現，相較之下，turn back 反應時間快了很多。圖 4-4-1.3 (a)為雙頻液晶 turn back 階段利用 1kHz 100V_{rms} ~100kHz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，量測的位置在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，經過分析可得 turn back 的反應時間為 87 秒。圖 4-4-1.3 (b)為雙頻液晶 turn back 階段利用 1kHz 100V_{rms} ~0V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，量測的位置在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，所以當關掉電壓折射率會從 n_e 變回 n_o ，兆赫波主訊號的峰值會向左偏移，因此兆赫波訊號強度隨著時間增加而增加，經過分析可得 turn back 的反應時間為 119 秒。

經過多次重複量測得到 1kHz 100V_{rms} ~100kHz 100V_{rms} 的 turn back 的反應時間為 96±28 秒；1kHz 100V_{rms} ~0V_{rms} 的 turn back 的反應時間為 117±3 秒。由上述結果可以發現雙頻液晶在垂直配向樣品中 turn back 的反應時間以利用調變頻率的方式 1kHz 100V_{rms} ~100kHz 100V_{rms} 會比 1kHz 100V_{rms} ~0V_{rms} 來的快。

圖 4-4-1.4 為垂直配向雙頻液晶 MLC-2048 turn on 和 turn back 反應時間比較圖，橫軸為雙頻液晶不同的操作模式，縱軸為反應時間，圖中黑點為 turn on 反應時間的結果，紅點為 turn back 反應時間的結果，我們可以清楚看出雙頻液晶在垂直配向樣品中 turn on 的反應時間以利用調變頻率的方式 100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 會比 0V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 來的

快；turn back 的反應時間以利用調變頻率的方式 $1\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$ 會比 $1\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 0V_{\text{rms}}$ 來的快。

圖 4-4-1.5 為 E7 樣品兆赫波訊號強度和時間之關係圖，不同顏色的點代表不同的 turn on 或 turn back 階段，經過多次重複量測得到 E7 turn on 的反應時間為 178 ± 17 秒，turn back 的反應時間為 252 ± 64 秒。圖 4-4-1.6 為 MDA-00-3461 樣品兆赫波訊號強度和時間之關係圖，不同顏色的點代表不同的 turn on 或 turn back 階段，經過多次重複量測得到 MDA-00-3461 turn on 的反應時間為 234 ± 49 秒，turn back 的反應時間為 273 ± 103 秒。

在 E7 和 MDA-00-3461 的兆赫波訊號強度和時間之關係圖中可以發現這 2 款液晶並不會出現像雙頻液晶在 turn on 階段兆赫波訊號強度變化不明顯的現象出現，推測雙頻液晶會有此現象出現的原因是因為我們使用的垂直配向膜(DMOAP)根據以往實驗室製作樣品的經驗及 4-1 小節垂直樣品的結果可知：有經過絨布摩刷後，預傾角都高達 89 點多度，幾乎是垂直於基板，再加上 $\Delta\varepsilon$ 太小，導致電場驅動液晶轉動的能力不夠，這樣可能會造成液晶分子在剛開始的階段會不知道要往哪一個方向倒，使得兆赫波訊號強度變化不明顯的現象出現。

圖 4-4-1.7 為三種液晶 turn on 反應時間的比較，反應時間由快到慢依序是 E7、MDA-00-3461、雙頻液晶($100\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 1\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$)、雙頻液晶($0V_{\text{rms}} \sim 1\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$)。

圖 4-4-1.8 為三種液晶 turn back 反應時間的比較，反應時間由快到慢依序是雙頻液晶(1kHz 100V_{rms}~100kHz 100V_{rms})、E7、MDA-00-3461、雙頻液晶(1kHz 100V_{rms}~0V_{rms})。



4-4-2 不同的表面配向膜對反應時間的影響

由上一小節的結果可知，雙頻液晶在 turn on 反應時間沒有預期中快，為了改善上一小節提到液晶分子在剛開始的階段會不知道要往哪一個方向倒問題，我們想到的方法是把表面配向膜改為水平配向，也就是把配向膜的材料從 DMOAP 改成 Nissan SE-130B，因為根據以往實驗室製作樣品的經驗及 4-1 小節水平樣品的結果可知：有經過絨布摩刷後，預傾角都有 2~3 度左右，代表液晶分子並不是很水平的躺在基板上，有一個明顯的預傾角存在，這個預傾角的存在應該可以改善反應時間，因為液晶該開始時已經有明確的偏轉方向了。

為了驗證我們的推論，所以這一小節就重新製作一個結構和前面樣品相同，只有配向膜不同的樣品，水平配向樣品結構示意圖如圖 4-4-2.1，圖 4-4-2.2 為雙頻液晶在水平配向下的驅動操作示意圖，棕色的部份為銅片，有 2 個功用分別是樣品的間隙物和電極，剛開始未加電壓時液晶分子是平行基板排列如圖的左半部，所以當兆赫波通過樣品時會量測到 n_e ，當我們外加一個頻率為 100kHz 方波的電壓時，液晶分子開始往垂直電場方向排列(負型液晶特性)，如圖中的右半部，我們定義從圖中的左半部變化到右半部的過程為 turn on；使液晶回復到初始狀態的過程我們定義為 turn back。雙頻液晶在此結構下 turn on 和 turn back 也是各有 2 種方法，方法和 4-4-1 相同，只有操作的頻率相反而已。E7 和 MDA-00-3461

因為是正型液晶，所以無法在此水平配向的結構下操作。

圖 4-4-2.3 (a)為雙頻液晶 turn on 階段利用 $0V_{\text{rms}}\sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，圖 4-4-2.3 (b)為雙頻液晶 turn on 階段利用 1kHz $100V_{\text{rms}}\sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，(a)(b) 圖量測的位置皆在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，縱軸為兆赫波主訊號的強度，橫軸為時間，可以明顯看到前面兆赫波訊號強度變化不明顯的現象改善了。圖 4-4-2.3 (a)的數據經過分析可得 turn on 的反應時間為 326 秒；圖 4-4-2.3 (b)的數據經過分析可得 turn on 的反應時間為 424 秒。

經過多次重複量測得到水平配向雙頻液晶 $0V_{\text{rms}}\sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的 turn on 反應時間為 377 ± 77 秒； 1kHz $100V_{\text{rms}}\sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的 turn on 反應時間為 416 ± 17 秒。由上述結果可以發現雙頻液晶在水平配向的結構下，在 turn on 反應時間有比 4-4-1 節的結果還快，證實了我們之前的推測是正確的，其中以 $0V_{\text{rms}}\sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 得操作方式會比調變頻率來的快。

圖 4-4-2.4 (a)為雙頻液晶 turn back 階段利用 100kHz $100V_{\text{rms}}\sim 1\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，量測的位置在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，數據經過分析可得 turn back 的反應時間為 95 秒；圖 4-4-2.4 (b)為雙頻液晶 turn back 階段利用 100kHz $100V_{\text{rms}}\sim 0V_{\text{rms}}$ 量

測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，量測的位置在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，數據經過分析可得 turn back 的反應時間為 297 秒。

經過多次重複量測得到水平配向雙頻液晶 100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 的 turn back 反應時間為 121±33 秒；100kHz 100V_{rms}~0V_{rms} 的 turn back 反應時間為 305±23 秒。由上述結果知以調變頻率的 turn back 反應時間比直接關掉電壓讓液晶自然回復來的快，和 4-4-1 節所得到的趨勢一致，只是在反應時間的秒數上慢了一些，原因為：雙頻液晶在正型狀態的操作頻率使用 1kHz 時因為 $\Delta\epsilon$ 不夠大，導致驅動液晶的能力不佳，使得反應時間在使用此頻率時表現較差，針對此問題我們會在下一小節做更詳盡的說明及改善。

圖 4-4-2.5 為水平配向雙頻液晶 MLC-2048 相位延遲器反應時間比較圖，黑點為兩種 turn on 反應時間的結果，紅點為兩種 turn back 反應時間的結果。

圖 4-4-2.6 把水平配向(0V_{rms}~100kHz 100V_{rms})和垂直配向(100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms})較快的操作方式拿來和 E7、MDA-00-3461 比較 turn on 反應時間，結果發現這一小節改用水平配向的方法確實有改善雙頻液晶在 turn on 的反應時間。

圖 4-4-2.7 把水平配向(100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms})和垂直配向(1kHz 100V_{rms}~100kHz 100V_{rms})較快的操作方式拿來和 E7、MDA-00-3461

比較 turn back 反應時間，擁有最快 turn back 反應時間的是垂直配向(1kHz 100V_{rms}~100kHz 100V_{rms})96 秒，雖然水平配向 turn back 反應時間 121 秒比 96 秒慢了一些，但是相較於 E7 和 MDA-00-3461 已經很快了。



4-4-3 改變操作頻率對反應時間的影響

由於4-4-2小節討論到正型液晶在之前使用操作頻率1kHz下 $\Delta\varepsilon$ 不夠大，導致驅動液晶的能力不佳，使得反應時間在使用此頻率時表現較差，因此我們想要改變操作頻率，根據文獻[16]中有雙頻液晶 MLC-2048 $\Delta\varepsilon$ 在不同操作頻率下的關係，如圖 4-1.6，圖中黑色線可以看出在低頻區頻率的改變對 $\Delta\varepsilon$ 的影響很大，愈低頻， $\Delta\varepsilon$ 愈大，因此這一小節在正型液晶的操作頻率由 1kHz 改成 500Hz；在高頻區頻率的改變對 $\Delta\varepsilon$ 的影響很小，所以在負型液晶的操作頻率還是使用 100kHz。

這小節所使用的樣品分別為垂直配向及水平配向的樣品。在垂直配向其驅動操作如圖 4-4-1.1，唯一不同之處為把 1kHz 改成 500kHz。圖 4-4-3.1 (a)為垂直配向雙頻液晶 turn on 階段利用 $0V_{\text{rms}}\sim 500\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，經過分析可得 turn on 的反應時間為 368 秒；圖 4-4-3.1 (b)為垂直配向雙頻液晶 turn on 階段利用 100kHz $100V_{\text{rms}}\sim 500\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，經過分析可得 turn on 的反應時間為 303 秒。(a)(b)2 圖量測的位置皆在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，縱軸為兆赫波主訊號的強度，橫軸為時間，。經過多次重複量測得到垂直配向雙頻液晶 $0V_{\text{rms}}\sim 500\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的 turn on 反應時間為 349 ± 54 秒； 100kHz $100V_{\text{rms}}\sim 500\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的 turn on 反應時間為 323 ± 51 秒。

圖 4-4-3.2 (a) 為垂直配向雙頻液晶 turn back 階段利用 500Hz $100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，量測的位置在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，經過分析可得 turn back 的反應時間為 81 秒；圖 4-4-3.2 (b) 為垂直配向雙頻液晶 turn back 階段利用 500Hz $100V_{\text{rms}} \sim 0V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，量測的位置在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處，經過分析可得 turn back 的反應時間為 117 秒。經過多次重複量測得到垂直配向雙頻液晶 500Hz $100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的 turn back 反應時間為 84 ± 6 秒；500Hz $100V_{\text{rms}} \sim 0V_{\text{rms}}$ 的 turn back 反應時間為 120 ± 4 秒。

圖 4-4-3.3 為垂直配向 500Hz 下雙頻液晶 MLC-2048 反應時間比較圖，黑點為兩種 turn on 反應時間的結果，紅點為兩種 turn back 反應時間的結果。

由上述結果我們得到雙頻液晶最快的反應時間，turn on 反應時間為調變頻率 100kHz $100V_{\text{rms}} \sim 500\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的方式，時間為 323 秒；turn back 反應時間為 500Hz $100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的方式，時間為 84 秒。若將量測兆赫波訊號的位置從未加電壓的兆赫波主訊號處往左移動 $20\mu\text{m}$ ，得到的結果如下：turn on 反應時間為調變頻率 100kHz $100V_{\text{rms}} \sim 500\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的方式，時間為 360 ± 15 秒；turn back 反應時間為 500Hz $100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz}$ $100V_{\text{rms}}$ 的方式，時間為 105 ± 3 秒，由上面的結果可以發

現改變量測位置後反應時間明顯變慢，因此量測的位置還是以在未加電壓的兆赫波主訊號處最佳。

在水平配向其驅動操作如圖 4-4-2.2，唯一不同之處為把 1kHz 改成 500kHz。圖 4-4-3.4 為水平配向雙頻液晶 turn on 階段利用 500Hz 100V_{rms}~100kHz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，水平配向雙頻液晶 turn on 階段利用 0V_{rms}~100kHz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖和前面圖 4-4-2.3 (a)相同，量測的位置皆在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處。圖 4-4-3.4 的數據經過分析可得 turn on 的反應時間為 343 秒，經過多次重複量測得到水平配向雙頻液晶 500Hz 100V_{rms}~100kHz 100V_{rms} 的 turn on 反應時間為 350±6 秒，由上述結果可以發現雙頻液晶在水平配向操作頻率 500Hz 的結構下，在 turn on 反應時間有比 4-4-2 節的結果還快。

圖 4-4-3.5 為水平配向雙頻液晶 turn back 階段利用 100kHz 100V_{rms}~500Hz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖，水平配向雙頻液晶 turn back 階段利用 100kHz 100V_{rms}~0V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖和前面圖 4-4-2.4 (b)相同，量測的位置皆在未加電壓下兆赫波主訊號的峰值處。圖 4-4-3.5 數據經過分析可得 turn back 的反應時間為 113 秒，經過多次重複量測得到水平配向雙頻液晶 100kHz 100V_{rms}~500Hz 100V_{rms} 的 turn back 反應時間為 116±24 秒，由上述結果

知以調變頻率的 turn back 反應時間比直接關掉電壓讓液晶自然回復來的快，而且在反應時間的秒數上用 500Hz 也比 1kHz 來的快。

圖 4-4-3.6 為水平配向雙頻液晶 MLC-2048 相位延遲器反應時間比較圖，黑點為兩種 turn on 反應時間的結果，紅點為兩種 turn back 反應時間的結果。4-4-1~4-4-3 的結果比較如圖 4-4-4.1 和圖 4-4-4.2。



4-4-4 反應時間量測的結果和理論之比較

由 2-6 節推導出反應時間在垂直樣品下的公式，如下

$$\tau_{off} = \frac{\gamma_1 d^2}{K_3 \pi^2}$$

$$\tau_{on} = \frac{\gamma_1}{\left| \varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| E^2 - \left(\frac{\pi}{d} \right)^2 K_3 \right|}$$

$$= \frac{\tau_{off}}{\left| \left(\frac{V}{V_{th}} \right)^2 - 1 \right|}$$

式子中的 γ_1 可以利用可見光波段的 turn off 反應時間反推出來，由前面 2-5

節的推導知角度和反應時間的關係為： $\theta = \theta_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，光強度和 θ^2 成正比關

係： $I \propto \theta^2 = \theta_0^2 e^{-\frac{2t}{\tau}}$ ，因為本實驗是由氬氖雷射光強度的變化去得到反應

時間： $I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，所以利用光強度得到的反應時間是 2-5 節推導出反應時

間的 1/2， τ_1 和 τ 之間的關係為： $\tau = 2\tau_1$ ，經由實驗可得 E7 為 0.08 Pa·s、

MDA-00-3461 為 0.06 Pa·s、雙頻液晶 MLC-2048 為 0.24 Pa·s， τ_{on} 、 τ_{off}

分別是有加電壓和關掉電壓下的反應時間，所以 E7、MDA-00-3461 的理

論反應時間 turn on 可由 τ_{on} 求得，turn back 可由 τ_{off} 求得，垂直配向雙頻

液晶的理論反應時間 turn on 可由 τ_{on} 求得，turn back 的反應時間必須把 τ_{on}

公式中 $|\Delta\varepsilon|$ 代入負型液晶的值來求得。而在水平配向雙頻液晶的理論反應

時間首先要把 τ_{off} 公式中的 K_3 改為 K_1 ，理論 turn on 反應時間中的 $|\Delta\varepsilon|$ 要

代入負型液晶的值來求得，理論 turn back 反應時間中的 $|\Delta\varepsilon|$ 要代入正型

液晶的值來求得。

圖 4-4-4.1 為 turn on 反應時間理論和實驗比較圖，圖中縱軸為反應時間，橫軸為不同液晶、不同操作方式的種類，裡面的 homo 代表水平配向雙頻液晶頻率分別操作在 500Hz 和 1kHz、裡面的 500Hz 和 1kHz 代表垂直配向雙頻液晶不同的操作頻率，黑色虛線代表理論計算的結果，紅色點為實驗的結果，橫軸依照理論計算反應時間由快到慢做排列，E7 擁有最快的 turn on 反應時間，而雙頻液晶的部份是以垂直配向操作頻率在 500Hz 為最快。

圖 4-4-4.2 為 turn back 反應時間理論和實驗比較圖，橫軸是依照理論計算反應時間由快到慢做排列，黑色虛線代表理論計算的結果，紅色點為實驗的結果，垂直配向雙頻液晶操作頻率在 500Hz 擁有最快的 turn back 反應時間。

圖 4-4-4.1 和圖 4-4-4.2 的實驗結果與理論推導出來的結果會有較大的差異，主要原因是在理論的反應時間公式中有利用小角度近似所推導出來的結果，但本論文中液晶分子皆為大角度的變化，因此實驗和理論的結果才會有較大的差異。

第五章 結論與未來展望

5-1 結論

我們成功利用三種液晶(MLC-2048、E7、MDA-00-3461)且液晶層厚度約 600 μm 製作出頻率在 1THz 下的四分之一波長板。

由第四章的實驗結果，利用雙頻液晶確實能夠大幅改善 turn back 反應時間，可從 E7 的 252 秒增快到 84 秒，增快達 67%；但是雙頻液晶在 turn on 反應時間卻沒有如預期中快，導致此結果的原因如下：1. 雙頻液晶 $\Delta\epsilon$ 的大小僅僅只有 E7 的 1/4 倍左右，使得不容易利用外場驅動液晶分子偏轉；2. 預傾角會影響反應時間，預傾角的存在可以改善我們的反應時間，因為液晶該開始時已經有明確的偏轉方向。根據上述的討論，我們嘗試把表面配向膜從垂直配向膜 DMOAP 改為水平配向膜，經過實驗證實可以改善液晶分子在剛開始的階段會不知道要往哪一個方向倒問題，但由於整體的表現沒有比 E7 好，所以我們根據文獻[16]中 $\Delta\epsilon$ 和頻率之關係圖的結果改變雙頻液晶 MLC-2048 的正型液晶操作頻率為 500Hz，實驗結果發現 turn on 和 turn back 反應時間都變快了。

圖 5-1.1 為各種狀態下的總反應時間比較圖，橫軸為不同液晶、不同操作方式的種類，其中 1kHz 和 500Hz 皆為雙頻液晶垂直配向樣品，homo 為雙頻液晶水平配向樣品，縱軸為總反應時間，總反應時間為 turn on 加上 turn back 反應時間，圖中可以看到雙頻液晶垂直配向樣品利用頻率

500Hz 和 100kHz 的切換可以增快 5% 的總反應時間，從 E7 的 430 秒增快到 407 秒。

5-2 未來展望

經由前面的討論可知，若要增快反應時間首要目標就是尋找介電異方性較大的雙頻液晶。

在文獻[18][19]中提到若將微量的奈米碳管混入液晶中，會改變介電異方性及彈性常數，進而使臨界電壓和反應時間改變，所以可以將微量的奈米碳管混入雙頻液晶增加雙頻液晶受外加電場驅動的能力，增快反應時間。



參考文獻

- [1] B. B. Hu and M. C. Nuss, “Imaging with terahertz waves”, *Opt. Lett.* **20**, 1716-1718 (1995)
- [2] A. J. Fitzgerald, E. Berry, N. N. Zinovev, G. C. Walker, M. A. Smith, and J. M. Chamberlain, “An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation”, R67(2002)
- [3] C.-F. Hsieh, T.-T. Tang, H.-L. Chen, R.-P. Pan, and C.-L. Pan, “Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate”, *Opt. Lett.*, **31**, 1112(2006)
- [4] K. Sakai, “Terahertz Optoelectronics”. (Berlin: Springer, 2005)
- [5] Dongfeng Liu and Jiayin Qin, “Carrier dynamics of terahertz emission from low-temperature-grown GaAs”, *APPLIED OPTICS*, **42**, 3678(2003)
- [6] P. K. Benicewicz, J. P. Roberts, and A. J. Taylor, “Scaling of terahertz radiation from large-aperture biased photoconductors”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**,(1994)
- [7] M. Van Exter, Ch. Fattinger, D. Grischkowsky, “Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor”, *Opt. Lett.*, **14**, 1128 (1989)
- [8] C. W. Chen, T. T. Tang, S. H. Lin, J. Y. Huang, C. S. Chang, P. K. Chung, S.T. Yen, and C. L. Pan, “Optical properties and potential applications of

- ϵ -GaSe at terahertz frequencies”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **26**, 9 (2009)
- [9] Tsung-Ta Tang, “Study on the Alignment Properties of Liquid Crystal on the Substrate with Anodic Aluminum Oxide Films and the Grooved PDMS Substrate”, 國立交通大學光電工程學系博士論文(2009)
- [10] S. Chandrasekhar, “Liquid Crystal”, **2nd ed.** Cambridge, New York,(1992)
- [11] Xiangyi Nie, Haiqing Xianyu, Ruibo Lu, Thomas X. Wu, and Shin-Tson Wu, “Pretilt Angle Effects on Liquid Crystal Response Time”, *Journal of Display Technology*, **3**, 280(2007)
- [12] D. W. Berreman, “Solid Surface Shape and the Alignment of an Adjacent Nematic Liquid Crystal”, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 1683–1686 (1972)
- [13] J. M. Geary, J. W. Goodby, A. R. Kmetz, and J. S. Patel, “The mechanism of polymer alignment of liquid–crystal materials”, *J. Appl. Phys.* **62**,4100 (1987)
- [14] C. P. Chen, S. P. Preman, T.-H. Yoon, and J. C. Kim, “Dual-mode operation of dual-frequency liquid crystal cell by horizontal switching”, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 123505(2008)
- [15] A. B. Golovin, S. V. Shiyankovskii, and O. D. Lavrentovich, “Fast switching dual-frequency liquid crystal optical retarder, driven by an

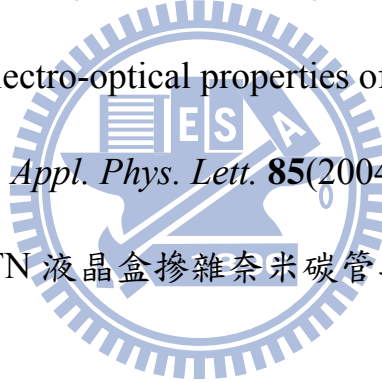
amplitude and frequency modulated voltage”, *Appl. Phys. Lett.* **83**,
3864(2003)

[16] 李曾申, “雙頻液晶中分子轉動與電場頻率相依特性之研究”, 國立中正
大學光機電整合工程研究所碩士論文(2006)

[17] Cho-Fan Hsieh, “Design and Measurement of Liquid Crystals Devices in
Terahertz Frequency Range”, 國立交通大學電子物理學系博士論文
(2009)

[18] Wei Lee, Chun-Yu Wang, and Yu-Cheng Shih, “Effects of carbon
nanosolids on the electro-optical properties of a twisted nematic
liquid-crystal host”, *Appl. Phys. Lett.* **85**(2004)

[19] 潘鴻至, 黃啟炎, “TN 液晶盒摻雜奈米碳管之光電響應研究”



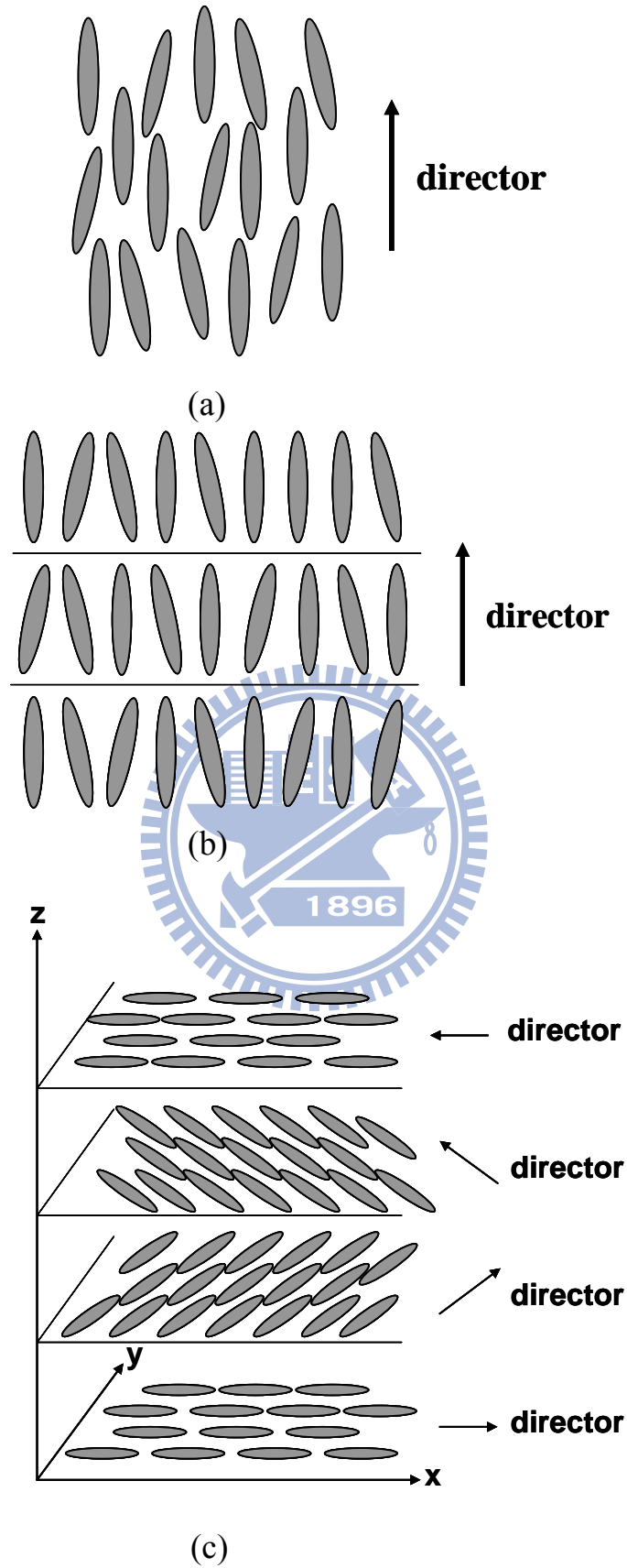


圖 1-2.1 液晶的種類 (a)向列型液晶 (b)層狀液晶 (c)膽固醇型液晶

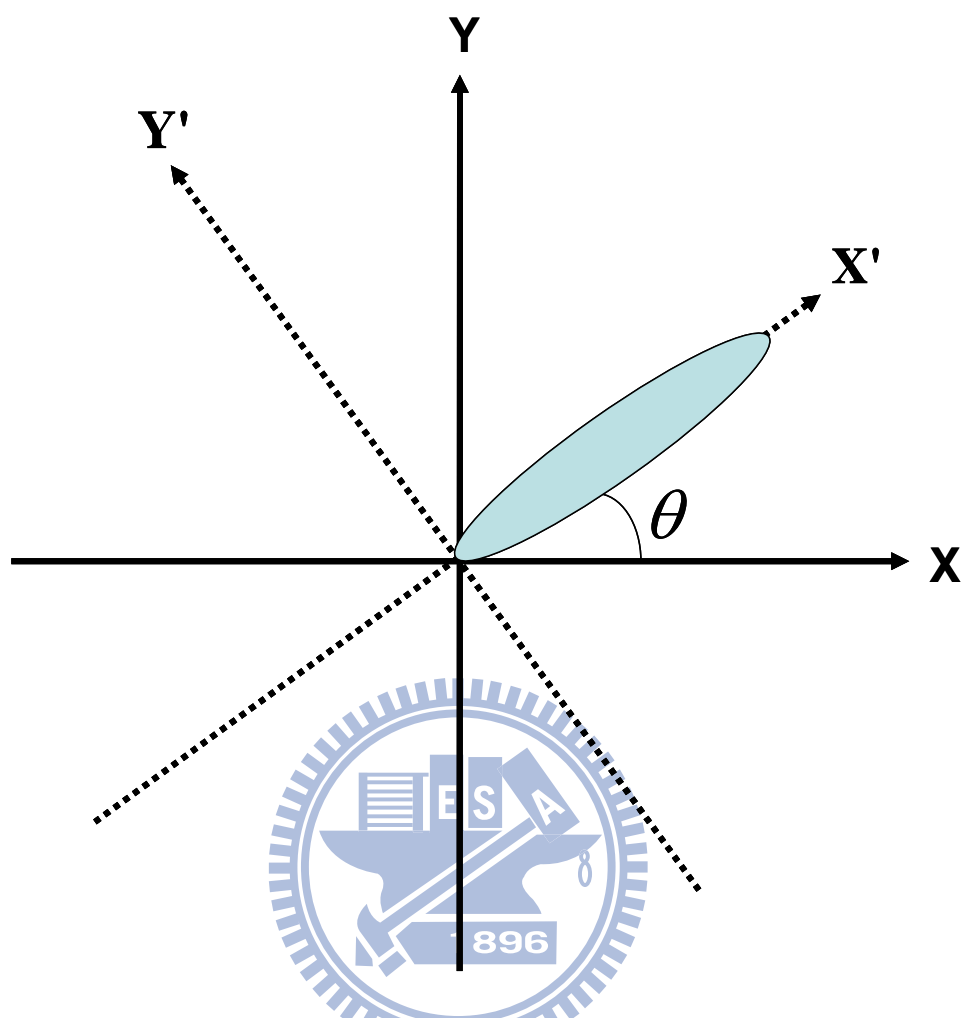


圖 2-1 座標轉換示意圖。液晶分子長軸與起偏器的偏振方向夾了一個角度 θ

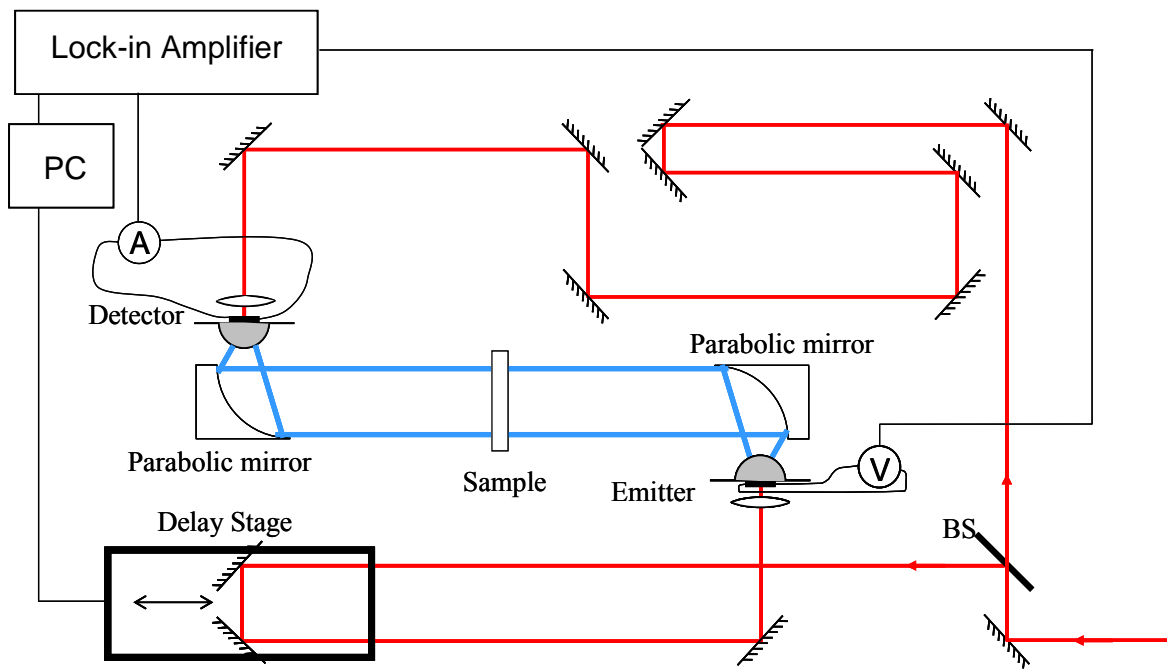


圖 2-2.1 THz-TDS 系統架設圖

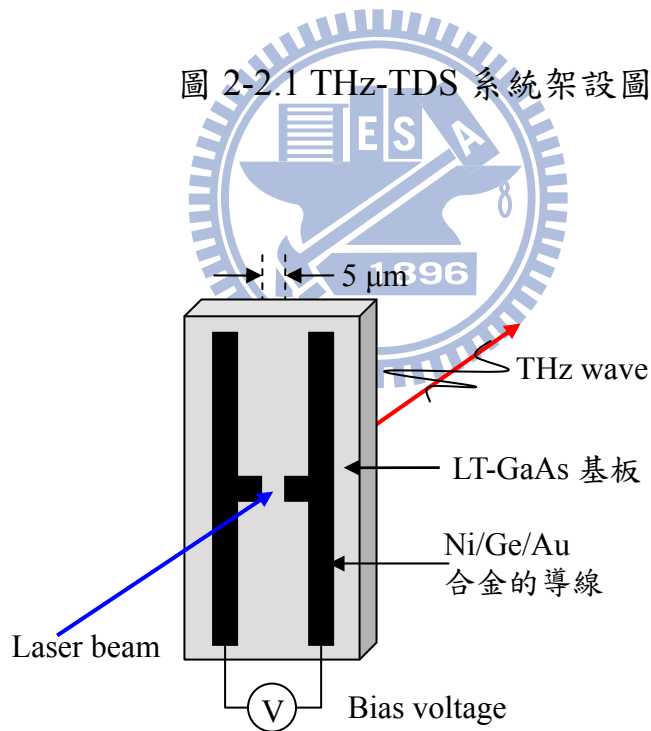
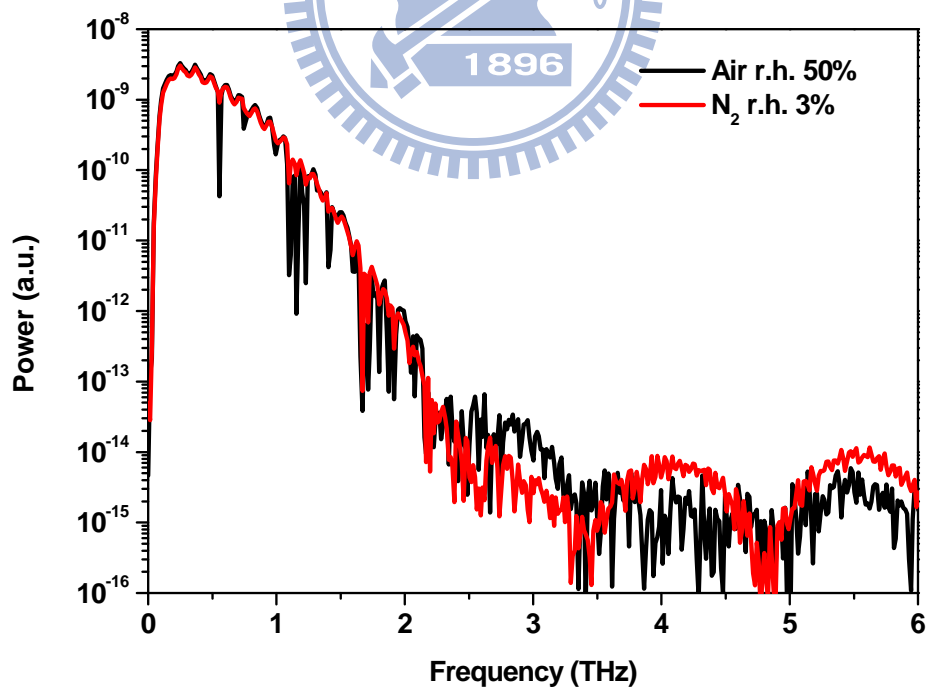
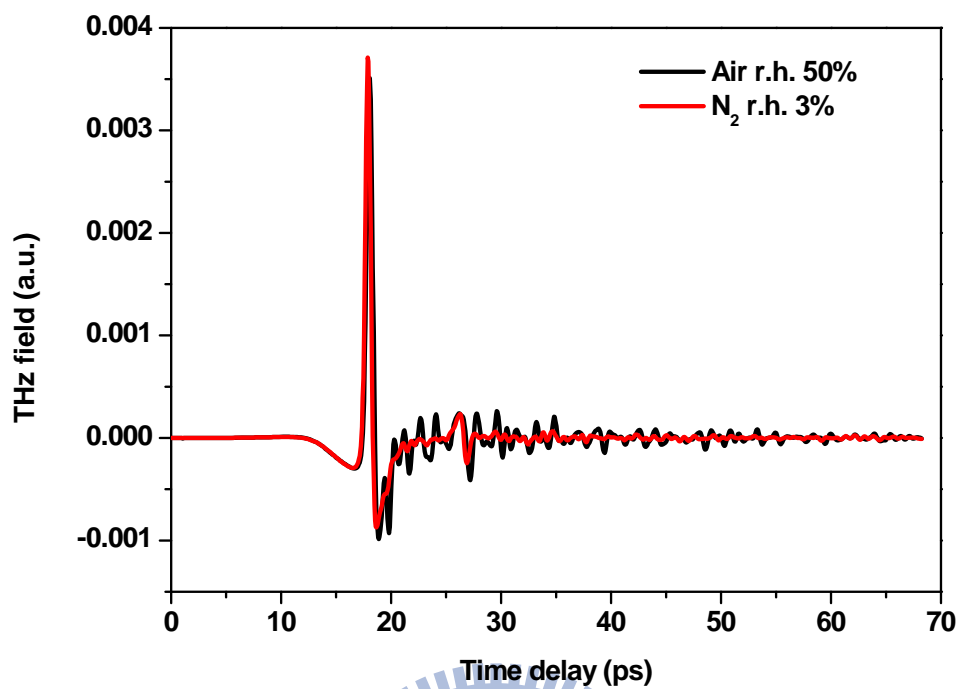


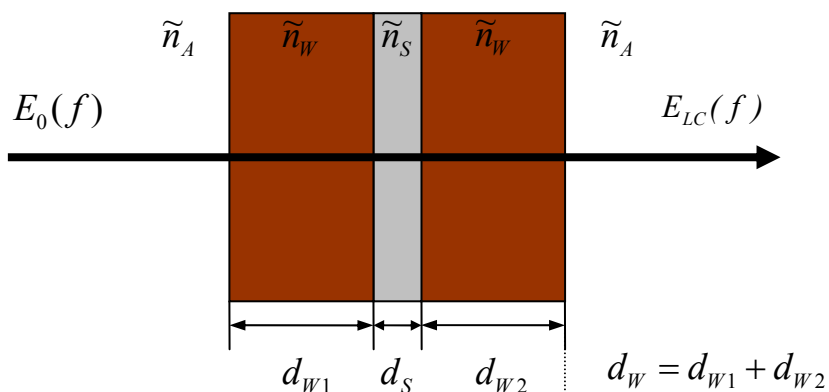
圖 2-2.2 天線示意圖



(b)

圖 2-2.3 (a)兆赫波時域訊號 (b)兆赫波頻譜圖

(a) LC sample



(b) reference sample

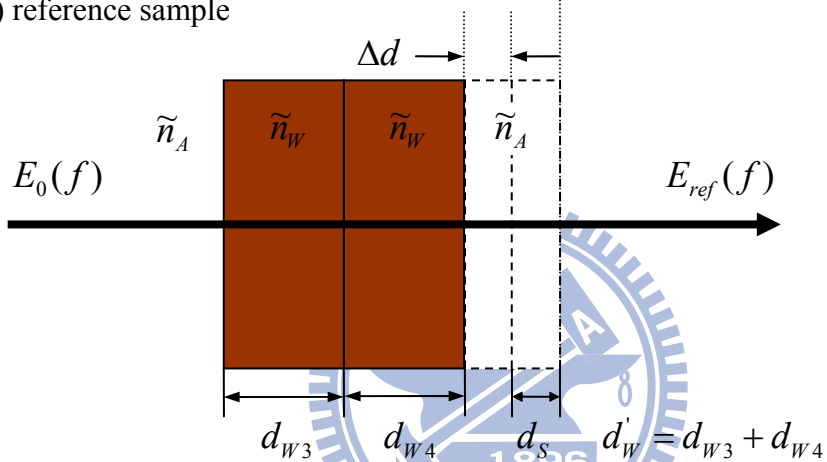


圖 2-3 (a) 兆赫波通過液晶樣品的示意圖 (b) 兆赫波通過參考樣品的示意圖

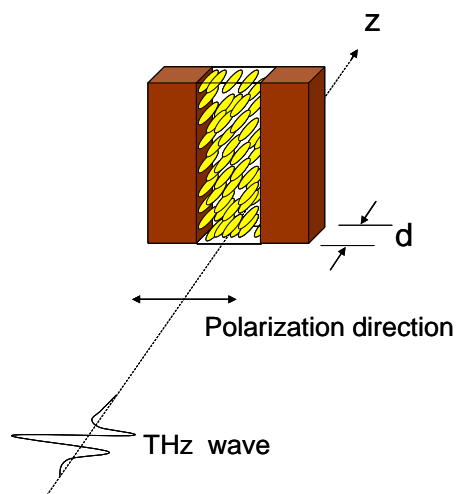


圖 2-4 兆赫波傳播方向示意圖。兆赫波沿著 z 方向傳播，通過液晶層厚度為 d 的垂直配向樣品

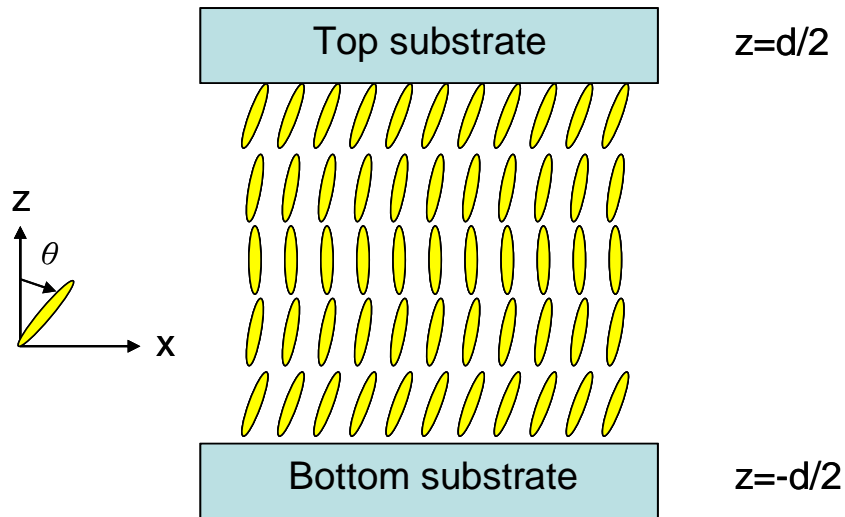


圖 2-5 反應時間推導樣品示意圖

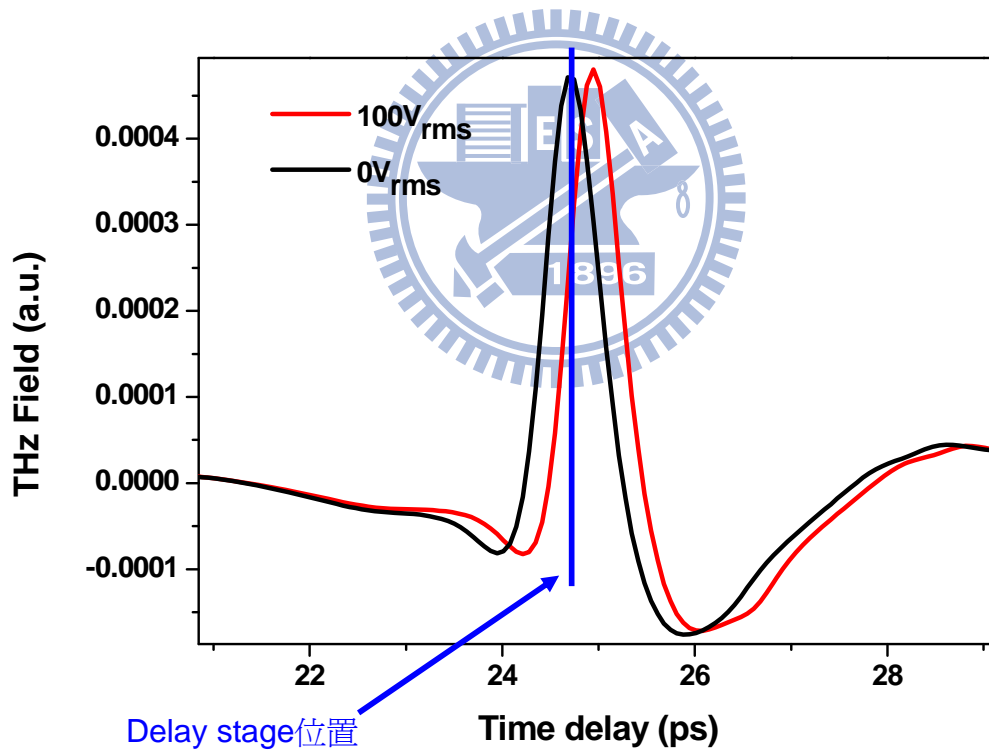


圖 2-6 量測反應時間方法示意圖

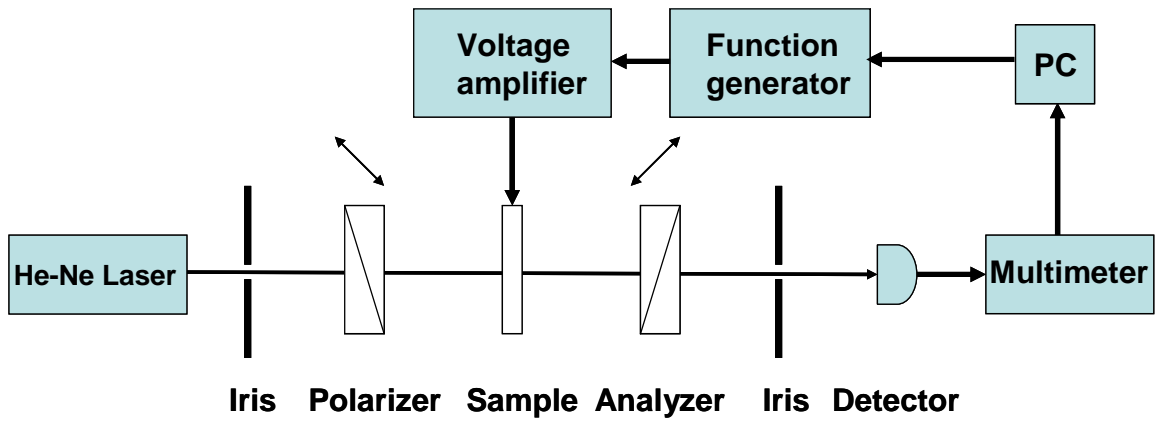


圖 4-1.1 加電壓量穿透率實驗裝置圖

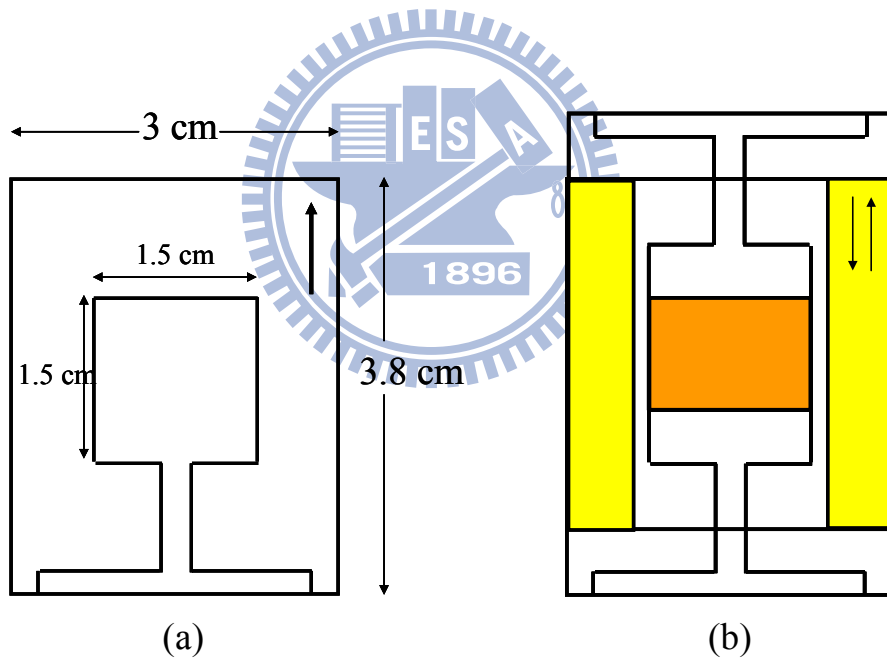
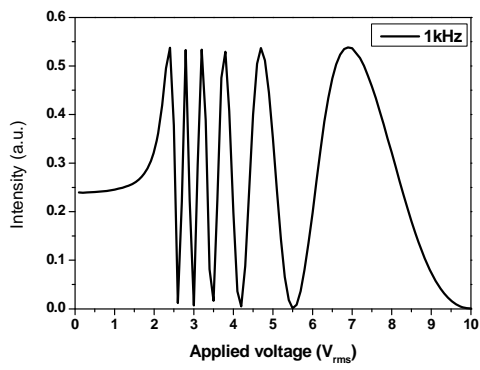
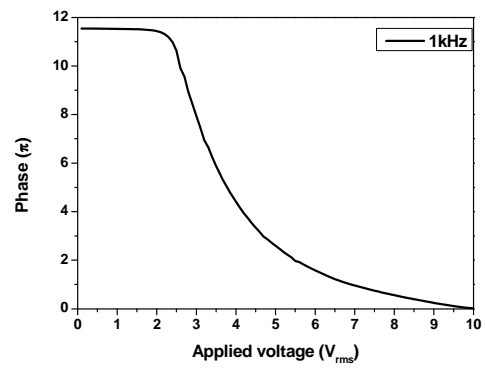


圖 4-1.2 (a)具有 ITO 圖形的玻璃

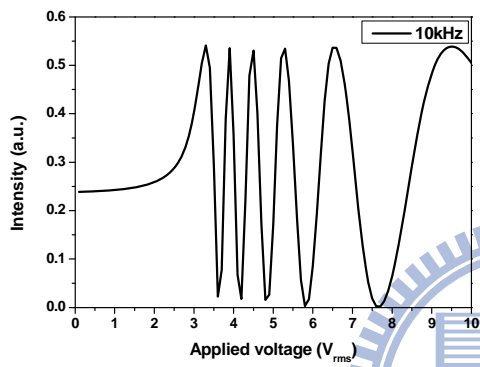
(b)兩片經過相同步驟處理過的 ITO 玻璃夾成反平行液晶盒的示意圖



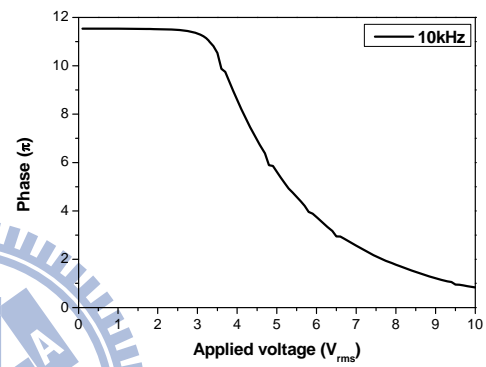
(a)



(b)

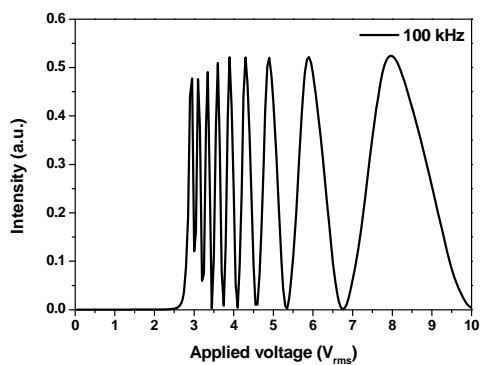


(c)

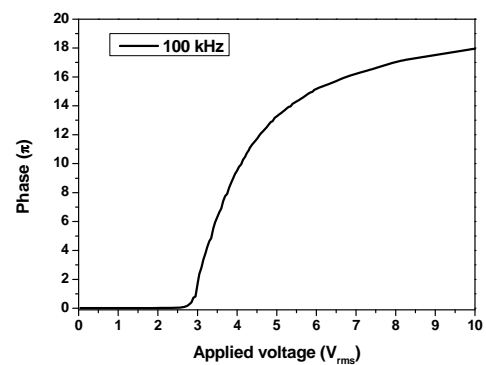


(d)

圖 4-1.3 (a)水平配向頻率操作在 1kHz，光強度和外加電壓的關係圖
 (b)水平配向頻率操作在 1kHz，相位和外加電壓的關係圖
 (c)水平配向頻率操作在 10kHz，為光強度和外加電壓的關係圖
 (d)水平配向頻率操作在 10kHz，相位和外加電壓的關係圖

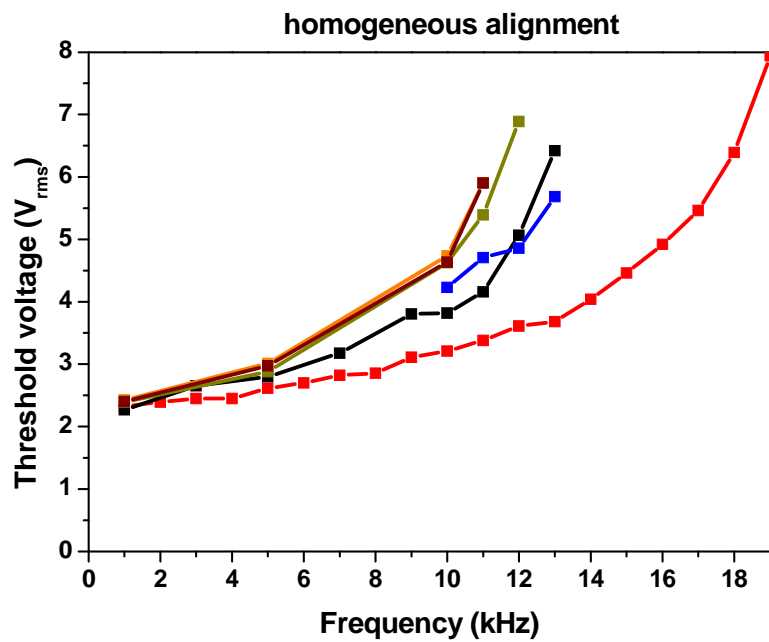


(a)

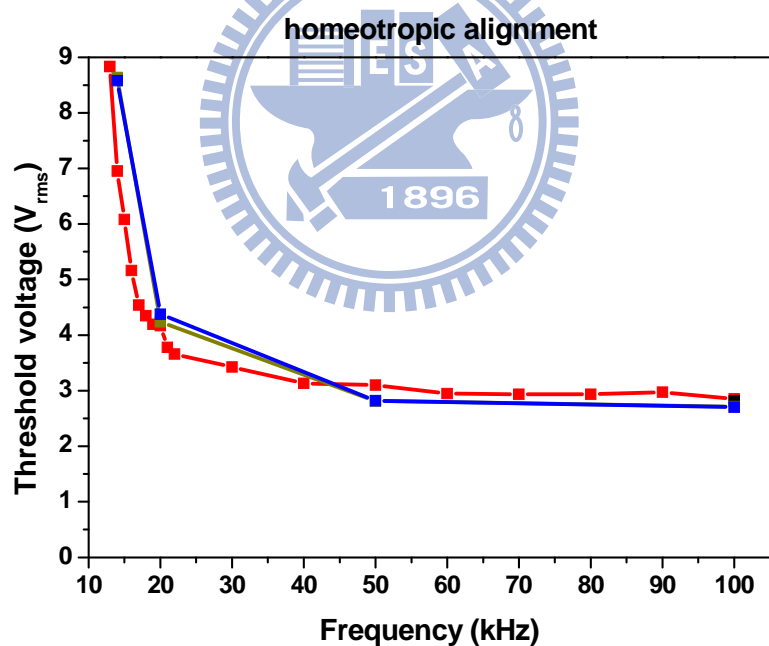


(b)

圖 4-1.4 (a)垂直配向頻率操作在 100kHz，光強度和外加電壓的關係圖
 (b)垂直配向頻率操作在 100kHz，相位和外加電壓的關係圖



(a)



(b)

圖 4-1.5 (a) 水平配向的樣品臨界電壓對不同外加頻率的關係圖

(b) 垂直配向的樣品臨界電壓對不同外加頻率的關係圖。

相同顏色的連線代表同一次量測的結果，不同顏色代表不同次量測的結果。

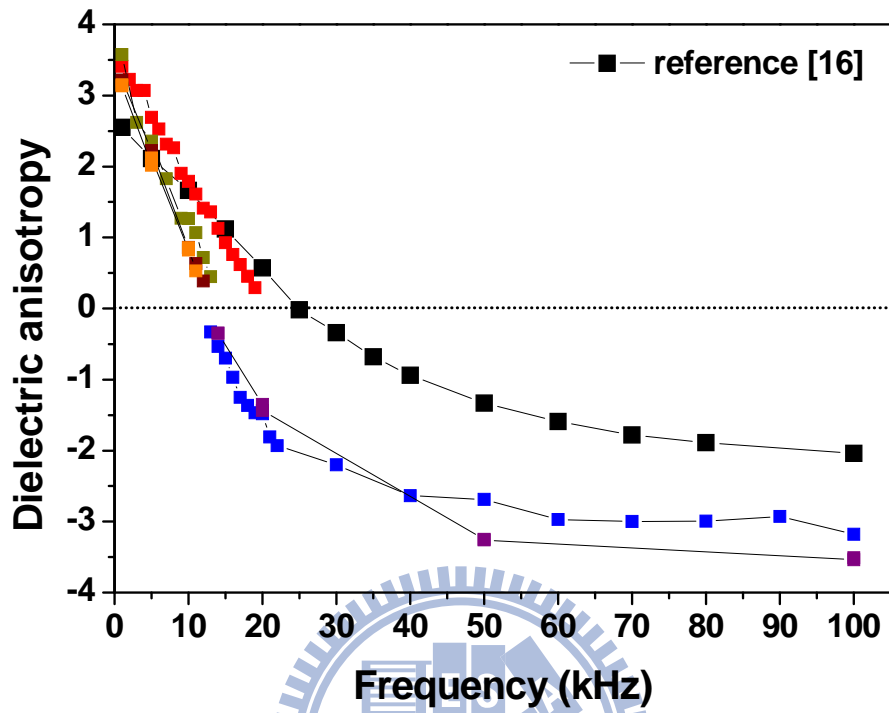


圖 4-1.6 介電異方性和外加電壓頻率的關係圖。黑線為文獻[16]的結果，其他顏色為本實驗量測到的結果。

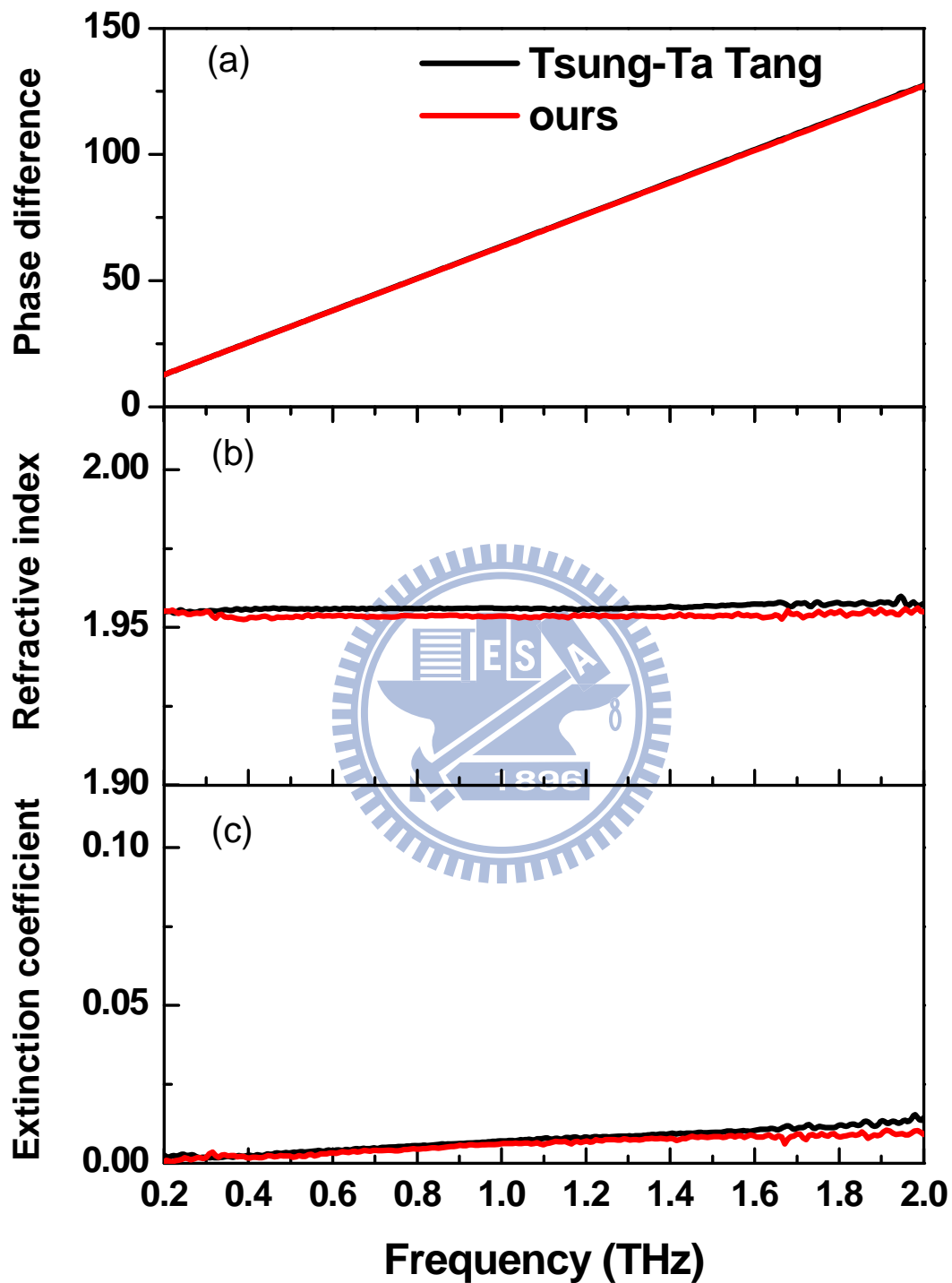
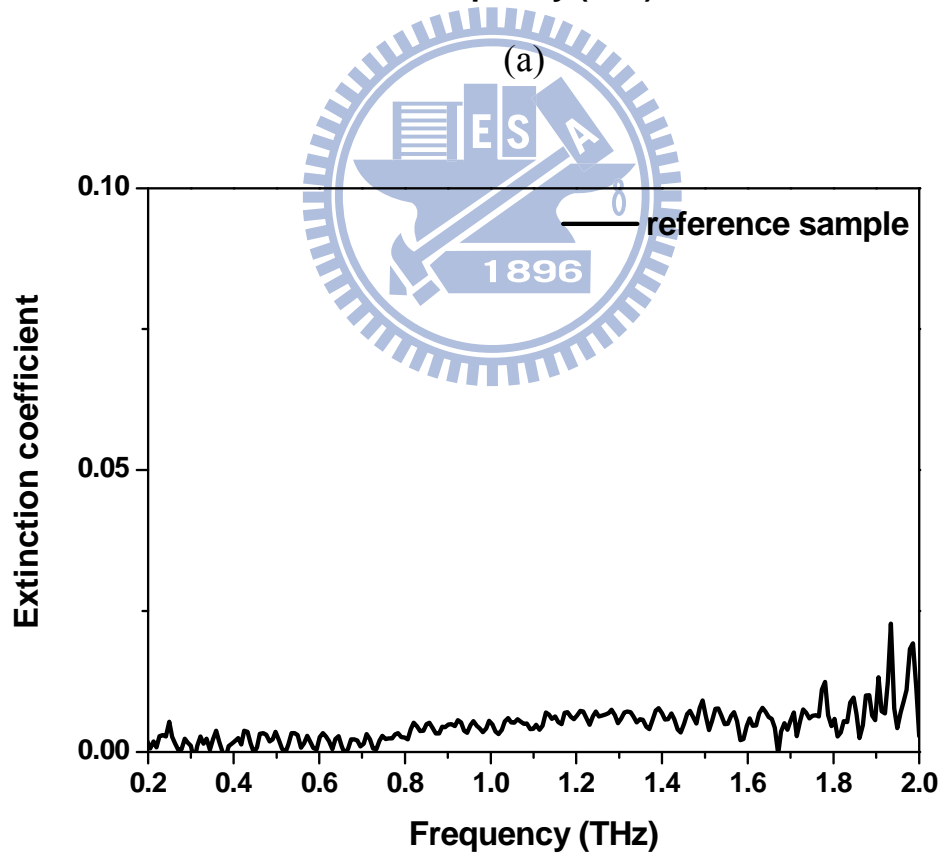
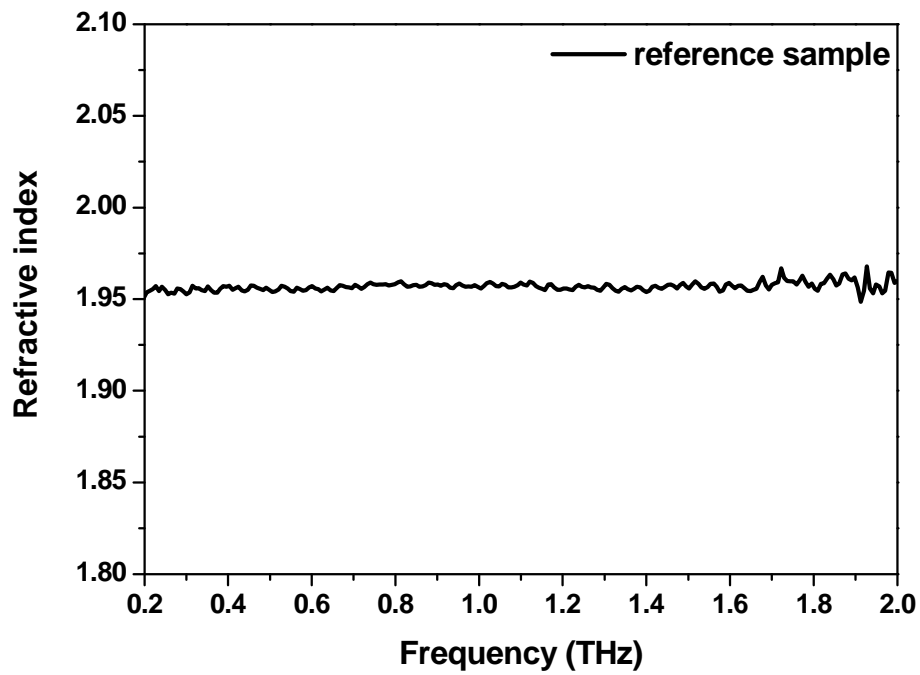


圖 4-2.1 (a)厚石英玻璃相位和頻率的關係圖

(b)厚石英玻璃折射率實部和頻率的關係圖

(c)厚石英玻璃折射率虛部(κ)和頻率的關係圖



(b)

圖 4-2.2 (a)參考樣品折射率實部和頻率的關係圖

(b)參考樣品折射率虛部和頻率的關係圖

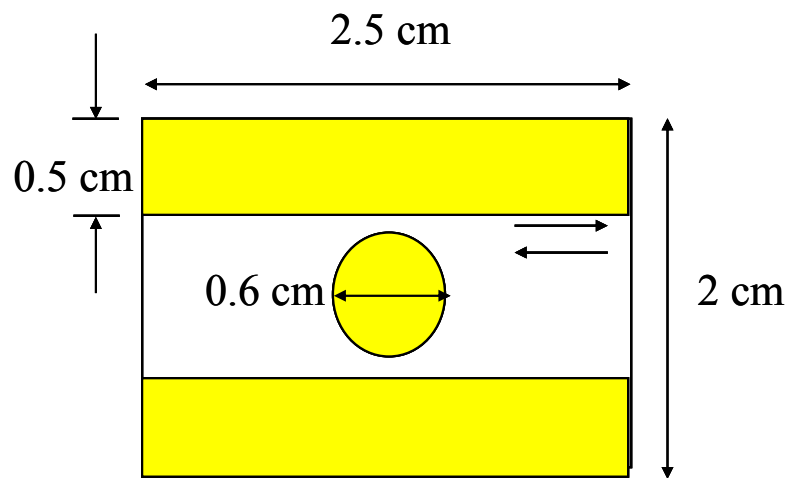


圖 4-2.3 折射率樣品示意圖

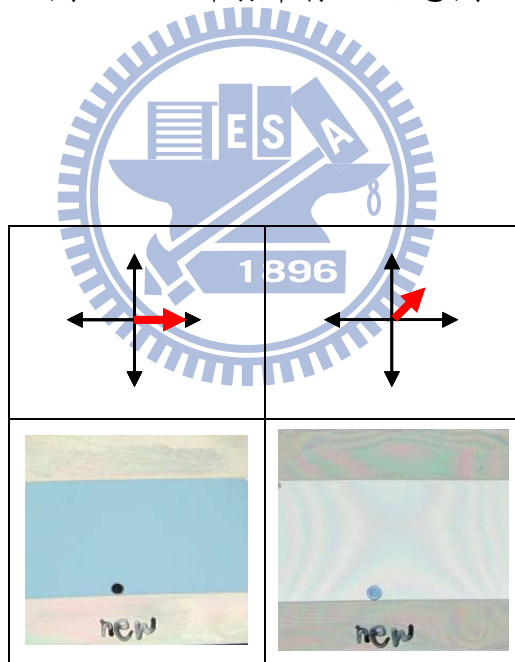
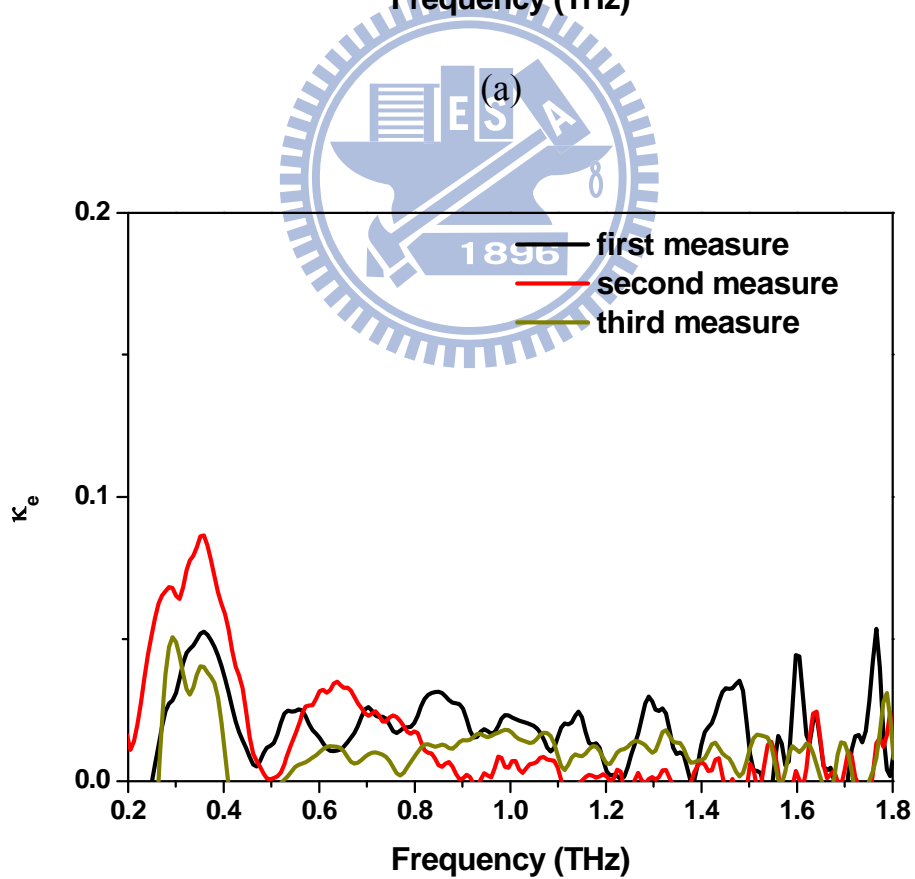
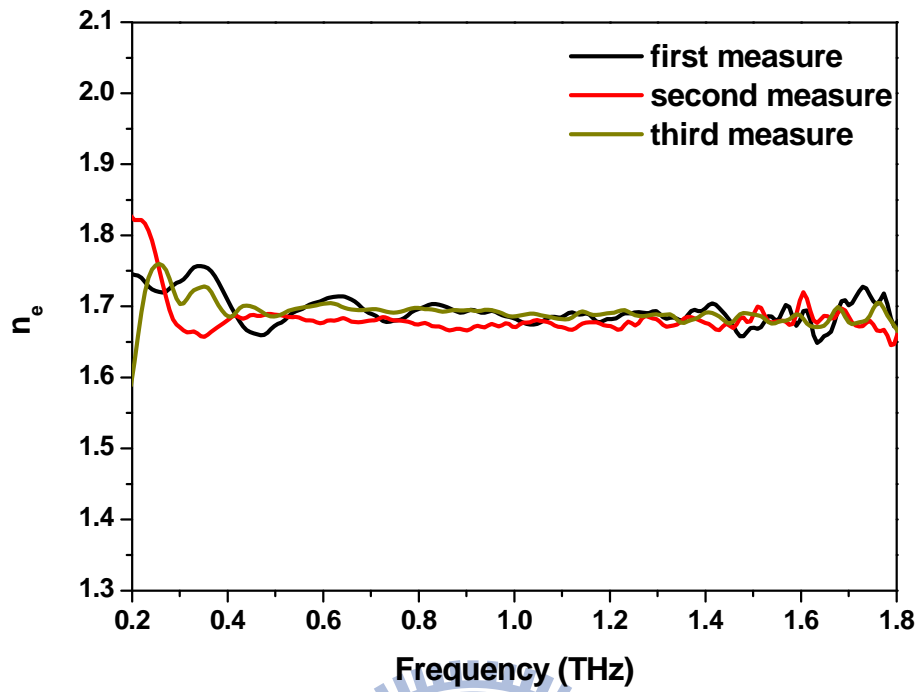


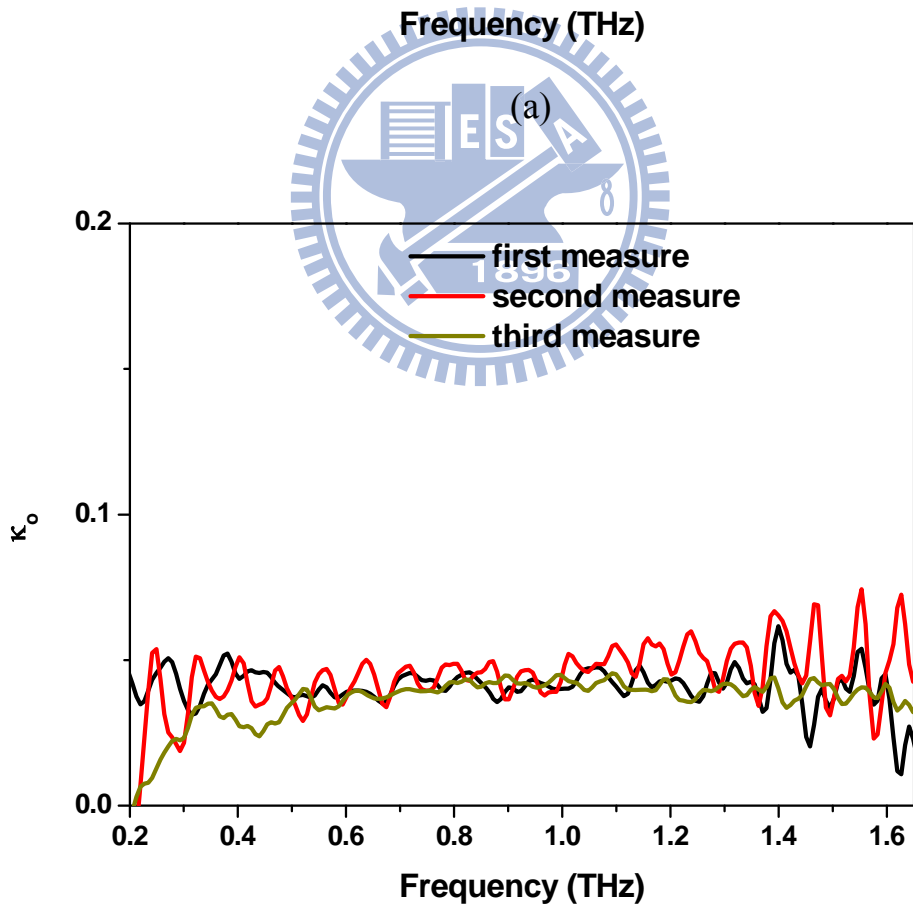
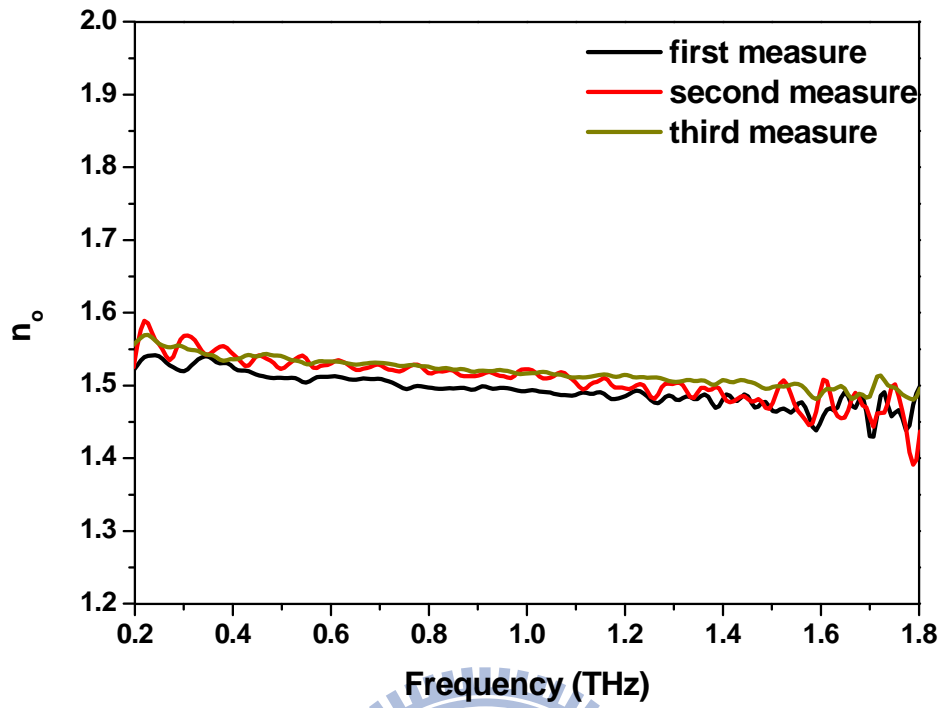
圖 4-2.4 製作好的樣品在正交偏振片下所看到的亮暗態



(b)

圖 4-2.5 (a)非尋常光(Extraordinary Ray, e-ray)折射率實部和頻率的關係圖

(b)非尋常光折射率虛部(κ_e)和頻率的關係圖



(b)

圖 4-2.6 (a)尋常光(Ordinary Ray, o-ray)折射率實部和頻率的關係圖

(b)尋常光折射率虛部(κ_o)和頻率的關係圖

side view

$L = 12\text{mm}$

$d = 600\ \mu\text{m}$

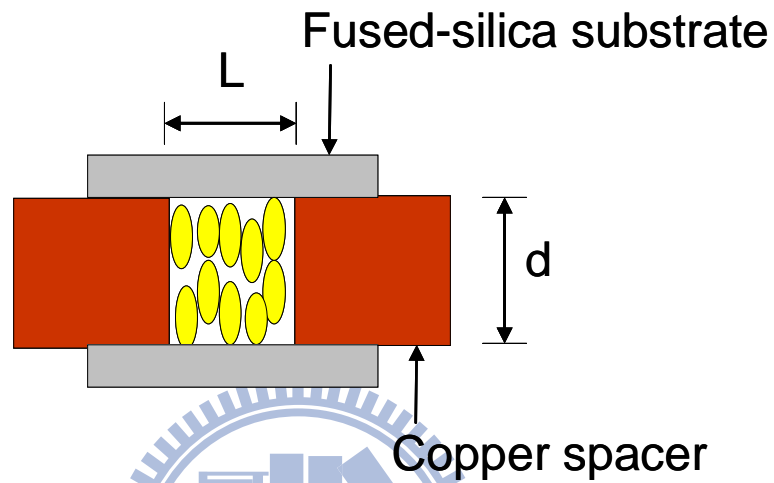


圖 4-3.1 垂直配向相位延遲器結構示意圖

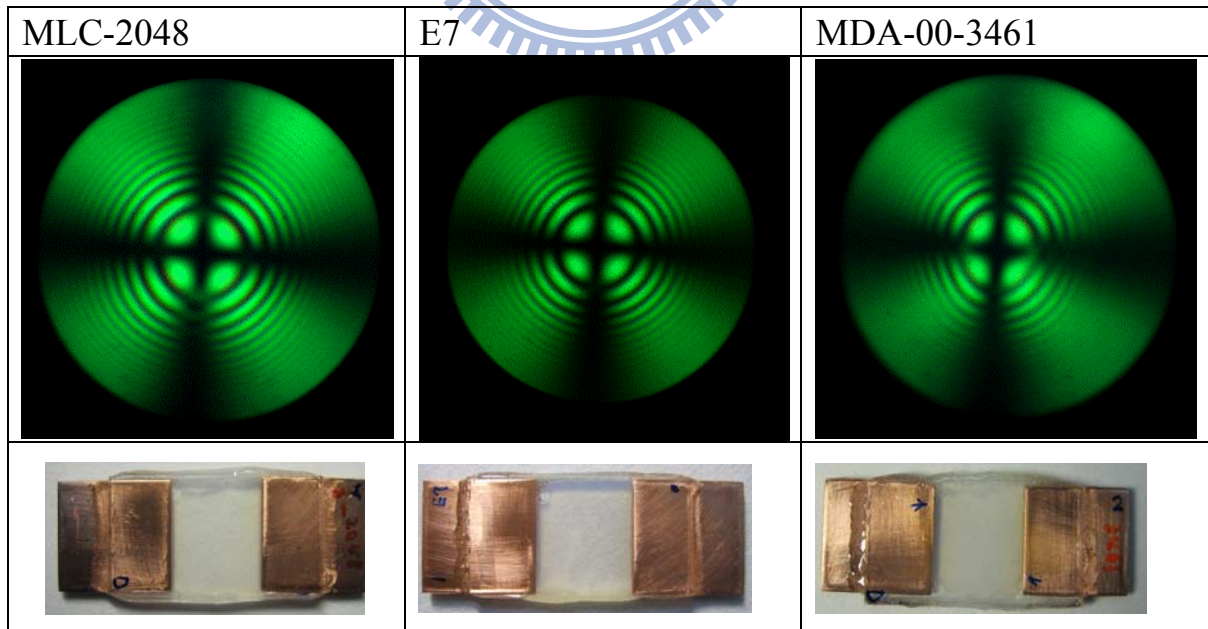


圖 4-3.2 MLC-2048、E7 和 MDA-00-3461 的 conoscopic patterns

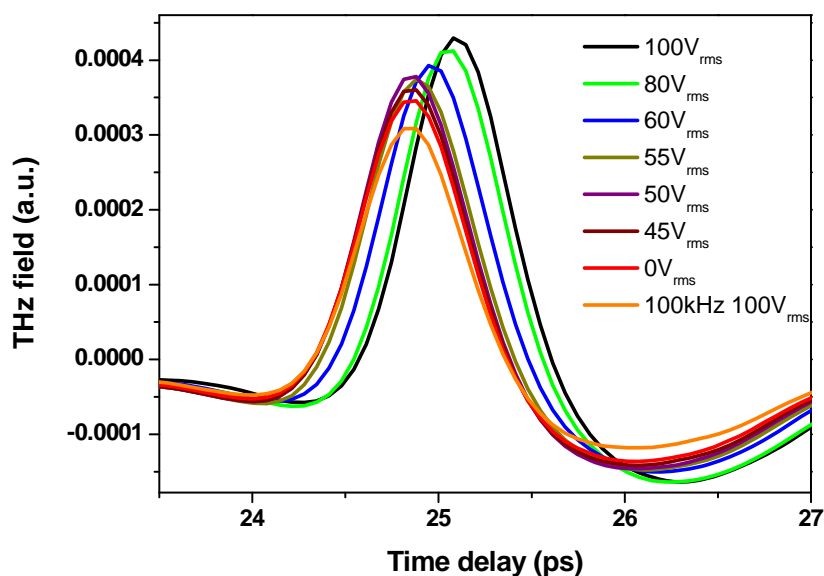


圖 4-3-1 (a) 雙頻液晶(MLC-2048)相位延遲器在不同外加電壓下量測到的兆赫波時域訊號

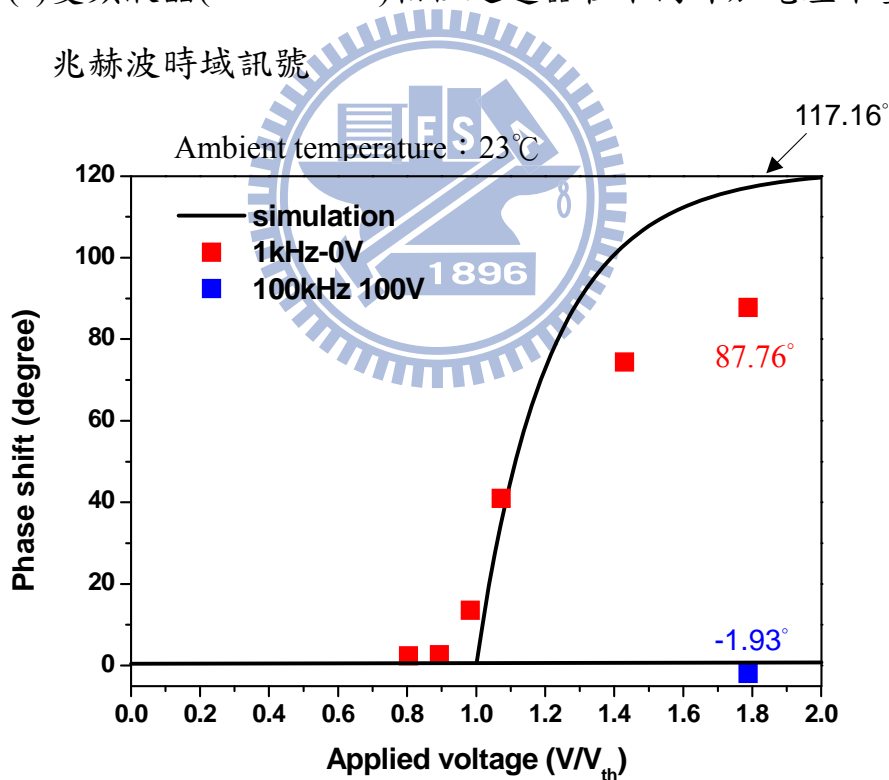


圖 4-3-1 (b) 雙頻液晶在不同外加電壓下的相位延遲關係圖，紅點為利用正型液晶的操作頻率 1kHz 所得到不同外加電壓的相位減去沒有外加電壓下的相位結果，藍點為利用負型液晶的操作頻率 100kHz 100V_{rms} 所得到相位減去沒有外加電壓下的相位結果，黑色實線為理論模擬的結果。

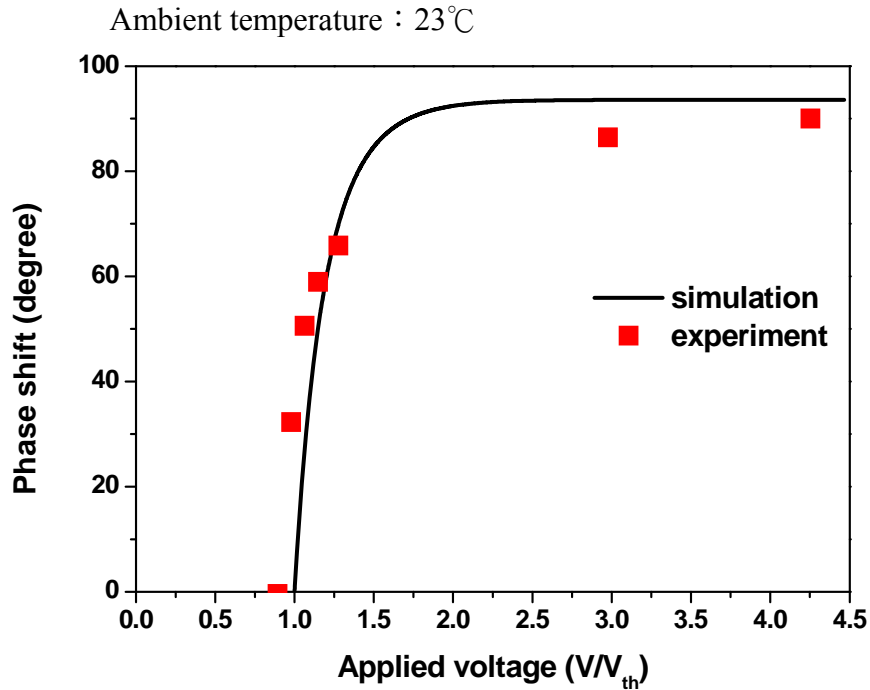


圖 4-3-2 E7 在不同外加電壓下的相位延遲關係圖，紅點為操作頻率 1kHz 所得到不同外加電壓的相位減去沒有外加電壓下的相位結果，黑色實線為理論模擬的結果。

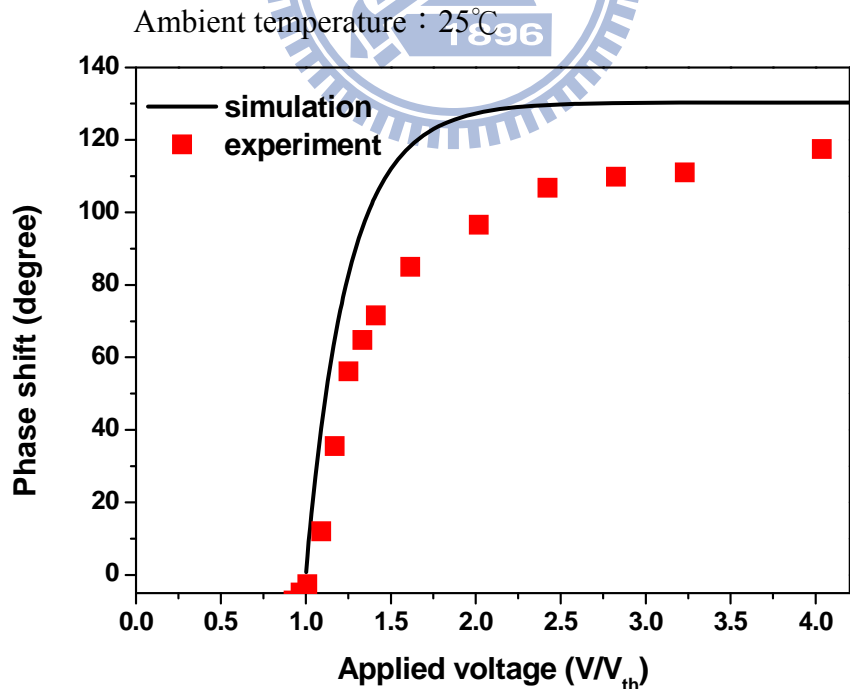


圖 4-3-3 MDA-00-3461 在不同外加電壓下的相位延遲關係圖，紅點為操作頻率 1kHz 所得到不同外加電壓的相位減去沒有外加電壓下的相位結果，黑色實線為理論模擬的結果。

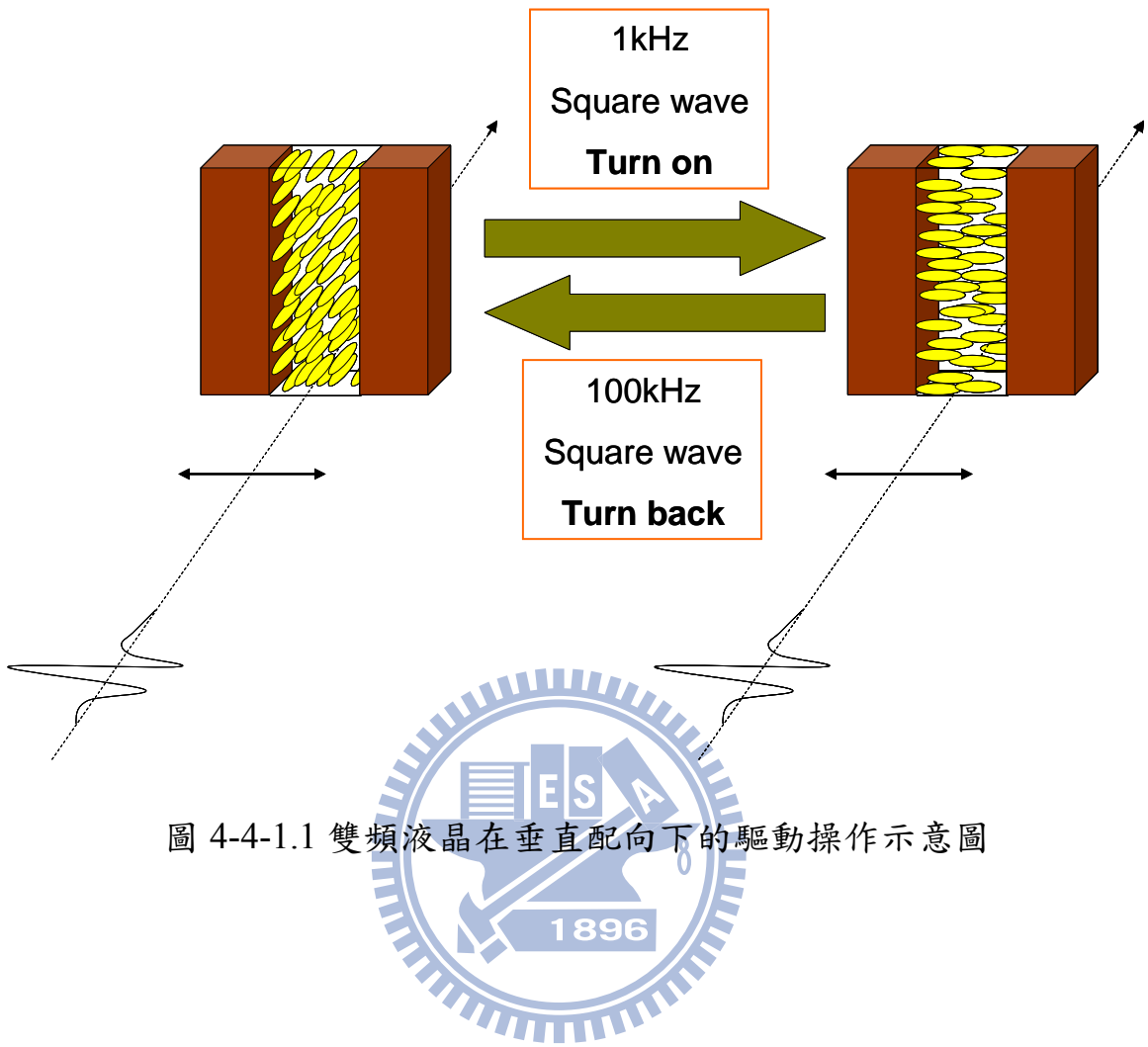


圖 4-4-1.1 雙頻液晶在垂直配向下的驅動操作示意圖

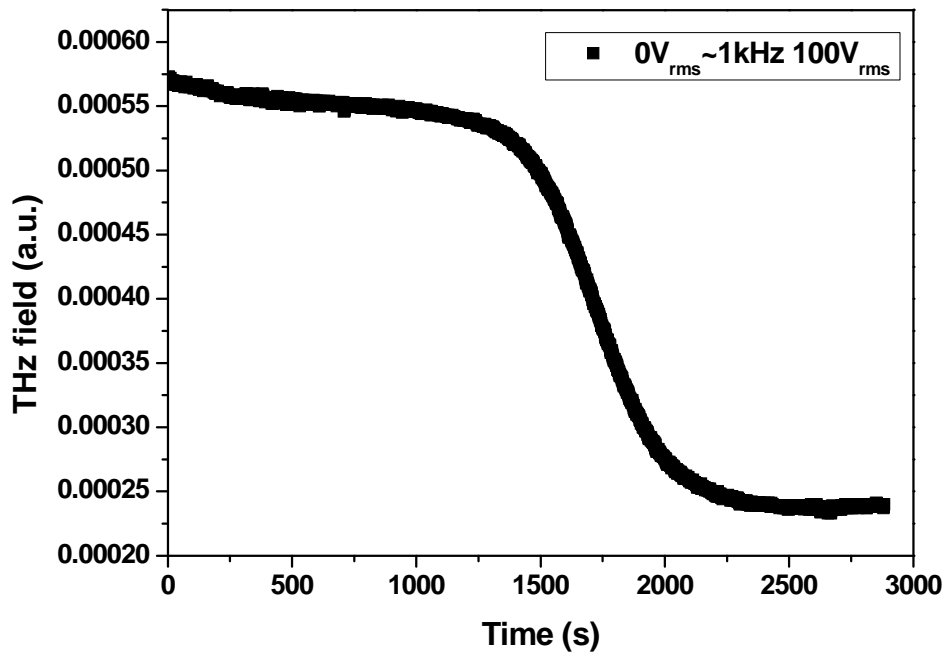


圖 4-4-1.2 (a) 雙頻液晶 turn on 階段利用 $0V_{rms} \sim 1kHz 100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

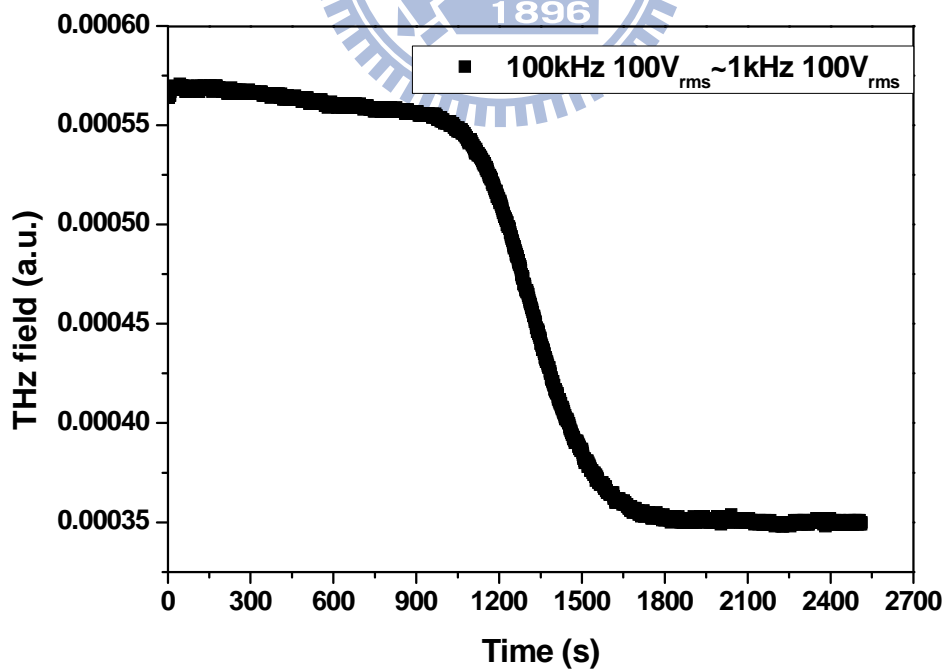


圖 4-4-1.2 (b) 雙頻液晶 turn on 階段利用 $100kHz 100V_{rms} \sim 1kHz 100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

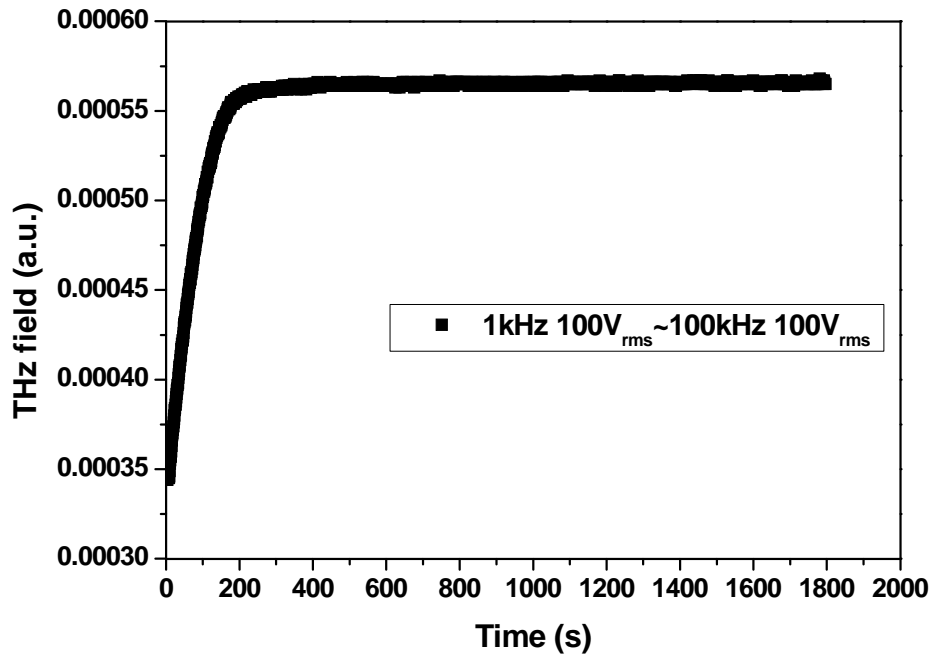


圖 4-4-1.3 (a) 雙頻液晶 turn back 階段利用 $1\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 100\text{kHz } 100V_{\text{rms}}$

量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

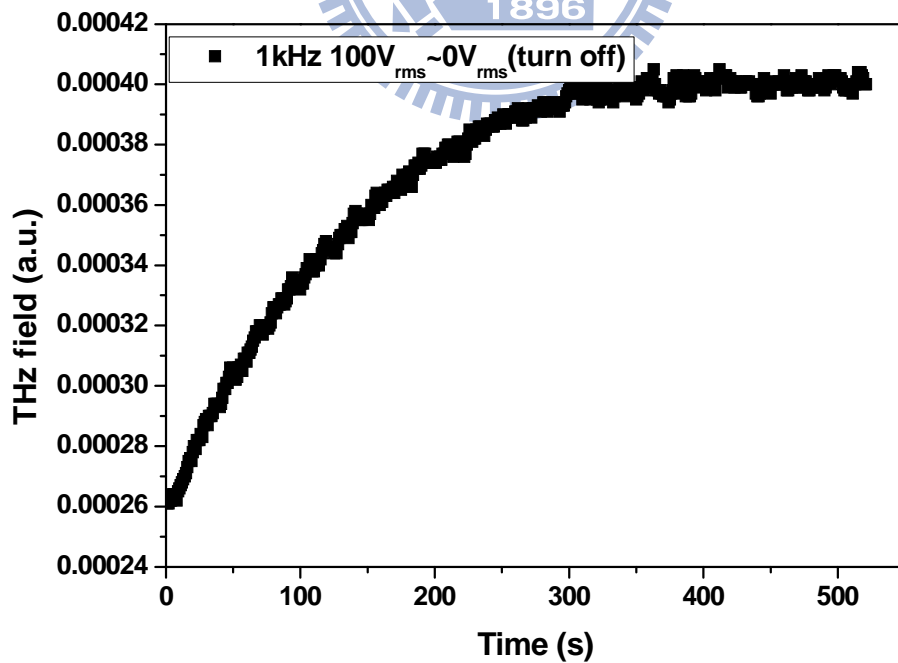
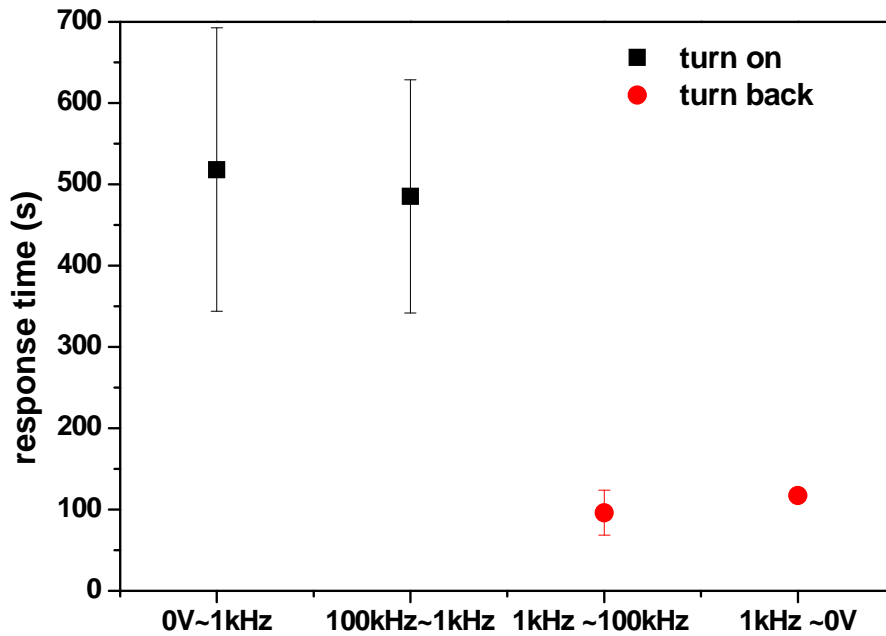


圖 4-4-1.3 (b) 雙頻液晶 turn back 階段利用 $1\text{kHz } 100V_{\text{rms}} \sim 0V_{\text{rms}}$ 量測到兆赫

波訊號強度和時間之關係圖



MLC-2048

圖 4-4-1.4 垂直配向雙頻液晶 MLC-2048 反應時間比較圖

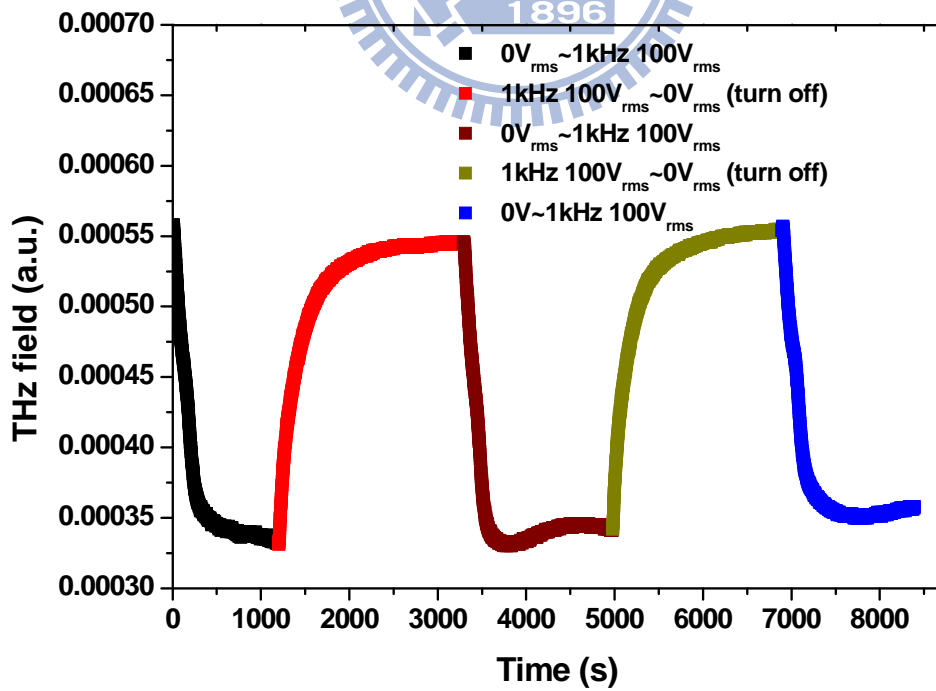


圖 4-4-1.5 E7 樣品兆赫波訊號強度和時間之關係圖

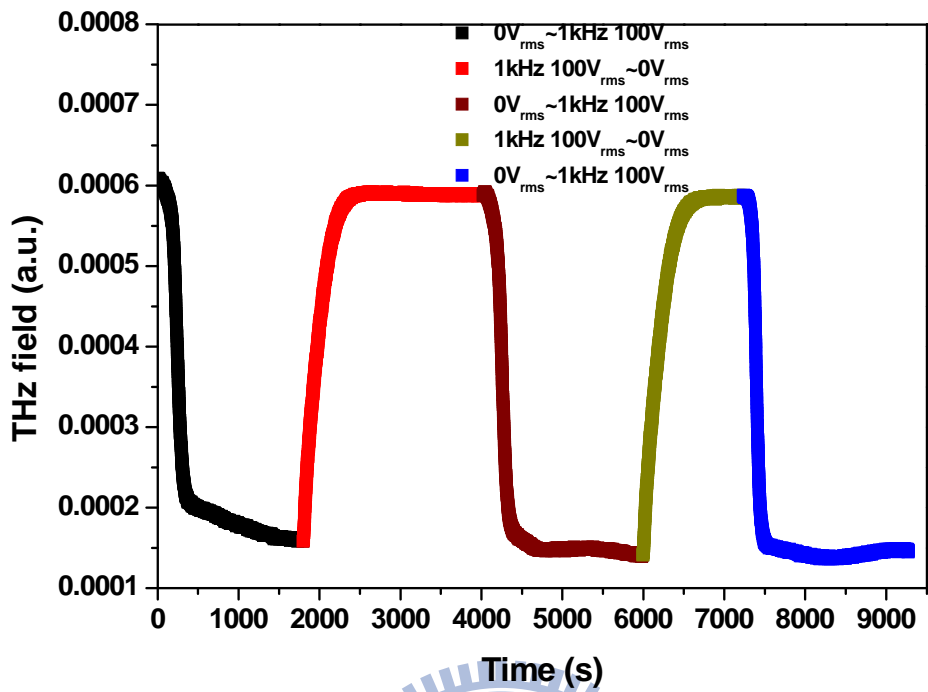


圖 4-4-1.6 MDA-00-3461 樣品兆赫波訊號強度和時間之關係圖

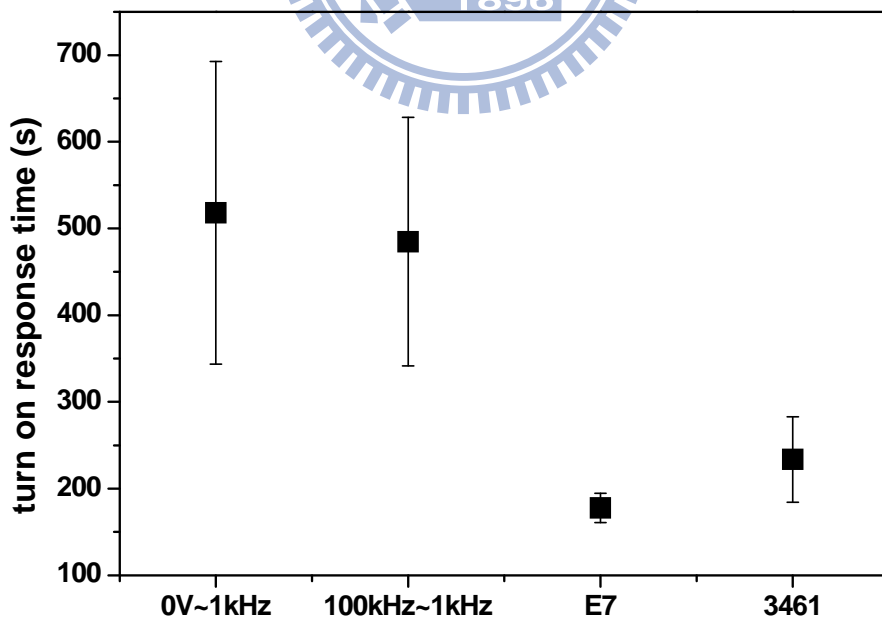


圖 4-4-1.7 三種液晶 turn on 反應時間的比較

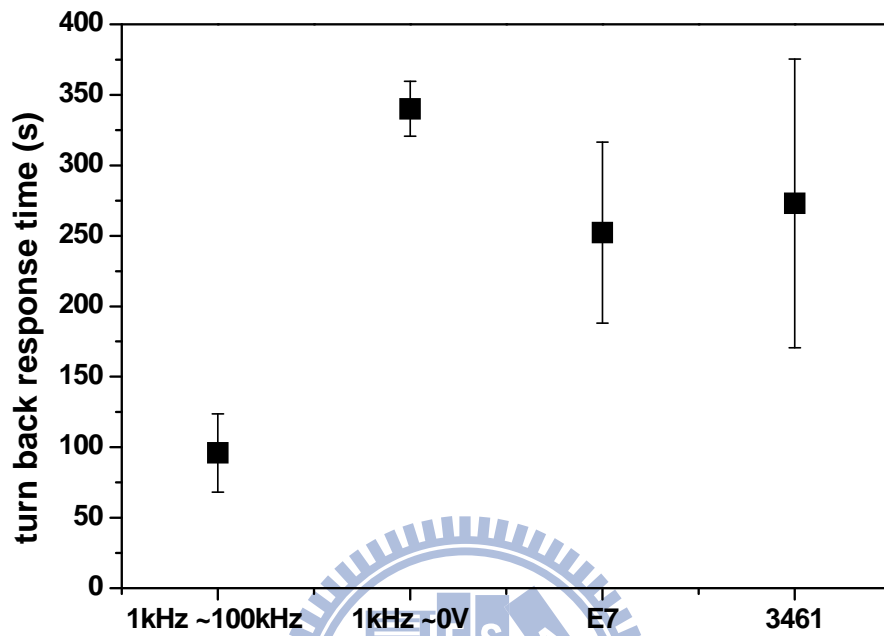


圖 4-4-1.8 三種液晶 turn back 反應時間的比較

side view

$L = 12\text{mm}$

$d = 600\ \mu\text{m}$

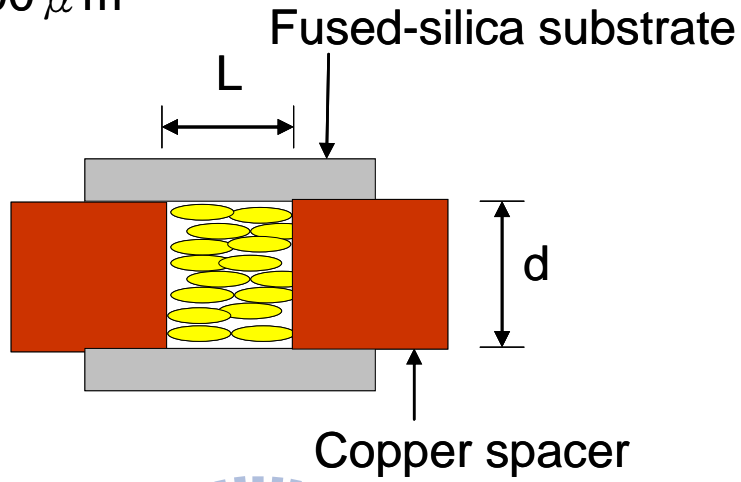


圖 4-4-2.1 水平配向相位延遲器結構示意圖

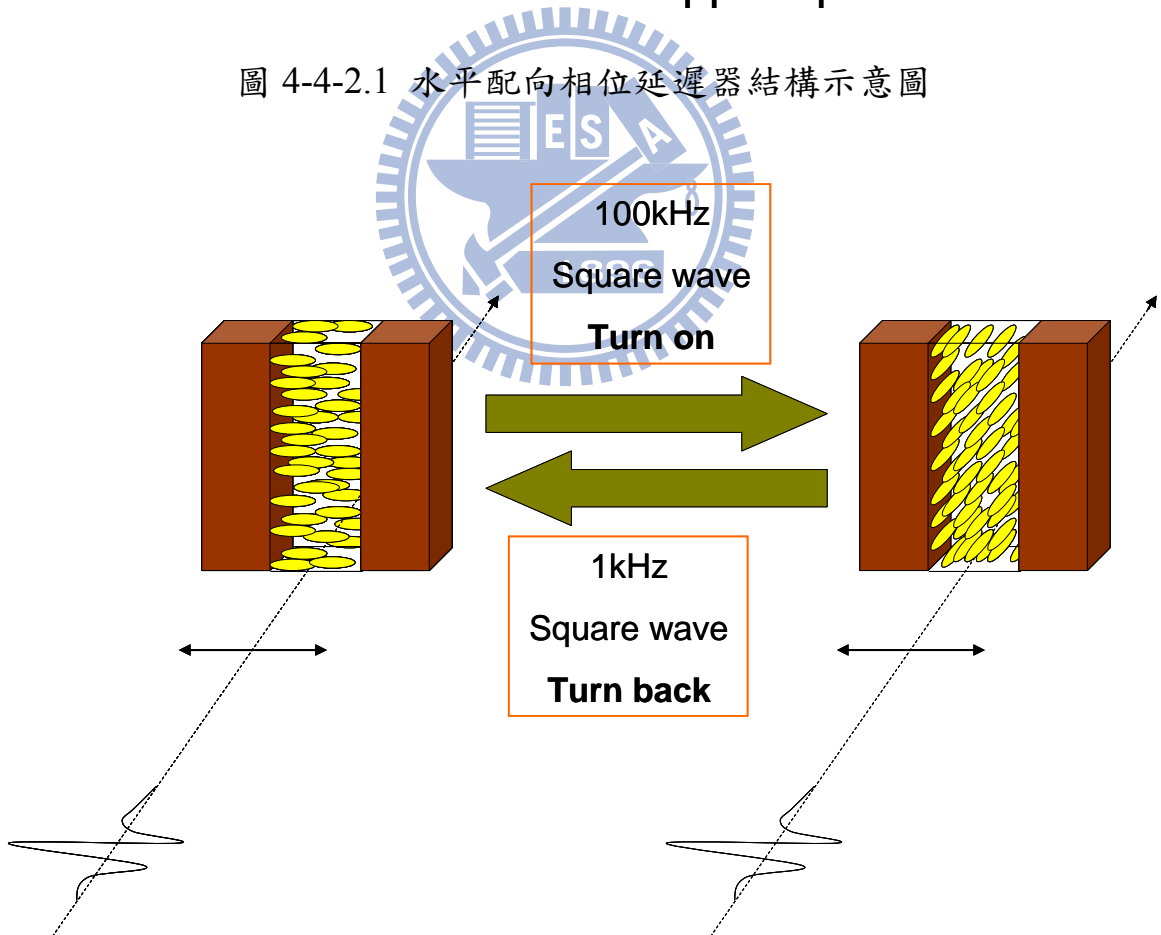


圖 4-4-2.2 雙頻液晶在水平配向下的驅動操作示意圖

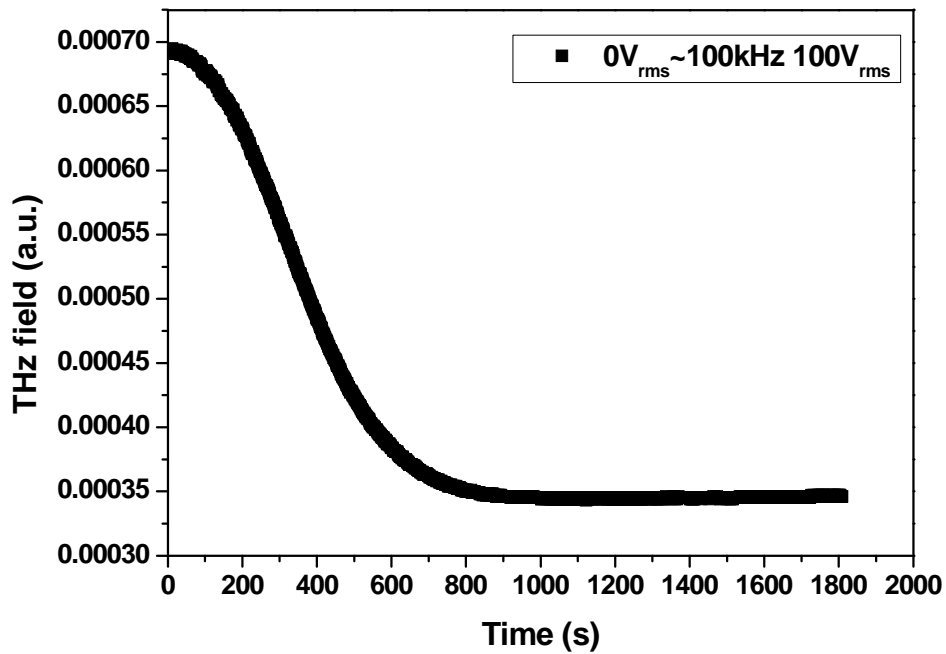


圖 4-4-2.3 (a) 雙頻液晶 turn on 階段利用 $0V_{rms} \sim 100kHz 100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

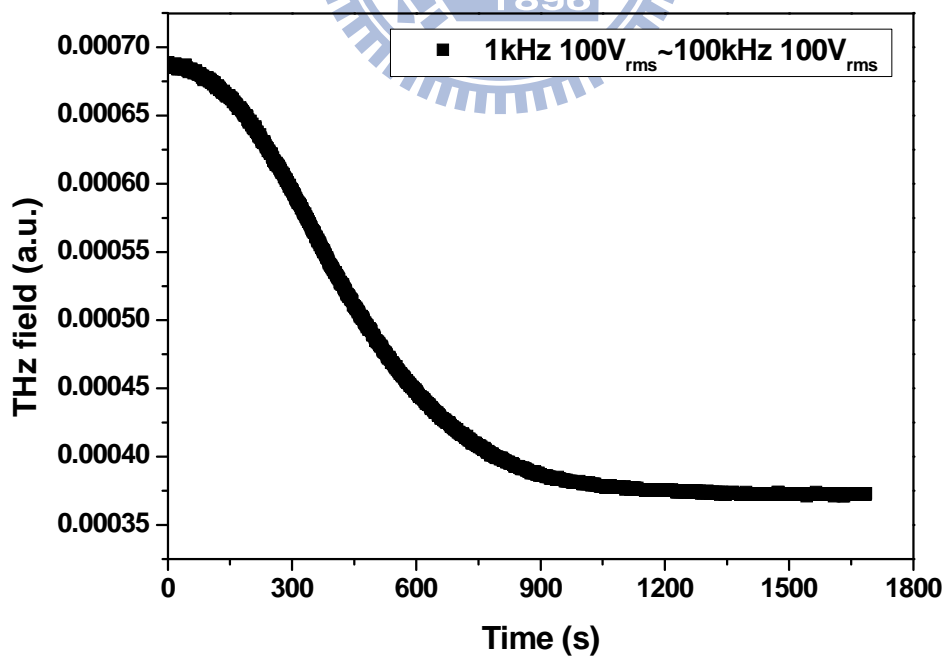


圖 4-4-2.3 (b) 雙頻液晶 turn on 階段利用 $1kHz 100V_{rms} \sim 100kHz 100V_{rms}$ 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

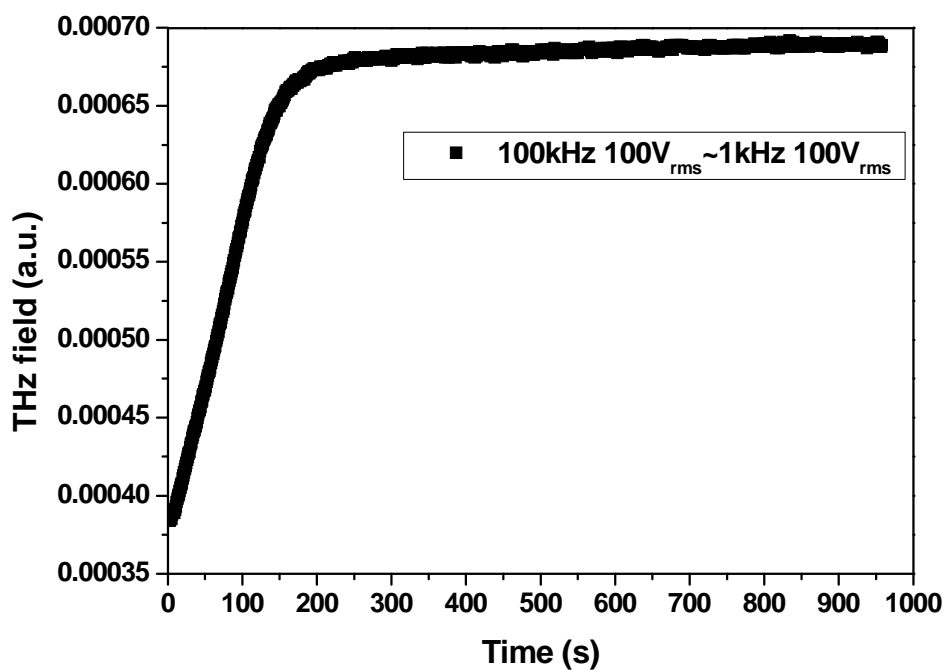


圖 4-4-2.4 (a)雙頻液晶 turn back 階段利用 100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

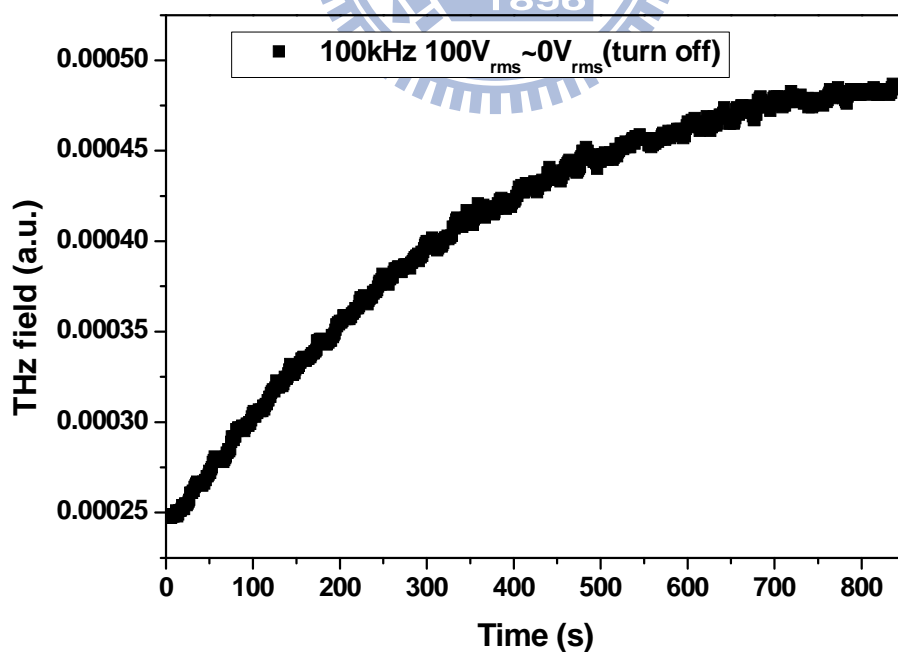


圖 4-4-2.4 (b)雙頻液晶 turn back 階段利用 100kHz 100V_{rms}~0V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

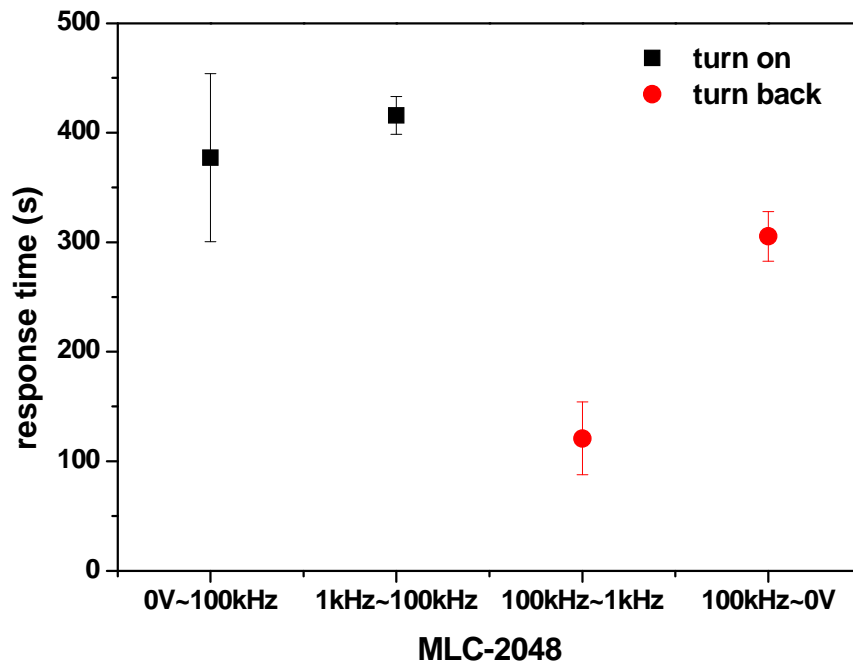


圖 4-4-2.5 水平配向雙頻液晶 MLC-2048 反應時間比較圖

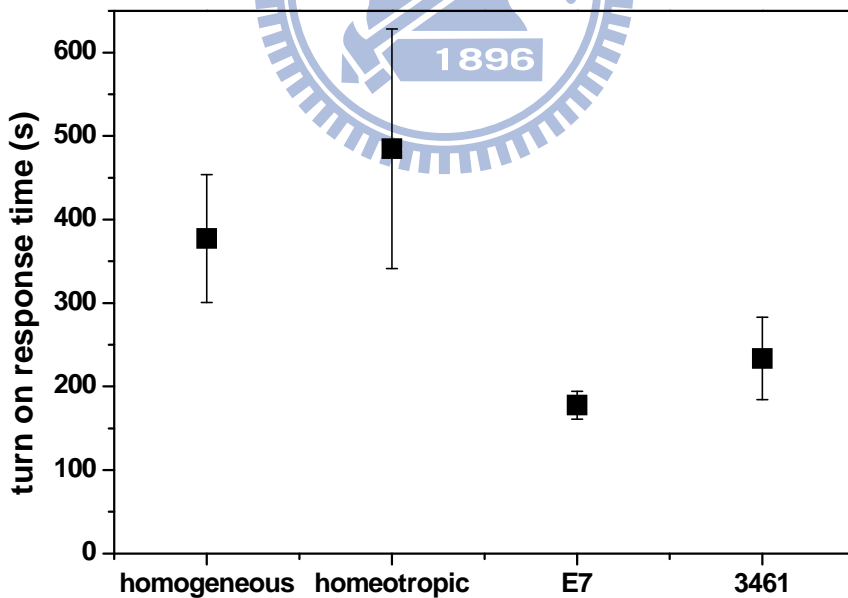


圖 4-4-2.6 把水平配向($0V_{rms} \sim 100kHz$ $100V_{rms}$)和垂直配向($100kHz$ $100V_{rms} \sim 1kHz$ $100V_{rms}$)較快的操作方式拿來和 E7、MDA-00-3461 比較 turn on 反應時間

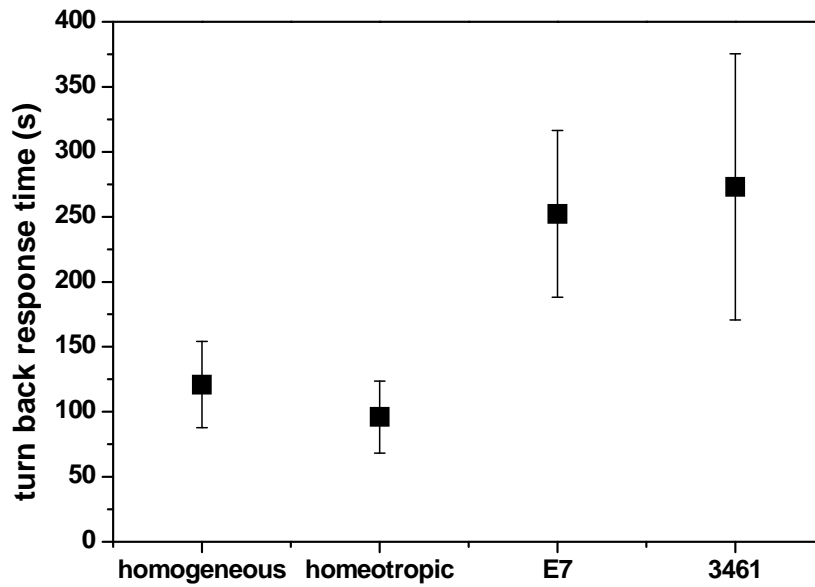


圖 4-4-2.7 把水平配向(100kHz 100V_{rms}~1kHz 100V_{rms})和垂直配向(1kHz 100V_{rms}~100kHz 100V_{rms})較快的操作方式拿來和 E7、MDA-00-3461 比較 turn back 反應時間

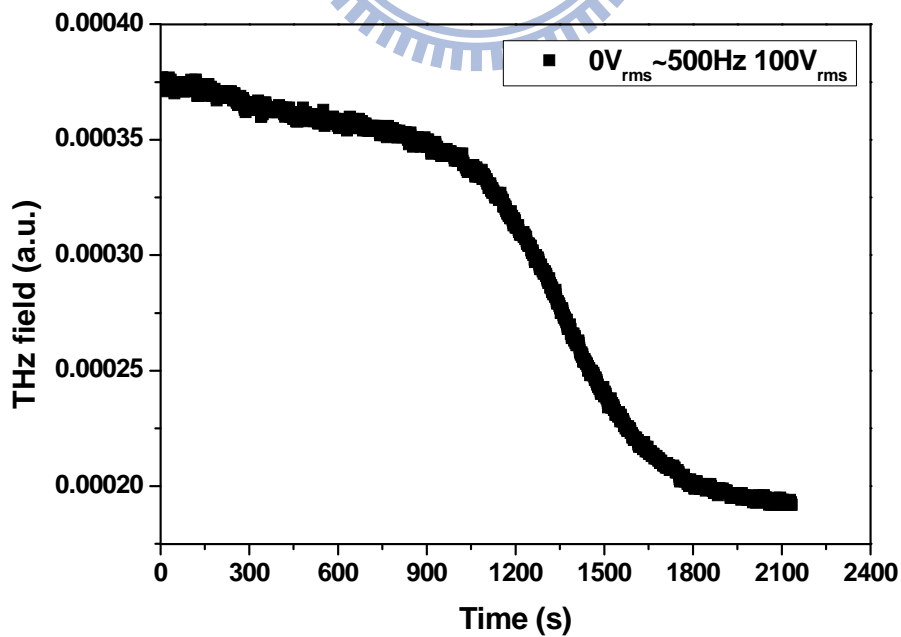


圖 4-4-3.1 (a)垂直配向雙頻液晶 turn on 階段利用 0V_{rms}~500kHz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

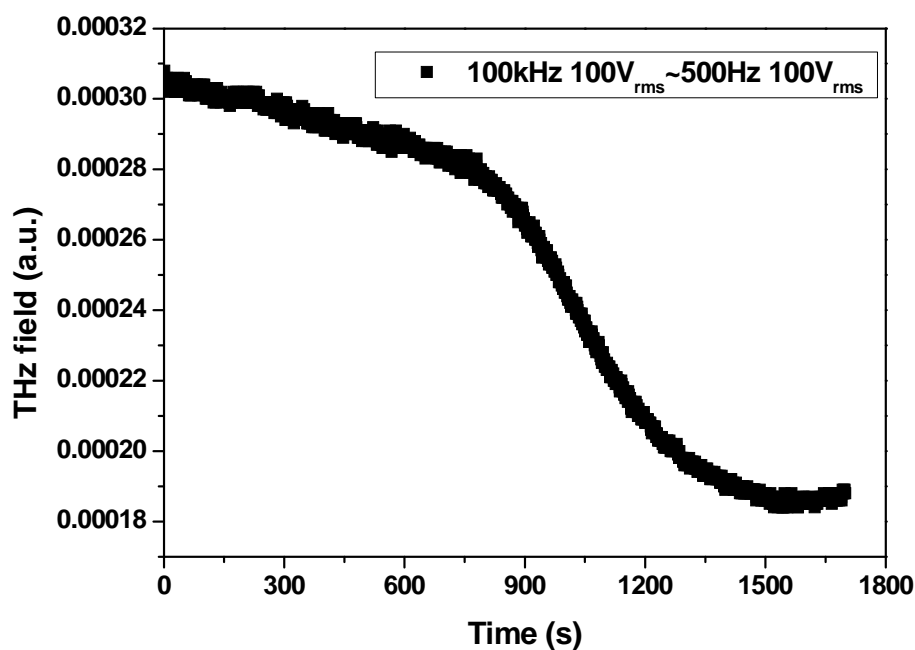


圖 4-4-3.1 (b)垂直配向雙頻液晶 turn on 階段利用 100kHz 100V_{rms} ~ 500kHz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

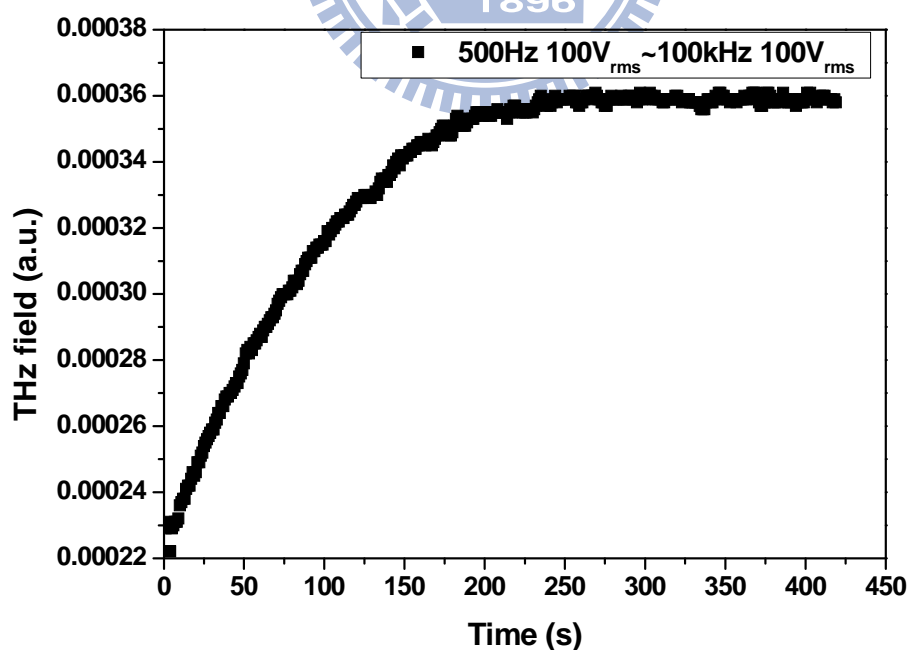


圖 4-4-3.2 (a)垂直配向雙頻液晶 turn back 階段利用 500Hz 100V_{rms} ~ 100kHz 100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

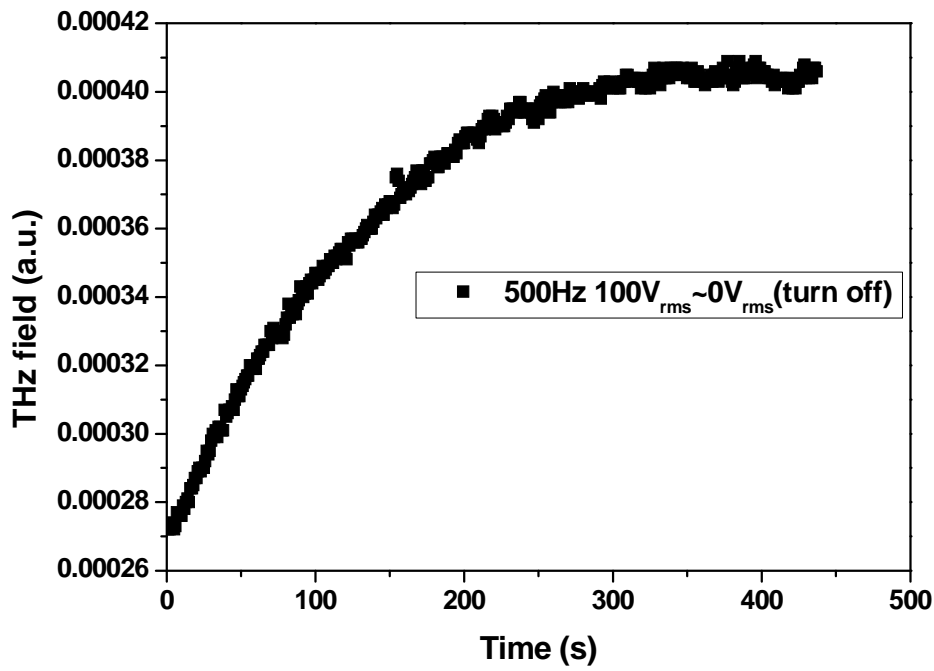


圖 4-4-3.2 (b)垂直配向雙頻液晶 turn back 階段利用 500Hz 100V_{rms}~0V_{rms}

量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

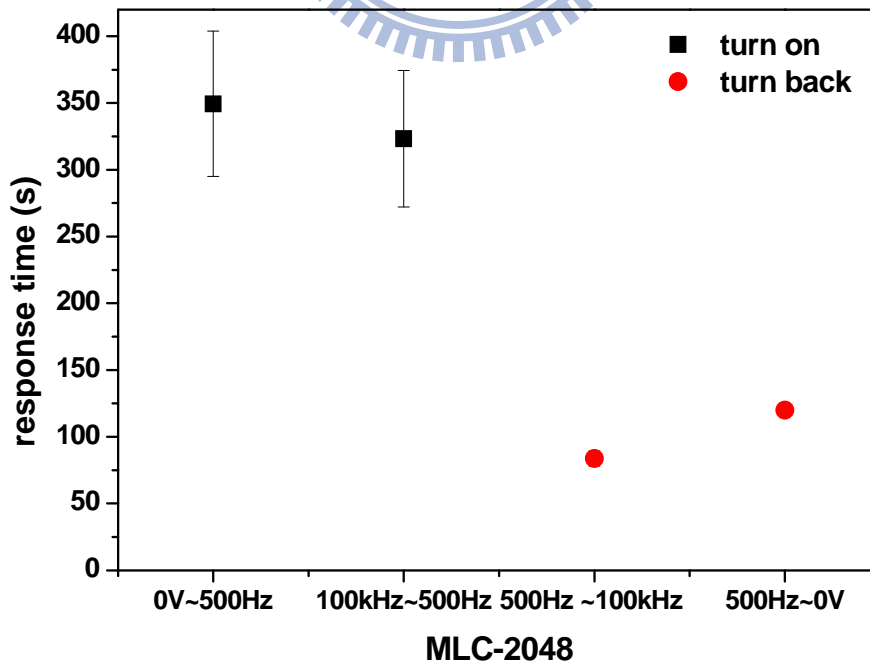


圖 4-4-3.3 垂直配向 500Hz 下雙頻液晶 MLC-2048 反應時間比較圖

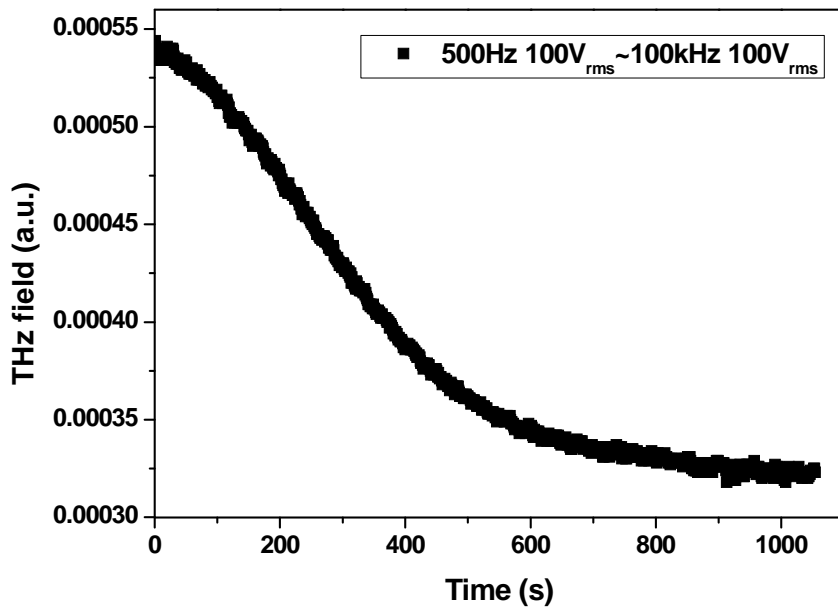


圖 4-4-3.4 水平配向雙頻液晶 turn on 階段利用 500Hz 100V_{rms}~100kHz

100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

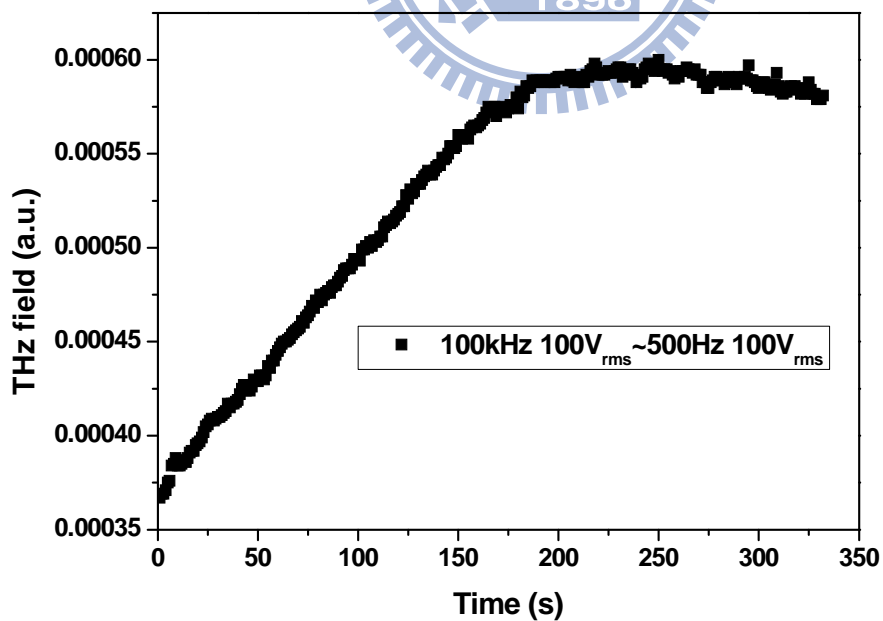


圖 4-4-3.5 水平配向雙頻液晶 turn back 階段利用 100kHz 100V_{rms}~500Hz

100V_{rms} 量測到兆赫波訊號強度和時間之關係圖

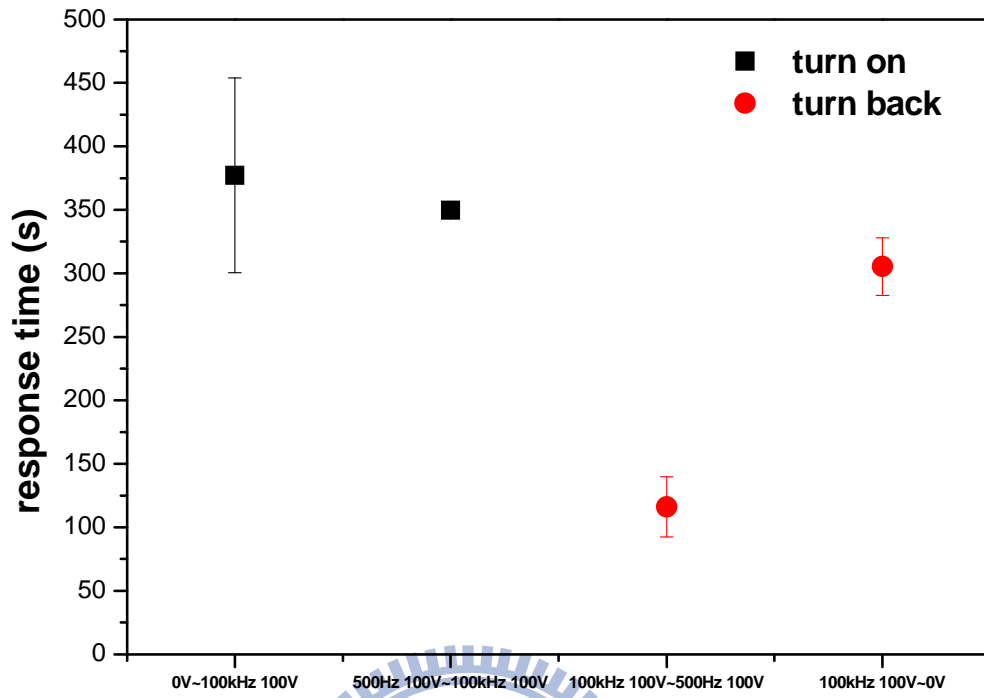


圖 4-4-3.6 為水平配向雙頻液晶 MLC-2048 相位延遲器反應時間比較圖

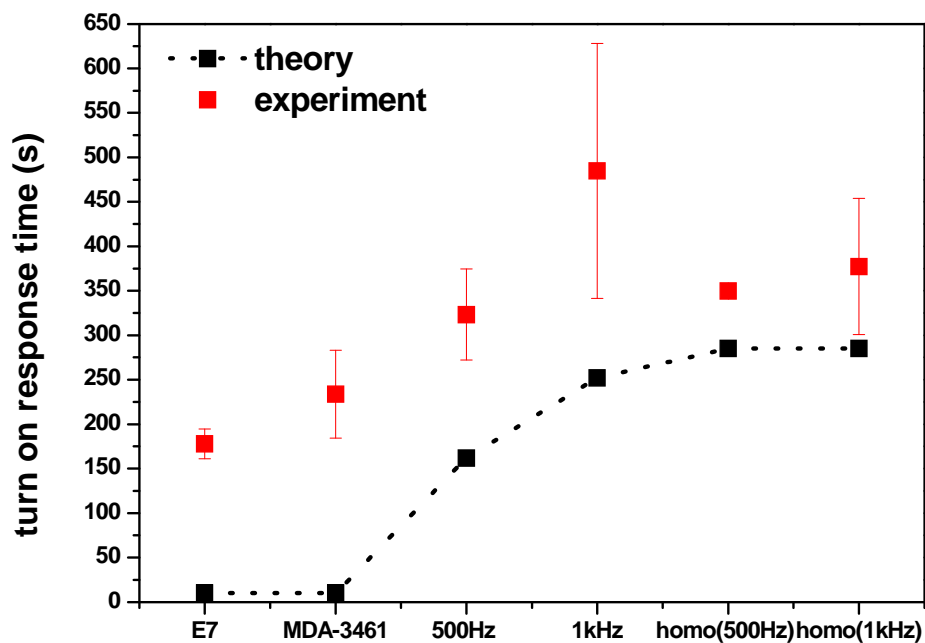


圖 4-4-4.1 turn on 反應時間理論和實驗比較圖

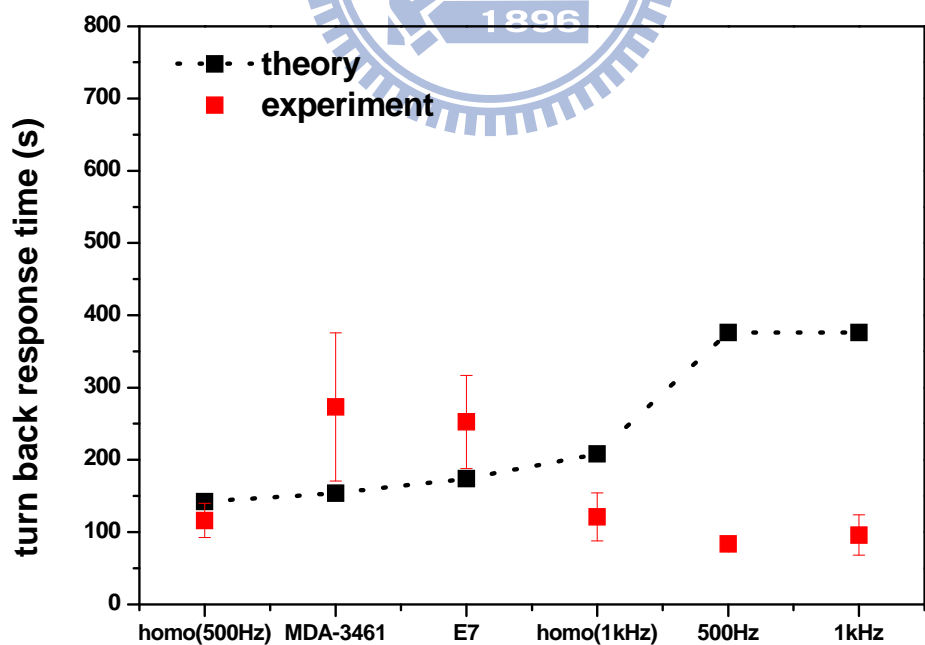


圖 4-4-4.2 turn back 反應時間理論和實驗比較圖

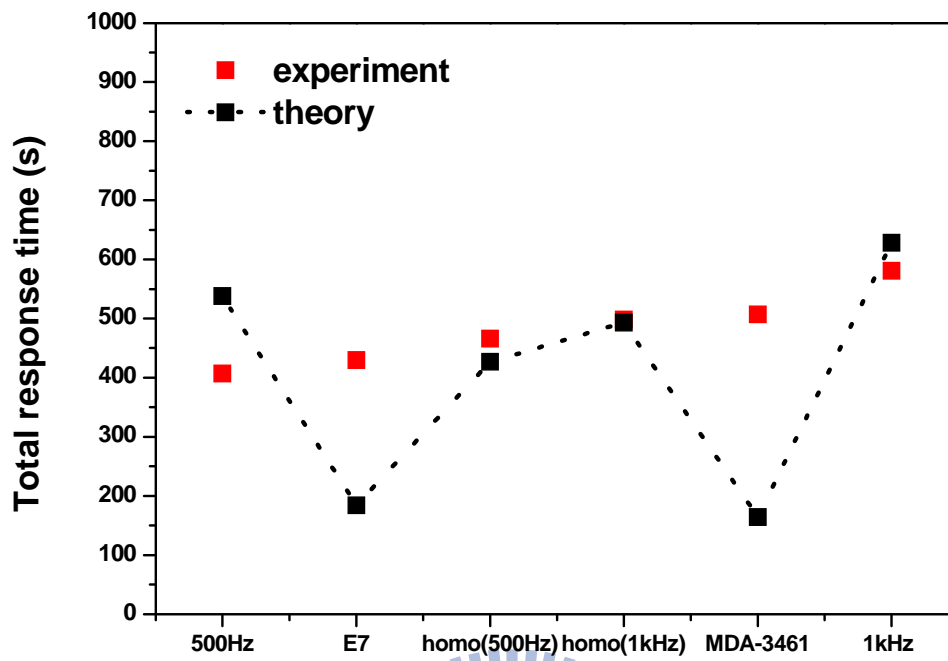


圖 5-1.1 各種狀態下的總反應時間比較圖

