

國立交通大學

電子物理系碩士班

畢業論文

利用液態晶體之兆赫波偏振器研究

Study on Liquid Crystal Polarizer for Terahertz Waves

研究生：賴玉倩

指導教授：趙如蘋 教授

中華民國九十六年七月

利用液態晶體之赫波偏振器研究

Polarizing Terahertz Wave with Liquid Crystal

研究生：賴玉倩

Student : Yu-Chien Lai

指導教授：趙如蘋

Advisor : Ru-Pin Pan

國立交通大學

電子物理系碩士班

碩士論文



Submitted to Department of Electrophysics
College of Science

National Chiao Tung University

for the Degree of

Master of Science

in

Electrophysics

June 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

利用液態晶體之兆赫波偏振器研究

研究生：賴玉倩

指導教授：趙如蘋 博士

國立交通大學電子物理系碩士班

摘要

本實驗設計利用磁控向列型液晶 E7 製作兆赫波之偏振器。利用液晶的雙折射性，以及 Snell 的全反射效果，選擇適當的入射角度，達到偏振器的效果。實驗改變不同厚度的液晶層，來探討厚度對 Feunsser 偏振器效果的影響。結果顯示：A 樣品 (1.95 mm) 與 B 樣品 (1.25 mm) 偏振器效果最佳，其 Extinction Ratio 值可達 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，偏極化程度值分別在 0.2 ~ 0.9 THz 與 0.3 ~ 0.9 THz 的範圍內可達 0.98 以上。D 樣品 (0.75 mm) Extinction Ratio 值可達 10^{-4} ，偏極化程度值在 0.45 ~ 0.9 THz 範圍達 0.95 以上。C 樣品 (0.5mm) 效果最差，Extinction Ratio 值為 10^{-3} ，偏極化程度值在 0.45 ~ 0.9 THz 範圍可達 0.9 以上。

Study on Liquid Crystal Polarizer for Terahertz Waves

Student: Yu-Chien Lai

Advisor: Pro. Ru-Pin Pan

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

We demonstrate a terahertz polarizer by using nematic liquid crystal (NLC), E7. The Polarizer has a Feuessner-type structure with the NLC layer between two fused silica prisms. We fabricated four difference thickness of LC layers, 1.95mm, 1.25mm, 0.75mm and 0.40mm. For LC layer with 1.95mm-thick and 1.25mm-thick, both of them exhibit polarization factors greater than 0.98 in the frequency range 0.2~ 0.9 THz and 0.3~0.9 THz, respectively. The polarization factor exceeds 0.95 and 0.90 from 0.45~ 0.9 THz for 0.75mm-thick and 0.40mm-thick LC layer, respectively.

誌謝

碩士班兩年一下子就過去了，在這期間非常感謝趙如蘋老師的教導，當我在實驗上遇到困難時，趙老師會適時的給予幫助，讓我得到許多寶貴的經驗；同時感謝潘犀靈老師，在兆赫波的實驗上給予協助。

感謝卓帆學長，一路辛苦的幫忙我，不僅是當我在實驗上遇到問題，甚至是理論給予我相當多意見。實驗室的家任、宇泰、信穎、阿達以及雅峰學長，謝謝你們在實驗上給我許多指教。還有俊賢、誌佑、政穎，謝謝你們的陪伴，讓我在這段期間充滿了歡笑，大家一起討論功課，一起打球，這些日子我會將它牢牢的記住的。光電所宜貞、晏毓、偉文謝謝你們在實驗上的幫助。

謝謝學妹逸君、孟秋，跟你們聊天很開心，學弟聖嵐、天昱、昱智，實驗室有了你們，多了許多有趣的事。

最後要謝謝我的家人，你們總是在背後默默支持我，當我難過的時候聽我訴苦，給我許多溫暖，尤其是妹妹玉琳，你總是能在我難過的時候逗我開心，謝謝！！

謝謝我身邊每一個幫助過我的人，沒有你們不會有今天的我，真的很謝謝你們！

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖表目錄	vi
一、 導論	1
1-1 兆赫波簡介	1
1-2 液態晶體簡介	2
1-3 偏振器簡介與實驗動機	5
1-4 論文架構	6
二、 實驗系統及架構	7
2-1 兆赫波量測系統	7
2-1-1 兆赫波產生與偵測原理簡介	7
2-1-2 兆赫波量測系統架構	9
2-2 樣品設計	10
2-2-1 選擇適當材料	10
2-2-2 設定適當入射角度	14
2-2-3 樣品結構與製作	14
2-3 實驗方法	18
三、 理論分析	21
3-1 非尋常光理論	21
3-2 尋常光理論	25

3-3	不同角度下穿透光強度變化.....	28
四、	結果與討論.....	30
4-1	穿透率量測結果.....	30
4-1-1	非尋常光實驗結果.....	33
4-1-2	尋常光實驗結果.....	42
4-1-3	不同角度下的穿透率.....	44
4-2	偏振器效果參數.....	50
4-2.1	Extinction Ratio	50
4-2.2	偏極化程度.....	52
五、	結論與未來展望.....	58
	參考文獻	60



圖 表 目 錄

圖 1-1	液晶的種類.....	4
圖 2-1.1 (a)	兆赫波產生器與接收器天線.....	8
圖 2-1.1 (b)	低溫成長之砷化鎵能帶圖.....	8
圖 2-1.2	兆赫波時域頻譜系統.....	8
圖 2-1.3	兆赫波時域訊號.....	11
圖 2-1.4	兆赫波頻譜圖.....	11
圖 2-2.1	液晶 E7 折射率.....	13
圖 2-2.2	不同材料之折射率實部與虛部.....	13
圖 2-2.3 (a)	不同入射角下非尋常光的穿透率.....	15
圖 2-2.3 (b)	不同入射角下尋常光的穿透率.....	15
圖 2-2.4	樣品設計圖.....	17
圖 2-2.5	使用磁場驅動不同狀況下之液晶分子示意圖.....	17
圖 2-2.6	樣品實際圖.....	19
圖 2-2.7	A 樣品實際圖.....	19
圖 3-1.1	空氣與熔融的二氧化矽的訊號頻譜圖.....	24
圖 3-1.2	不同液晶層厚度樣品之非尋常光穿透光強度 I_e	24
圖 3-2	不同液晶層厚度樣品之尋常光穿透光強度 I_o	27
圖 3-3	樣品在尋常光與非尋常光狀況示意圖.....	27

圖 4-1.1	A 樣品尋常光及非尋常光時域圖.....	31
圖 4-1.2	B 樣品尋常光與非尋常光時域圖.....	31
圖 4-1.3	C 樣品尋常光與非尋常光時域圖.....	32
圖 4-1.4	D 樣品尋常光與非尋常光時域圖.....	32
圖 4-1.5	A 樣品之頻域圖.....	34
圖 4-1.6	B 樣品之頻域圖.....	34
圖 4-1.7	C 樣品之頻域圖.....	35
圖 4-1.8	D 樣品之頻域圖.....	35
圖 4-1.9	不同液晶層厚度樣品之非尋常光穿透率.....	36
圖 4-1.10	A 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除.....	38
圖 4-1.11	B 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除.....	38
圖 4-1.12	C 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除.....	39
圖 4-1.13	D 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除.....	39
圖 4-1.14	A 樣品之尋常光與非尋常光實驗與理論計算的穿透率.....	40
圖 4-1.15	B 樣品之尋常光與非尋常光實驗與理論計算的穿透率.....	40
圖 4-1.16	C 樣品之尋常光與非尋常光實驗與理論計算的穿透率.....	41
圖 4-1.17	D 樣品之尋常光與非尋常光實驗與理論計算的穿透率.....	41
圖 4-1.18	不同液晶層厚度樣品之尋常光穿透率.....	43
圖 4-1.19	A 樣品之光強度隨角度變化時域圖.....	46

圖 4-1.20	B 樣品之光強度隨角度變化時域圖.....	46
圖 4-1.21	C 樣品之光強度隨角度變化時域圖.....	47
圖 4-1.22	D 樣品之光強度隨角度變化時域圖.....	47
圖 4-1.23	A 樣品之各角度下穿透光頻域圖.....	48
圖 4-1.24	B 樣品之各角度下穿透光頻域圖.....	48
圖 4-1.25	C 樣品之各角度下穿透光頻域圖.....	49
圖 4-1.26	D 樣品之各角度下穿透光頻域圖.....	49
圖 4-1.27	各樣品在 0.3 THz 處穿透光隨角度變化與 Malus's Law 比較.....	51
圖 4-2.1	A 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較.....	53
圖 4-2.2	B 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較.....	53
圖 4-2.3	C 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較.....	54
圖 4-2.4	D 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較.....	54
圖 4-2.5	A 樣品之偏極化程度量測結果.....	56
圖 4-2.6	B 樣品之偏極化程度量測結果.....	56
圖 4-2.7	C 樣品之偏極化程度量測結果.....	57
圖 4-2.8	D 樣品之偏極化程度量測結果.....	57
表 3-1	兆赫波在非尋常光狀況下在液晶層經歷的厚度對照 表.....	24
表 5-1	各樣品實驗結果整理表.....	59

第一章 導論

1-1 兆赫波簡介

兆赫波 (Terahertz wave, THz Wave)一般是指波長由 0.3 cm 到 10^{-3} cm，或頻率範圍從毫波 (~ 0.1 THz) 到遠紅外區 (~ 30 THz) 的電磁波 ($1\text{THz} = 10^{12}$ Hz, $\lambda=0.03$ cm)。廣義來說，任何有關頻率範圍在 0.1 到 100 THz 之間的電磁波研究，都可以視為兆赫波科學範疇。

一般常見的產生遠紅外線波段光源有弧光燈、Globar 燈、自由電子雷射和同步輻射源等。傳統的紅外線光譜量測使用弧光燈為發射光源，輻射熱測器當檢測器。但弧光燈在長波長的功率很弱，檢測器只能偵測到微弱的訊號，且易受背景的黑體輻射的干擾。

1970年代初期，由於飛秒級的超短脈衝雷射的研發成功，帶動了兆赫波頻譜技術及其相關研究領域的發展 [1]。目前常見的兆赫波產生與偵測系統是「兆赫波時域頻譜儀」(THz time domain spectroscopy, THz-TDS)。THz-TDS系統利用10 ~ 100 fs的近紅外光($\lambda= 800$ nm) 脈衝，來激發和偵測兆赫波脈衝 [2][3]，透過使用飛秒級的時間間隔來解析遠紅外光(\sim ps)。本文實驗所使用的量測系統即為THz-TDS。當超短脈衝打到砷化鎵光導天線上時，將載子從價帶激發到導帶，同時對天線外加偏壓，使之輻射出兆赫波。由馬克斯威爾方程式可知當電流隨時間產生變化時，會輻射出電磁波。兆赫波經過待測樣品後，由偵測天線接收兆赫波，可以量得其電場在時間

上的分布，於第二章中將有詳細的說明。經由快速富立葉轉換後，不僅量到脈衝的強度，同時也可得到兆赫波相位的資訊。相位和振幅和樣品的折射係數及吸收係數相關，THz-TDS在量測材料時不需使用 Kramers-Kronig analysis 來計算就可得到複數形式的介電常數。

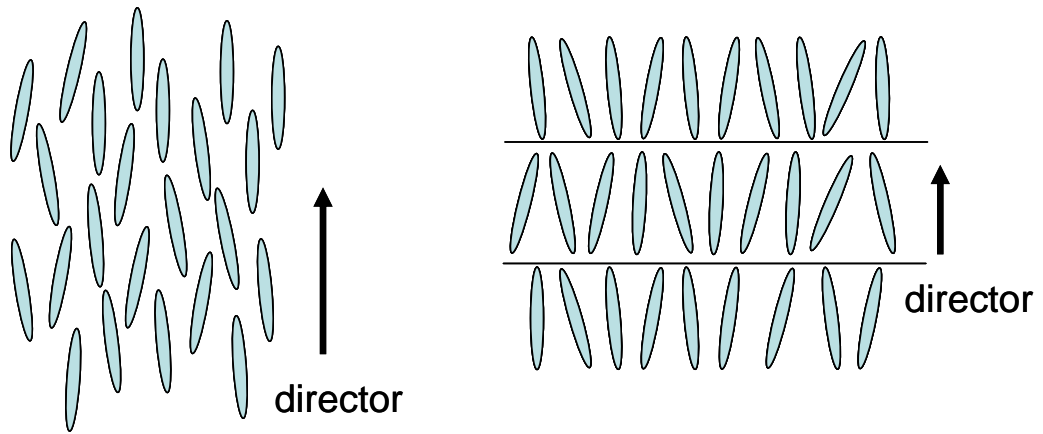
至於兆赫波的應用方面，在1968年已有報告指出有許多材料的特性能階對應到此波段 [4]。現今在此領域的研究範圍包括：時域光譜探測 [5]、影像技術 (Terahertz Imaging) [6]、雷達偵測 [7] 與生物科技 [8] 等。以遠紅外時域光譜探測而言，可將其應用在對物質的探測上，對於一些生物組織的檢驗 (如異常血紅素探測或燒燙傷檢測…等) 皆有相當的價值性。而影像技術更可應用在機場、港口、車站及海關之保安檢查及醫學上的實驗檢測，對於X光無法偵測的物質，如粉末、弱鍵結物質及炭疽病毒…等，兆赫波影像技術都可加以檢測；且其極低的能量及敏銳穿透的特性，可以長時間連續的使用且不破壞待測體之本質。進一步更可應用於生物科技的影像研究，如癌症細胞、蛋白質結構等。所以這個波段非常適合應用在生物探測系統上。綜合以上可知，這個頻率範圍的應用不但廣泛且實際。

1-2 液態晶體簡介

液態晶體 (Liquid Crystal, LC)，其相介於固態和液態之間，兼具液體的流動性與晶體的特定規則排列性之材料。西元1888年由奧地利植物學家 F. Reinitzer [10]發現。隔年德國物理學家 O. Lehmann [11]利用一座具有加熱

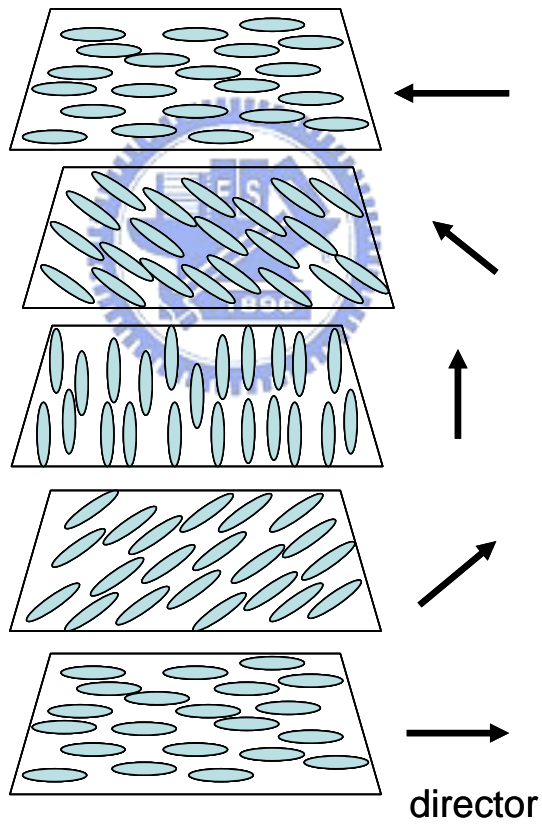
功能的偏光顯微鏡去探討液晶降溫結晶之過程。O. Lehmann 觀察到液晶具有特殊的光學特性，即液晶的介電常數與磁化率具有異向性 (anisotropy)，也就是所謂的雙折射 (birefringence) 性質。經過一百多年的發展，液晶的特性逐漸被人們了解，甚至在近幾十年被拿來應用在顯示器上，液晶成了大家耳熟能詳的名詞。

液晶可分成向列型液晶 (Nematic Crystal, N)、層狀液晶 (Smectic Crystal, S) 與膽固醇型液晶 (Cholesteric Crystal, N*)。向列型液晶又稱絲狀液晶 (見圖1-1 (a))，因結構在顯微鏡下像絲線一般而得名；此類液晶分子為長型或圓盤狀，質心位置排列無秩序性，但 director (通常是取液晶分子的對稱軸方向為 director) 有一個平均的方向性；本實驗所使用之液晶即為向列型液晶。層狀液晶也稱皂狀液晶 (見圖1-1 (b))，因結構如同肥皂溶液般具有層狀結構而稱之，是三種液晶態中最具規則性的；其單層分子質心位置無秩序性，但同層分子 director 有特定的平均方向，可視為二維規則排列的物質。膽固醇型液晶 (見圖1-1 (c)) 因由此類液晶為膽固醇的衍生物而命名；液晶分子的排列在局部看來會和向列型液晶相似，但其 director 方向會隨空間某一方向變化，也就是說 director 方向會如同螺紋一般旋轉。液晶分子不僅具有折射率之異向性，同時也具有介電常數及磁化率之異向性；故可透過外加電場和磁場來改變液晶分子排列方向 (因其會往能量較小的方式排列)。除了利用外加場的方式使液晶配向之外，還可處理與液



(a)

(b)



(c)

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

晶分子接觸的表面，來達到讓液晶排列整齊的目的。目前常用的表面處理方式是在表面鍍上配向劑後，利用絨布摩刷表面，讓液晶分子順著或垂直摩刷方向排列。除了使用絨布摩刷之外，還可利用光配向、離子轟擊基板的方式來達到使液晶分子配向的目的。本文實驗中所使用的配向方式是使用外加磁場來讓液晶分子排列整齊。

在1960年代後液晶的光學性質逐漸被清楚了解後，應用性的研究也逐漸出現。例如某些液晶會因不同的溫度或壓力，反射出不同頻率的電磁波，可將其製作成溫度計，或者是應用在電子攝影上。利用將液晶塗佈在物體表面，觀查顏色分佈就可知物體表面溫度分布。到了1963年發現液晶在施加電場後，可藉由旋轉液晶來控制電磁波的偏振態，才將液晶逐漸引導至顯示器產業上。而到了現在，不論大小尺寸的液晶螢幕皆已是眾所皆知且廣泛使用的顯示器。

1-3 偏振器簡介與實驗動機

兆赫波對於基礎科學及實際應用上尚有許多發展空間，但可用於此波段的光學元件如偏振片 (polarizer / analyzer)、相移器 (phase shifter) 及波長選擇器 (wavelength selection filter) 等等，可說是相當缺乏。因此，兆赫波元件之研究開發的工作是非常重要的且刻不容緩。

目前金屬光柵偏振器(Wire Grid Polarizer) 是在兆赫波段下常用的偏振器；而金屬光柵偏振器的理論及操作原理已經被詳細的研究[12]。但金屬光

柵偏振器的製作過程非常不容易；必須將金屬線以特定的直徑及間距，用很高張力固定住。且其價格昂貴，又因以高張力固定，極易損壞；故本文嘗試使用一個成本較低廉的方式來製做兆赫波段下偏振器，此元件具有比金屬光柵偏振器高的偏振化程度 (Polarization Factor) 且堅固耐用的特性。在紅外到紫外波段已有使用雙折性材料做成的 Glan-Thompson 偏振器 [13]；故我們想到利用全反射達到過濾偏振光的效果。

本文利用液晶的雙折射性及可透過磁場來控制液晶分子方向等特性，來製做兆赫波段下的偏振器。在經過量測幾種常見液態晶體 (5CB、PCH-5 and E7) 之光學參數 (n_e 及 n_o)，發現液態晶體 (5CB and E7) 在兆赫波段下其雙折射性比起一般材料大。本文選擇 E7 做為主要的實驗材料；因在兆赫波段下 E7 的雙折射性為 0.13 且吸收較小 (~ 0.02)。另一方面我們選擇適合的基板熔融的二氧化矽在兆赫波段下的吸收 (~ 0.002) 很小，折射率 (~ 1.95)。透過設計合適的入射角來使液晶和熔融的二氧化矽介面產生全反射來達到偏振器的效果。此種利用液晶雙折性的偏振器相對於金屬光柵偏振器，不僅製作較為簡單且堅固、便宜及高偏振化程度，是其優點。

1-4 論文架構

本文第二章將介紹實驗使用的兆赫波系統，及樣品的設計和製作；第三章則介紹本實驗所用之光學理論與計算；第四章將實驗所得之結果做討論並與理論相比較；最後第五章則對本實驗作結論以及探討未來的工作方向。

第二章 實驗系統及樣品製作

本章將介紹在實驗中使用之兆赫波量測系統原理及架設，其次，再介紹樣品的設計概念及製作過程，最後介紹實驗量測方法。

2-1 兆赫波量測系統

本實驗使用的量測系統為兆赫波時域頻譜儀 (THz-TDS)。系統使用砷化鎵光導天線做為兆赫波發射器及偵測器，利用步進馬達延遲偵測光的光程，將兆赫波在時域的波形描繪出來。

2-1-1 兆赫波產生與偵測原理簡介

實驗使用的光導天線其結構為：在矽基板上低溫成長一層砷化鎵 (LT-GaAs)，並於其上製作由 Ni/Ge/Au 合金組成的導線 (如圖 2-1.1 (a) 所示)。天線產生兆赫波脈衝的方式是利用波長 800 nm，脈衝時間為 100 fs 的超快雷射，激發砷化鎵中的載子由價帶到導帶 [14][15]，能帶結構如圖 2-1.1 (b)。透過外加 1000 V/cm 的電場，載子加速輻射出電磁波，此電磁波即為兆赫波。

在偵測器部份，其天線結構與發射器相同，仍需超快雷射激發載子，但不需外加偏壓。當兆赫波打入天線時提供一個很大的順變電場，驅動載子在天線間隙中流動，由一端跑到另一端。可藉由鎖相放大器來收集電流訊號，電流訊號大小與兆赫波的電場大小有關。而要繪出完整的兆赫波脈衝，必須藉由延遲偵測光的光程來得到整個時域訊號。量測得到的兆赫波訊號

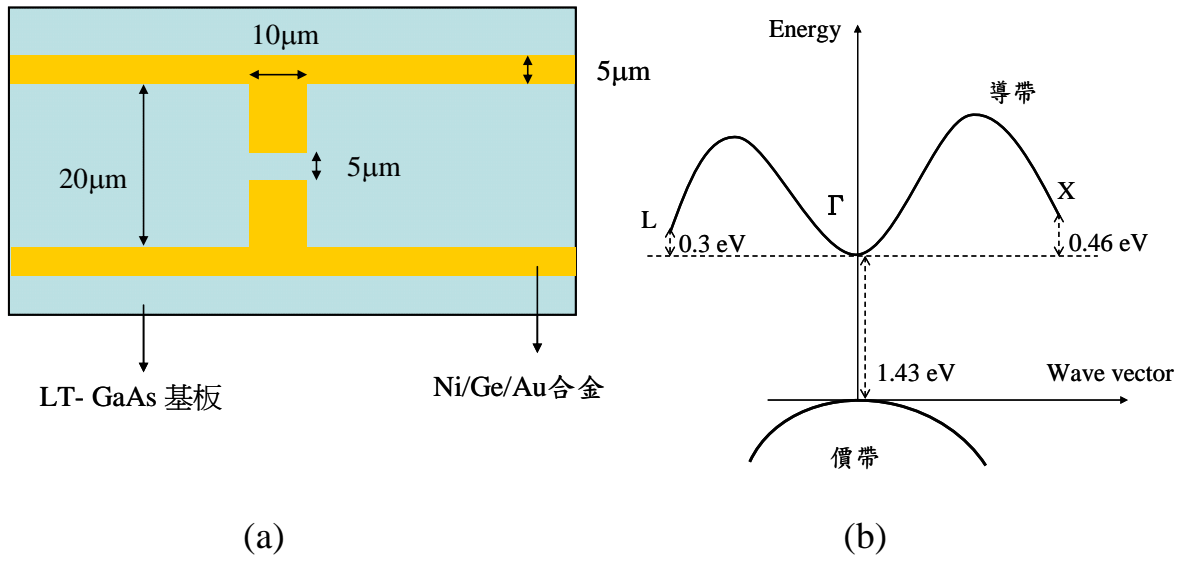


圖 2-1.1 (a) 兆赫波產生器與接收器天線； (b) 低溫成長之砷化鎵能帶圖。

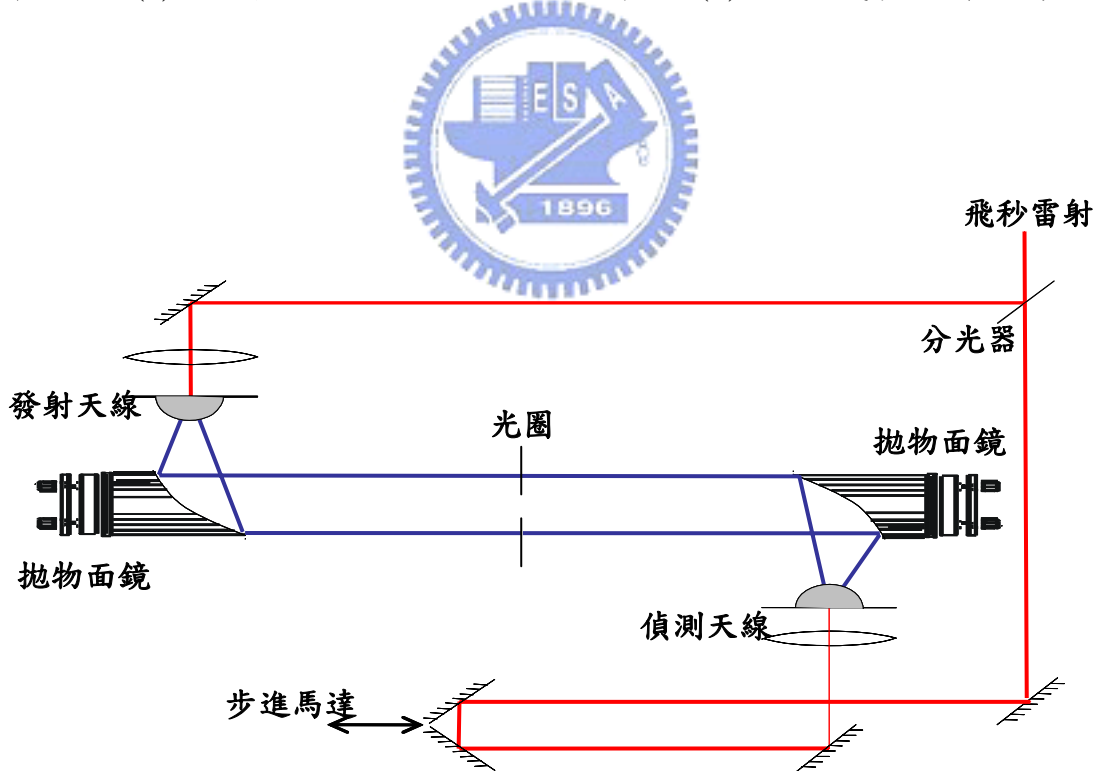


圖 2-1.2 兆赫波時域頻譜系統。

是電場隨時間變化的訊號，值的大小是相對的，但值的正負號是代表電場方向。

2-1-2 兆赫波量測系統架構

系統架構圖如上頁圖 2-1.2 所示。將波長 800 nm，脈衝時間為 100 fs，重複率為 90 MHz 的超快雷射導入 THz-TDS 系統中；利用分光器（Beam Splitter）將雷射光分成兩道，分別以 35 mw 和 25 mw 的功率垂直入射至激發天線與偵測天線。在天線之前放一個無色散之聚焦物鏡，讓光可以準確的打在天線的間隙上；天線背面貼上矽半球，使激發兆赫波從砷化鎵出射至空氣時的折射角減小，增加收集率。輻射出的兆赫波入射到拋物面鏡後，形成一道平行光；量測時會將樣品放置於兩個拋物面鏡之間來做測量，並於樣品前放置光圈，以確保兆赫波是完全由樣品通過。

由天線激發出的兆赫波會有特定方向的偏振態，線偏振方向為水平天線的間隙方向（以圖 2-1.1 (a) 來說，兆赫波的線偏振方向為上下）。故在擺放偵測天線時必須配合發射天線的方向，才能偵測到兆赫波。

要得到一個完整的兆赫波脈衝時域訊號，必須透過延遲偵測光的光程來達到目的。一開始雷射光經過分光器分別入射到發射與偵測天線，假設此時激發光加兆赫波與偵測光的光程是相同的，令此時 $t=0$ ，則偵測器偵測到的是 $t=0$ 時的兆赫波的電場強度。當我們利用步進馬達移動偵測光路的長度時，則偵測光被延遲了 t' 秒，此時偵測到的兆赫波是經過 t' 秒時的兆赫波電

場強度。藉由此種方法即可將一個兆赫波脈衝完整的描繪出來。

另外，在兆赫波段下，有幾個水氣吸收頻率；在使用 THz-TDS 系統時，利用壓克力罩蓋住系統，並在其中充入乾燥的氮氣，在量測時控制溼度小於 5% RH，減緩水氣對兆赫波的吸收。圖 2-1.3 為量測所得之時域訊號，圖 (a) 是未除濕訊號，圖 (b) 是已除濕訊號。由圖可知未除濕的訊號在主訊號之後會有震盪，經過除濕過後震盪會明顯變少。時域訊號經過處理轉換成頻域訊號；圖 2-1.4 為頻域圖。圖 2-1.4 (a) 為未除濕之訊號，顯示在 0.55 THz、0.75 THz、0.99 THz、1.11 (1.09) THz、1.16 THz、1.2 (1.22) THz、1.41 THz 位置，有明顯的水氣吸收。圖 2-1.4 (b) 是經過除濕後訊號，可見特定水氣吸收的頻率皆有顯著改善。

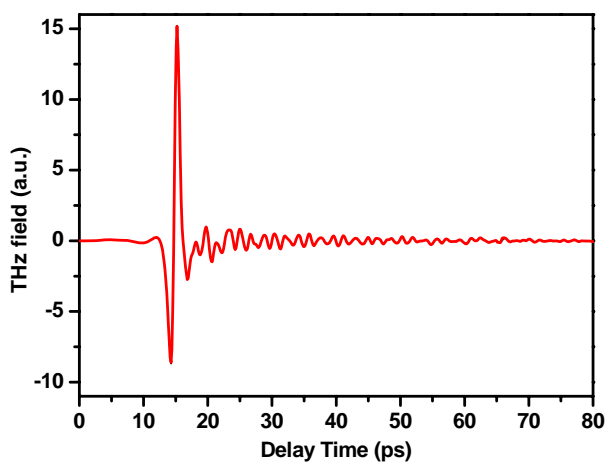


2-2 樣品設計

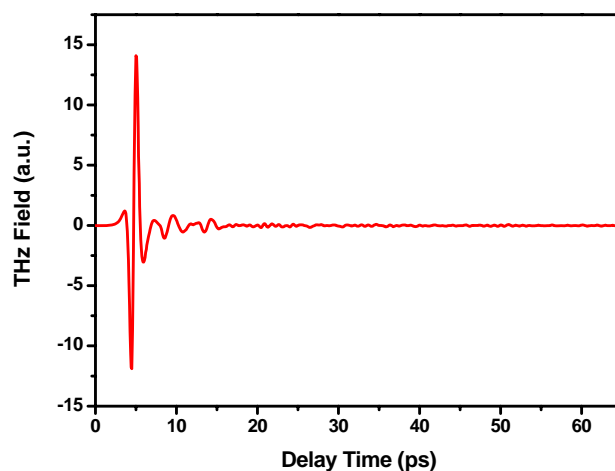
本篇論文主要是利用液態晶體雙折射的特性，設計及製作一個在兆赫波段下的偏振器。其優點缺點將在第四章詳細說明。在設計偏振器時，要考慮元件組成材料在兆赫波段下的特性。其特性包括在此波段下必須是可穿透（吸收係數小），折射係數必須能夠和液晶配合。使得在適當的入射角入射下，可藉由旋轉樣品來控制兆赫波的穿透率，完成樣品設計。

2-2-1 選擇適當材料

在選擇材料時，折射係數是一個重要的參數，而在計算折射率上，因折射率的實部與虛部是互相為函數關係，必須透過先假設一組折射率值，重

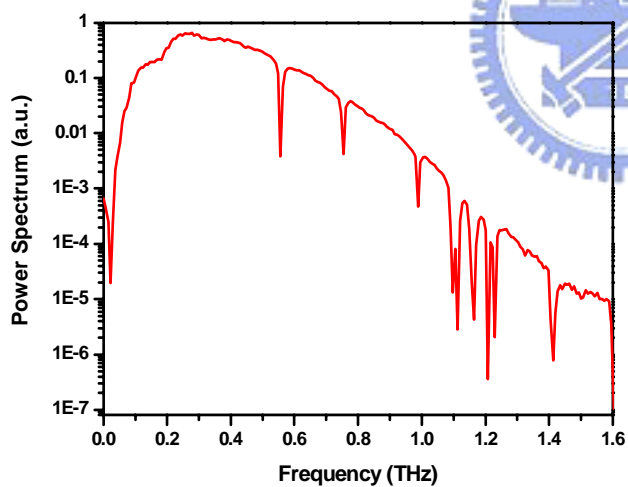


(a)

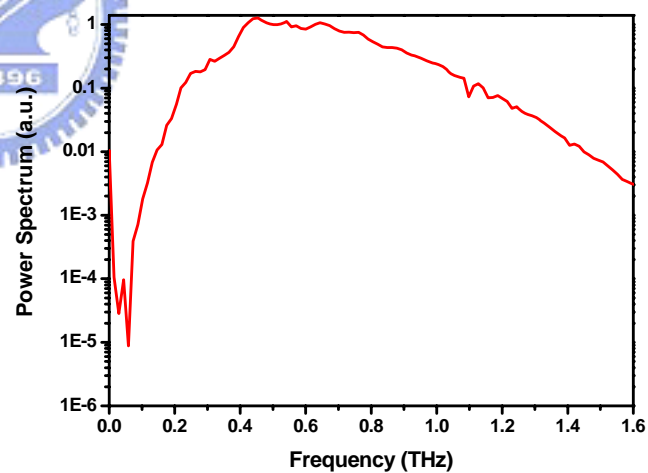


(b)

圖 2-1.3 兆赫波時域訊號，(a) 未除濕之訊號；(b) 除濕訊號。



(a)



(b)

圖 2-1.4 兆赫波頻譜圖，(a)水氣吸收頻譜圖；(b)除濕後頻域訊號。

複代入得出一組最適當的折射率值。

在此實驗中使用的液晶是 E7 (Merck)。首先定義入射的兆赫波偏振方向與液晶長軸方向垂直時，稱為尋常光 (Ordinary Ray, o-ray)，此時兆赫波經歷液晶的折射率是 n_o ；若兆赫波偏振方向與長軸方向平行，稱為非尋常光 (Extraordinary Ray, e-ray)，這時的折射率是 n_e 。

E7 折射係數量測結果如圖 2-2.1 所示，其中縱軸右側 n 代表折射率實部， κ 為折射率虛部；在 0.2 THz ~ 1 THz 範圍內，其 n_o 值與 n_e 值分別為 1.58 ± 0.01 及 1.71 ± 0.01 ；虛數折射率皆小於 0.02。由於液晶為流體，必須選擇一個適當折射率的材料來當容器。我們選擇了幾種材料：塑鋼 (POM)、氯乙烯 (PVC)、塑鋼與鐵氟龍合成物 (POF)、聚乙烯 (PE) 及熔融的二氧化矽 (Fused Silica)。這些材料在兆赫波段下的折射係數，其量測結果如圖 2-2.2 所示。在兆赫波段下，實部折射率部份：PE 為 1.51 ± 0.01 ，POM 為 1.62 ± 0.01 ，PVC 為 1.62 ± 0.02 ，POF 是 1.62 ± 0.01 ，Fused Silica 則為 1.95 ± 0.02 。虛數折射率部份，此五種材料皆小於 0.03，也就是說這些材料於兆赫波段下無明顯的吸收。

在我們的樣品設計上，由於 $n_o < n_e$ ，設定 o-ray 產生全反射，e-ray 可使兆赫波通過樣品；且為了實用性，預定入射角介於 $40^\circ \sim 50^\circ$ 範圍內。故在選擇容器的折射率上，必須選擇折射率至少大於 1.71 (E7 折射率 $n_e=1.71$)，故我們選擇熔融的二氧化矽作為實驗的容器。

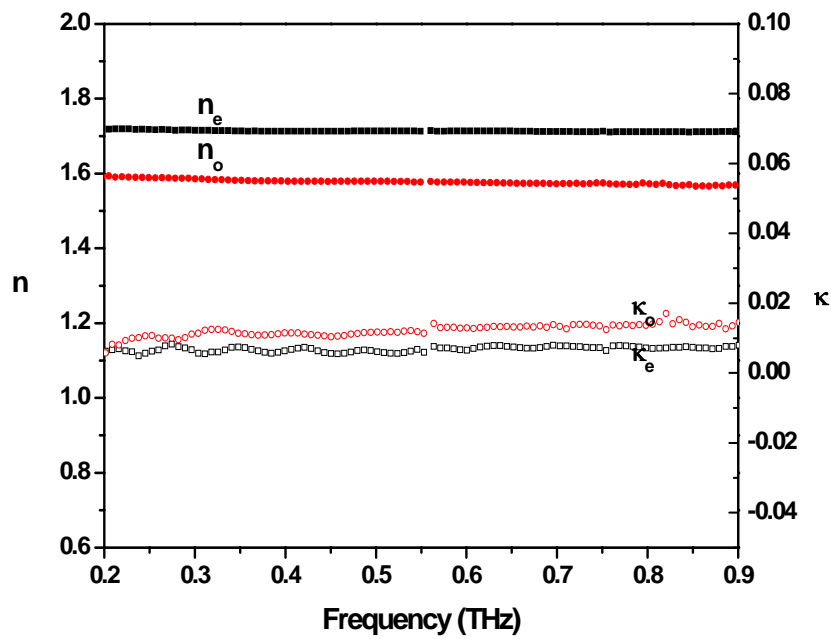


圖 2-2.1 液晶 E7 折射率。圖中實心點對應至左邊縱軸，是折射率實部 n ；圖中空心點對應至右邊縱軸，是折射率虛部 κ 。

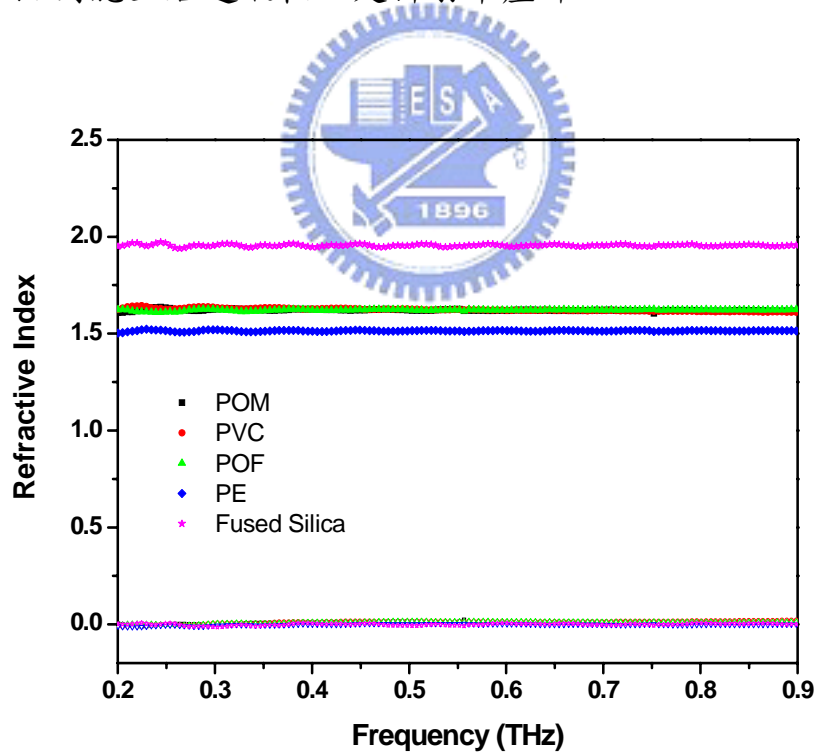


圖 2-2.2 不同材料之折射率；實心為折射率實部，空心為折射率虛部。其中 POM 為塑鋼，PVC 為氯乙烯，POF 為塑鋼與鐵氟龍合成物，PE 為聚乙烯，Fused Silica 為熔融的二氧化矽。

2-2-2 設定適當入射角度

選定液晶與盛裝容器後，可以計算兆赫波在 e-ray 及 o-ray 的狀

況下，各自對應的臨界角。由 Snell's Law 來看：

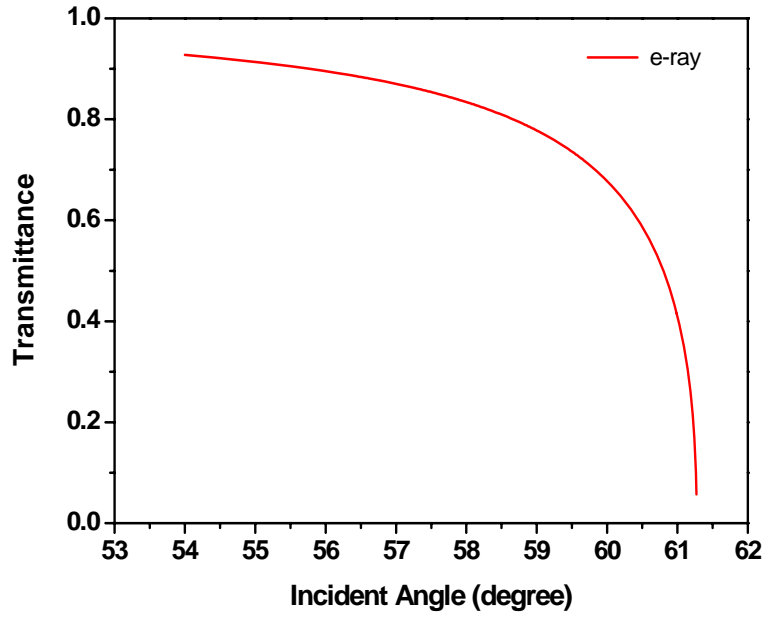
$$\begin{aligned}n_e \cdot \sin \theta_e &= n \cdot \sin \theta_1 \\n_o \cdot \sin \theta_o &= n \cdot \sin \theta_2\end{aligned}\tag{2-2.6}$$

又在產生全反射狀況下， θ_1 、 θ_2 為 90° ；其中 $n = 1.95$ 為熔融的二氧化矽折射率，液晶的折射率 n_e 和 n_o 分別為 1.71 及 1.58。所以對 e-ray 而言臨界角 $\theta_e = 61.27^\circ$ ，對 o-ray 而言臨界角 $\theta_o = 54.12^\circ$ ；圖 2-2.3 為兩種光在不同入射角度的穿透率。在樣品的入射角度選擇上必須要大於 54.12° ，如此才能讓 o-ray 產生全反射；且由圖 2-2.3 可知，對 e-ray 而言入射角度越小，穿透率越高。再者考量樣品製作時角度的精確度，估計誤差範圍為 1° ，因此我們設定入射角為 56° 。

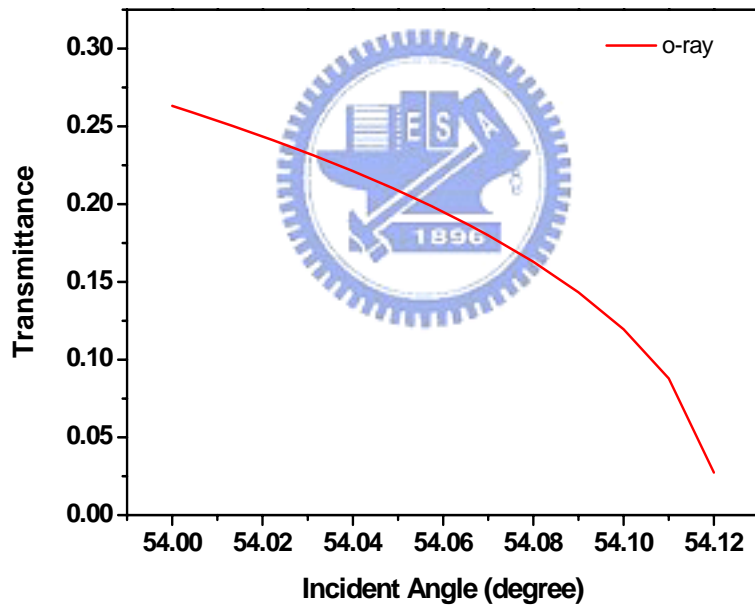


2-2-3 樣品結構與製作

兆赫波段下偏振器樣品選定使用 E7 液晶、熔融的二氧化矽為盛裝液晶容器。樣品結構示意圖如圖 2-2.4 所示。在液晶層厚度設計上，根據入射光波長 ($0.3 \text{ THz} = 1 \text{ mm}$)，設計 A、B、C、D 四個樣品，其對應實際厚度為 $1.95 \pm 0.025 \text{ mm}$ 、 $1.25 \pm 0.025 \text{ mm}$ 、 $0.40 \pm 0.025 \text{ mm}$ 及 $0.75 \pm 0.025 \text{ mm}$ ；長×寬×高尺寸 A、B、C 分別為 $22.45 \text{ mm} \times 15.20 \text{ mm} \times 15.30 \text{ mm}$ 、 $22.45 \text{ mm} \times 15.15 \text{ mm} \times 18.00 \text{ mm}$ 、 $22.35 \text{ mm} \times 15.20 \text{ mm} \times 15.25 \text{ mm}$ ，D 為 $29.50 \text{ mm} \times 19.90 \text{ mm} \times 19.90 \text{ mm}$ 。入射角由 A 到 D 分別為 55.90° 、 55.99° 、 55.78° 和



(a)



(b)

圖 2-2.3 (a) 不同入射角下非尋常光的穿透率；(b) 不同入射角下尋常光的穿透率。

56.35°受限於樣品製作，無法利用一般摩刷配向的方式來達到讓液晶排列，所以本實驗使用外加磁場的方式來達到配向效果。

一個已有特定配向方向的樣品，要靠外加場來讓液晶轉動時，Fréedericksz Transition 是一個用來估計驅動液晶分子的最小(臨界)電場或磁場的方法。其中臨界磁場可以表示為 [16]：

$$H_{c,i} = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_i}{\mu_0 \chi_a}} \quad \text{in MKS 制} \quad (2-2.7)$$

式中 d 為液晶層厚度； K_i 是液晶的彈性係數， $i=1, 2, 3$ ； χ_a 是磁化率； μ_0 是磁導率。液晶分子在不同的狀況下 (圖 2-2.5)，適用的彈性係數都不同，一般以 Case3 狀況下所使用的 K_3 為最大；假設以 E7 彈性係數最大的情況下 (E7 的 K_3 為 $17.1 \times 10^{-6} \text{ N}$)，估計不同厚度之臨界磁場分別約為 0.0231 T (for 1.95 mm)、0.0462 T (for 1.25 mm)、0.0924 T (for 0.4 mm)、0.0615 T (for 0.75 mm)。實驗上外加的磁場為 0.2 T，大於臨界磁場，亦即外加的磁場大小已確定可使液晶排列整齊。

在樣品的製作上，使用兩種製作方式：第一種方法(樣品實際圖如圖 2-2.6 所示)，使用一整塊熔融的二氧化矽塊材，在長方形的塊材上直接切割出溝槽，依照設計的液晶層厚度，切出適當的溝槽寬度。此種方法的缺點是，因溝槽深度受限於製作溝槽的工具，當所需的溝槽溝寬越小，能夠下挖的深度有限，以 0.40 mm 的溝寬來說，下挖的深度大約是 5 mm，如此一來樣品的可視面積會受到限制，造成穿過樣品的兆赫波訊號過小，以致無法分

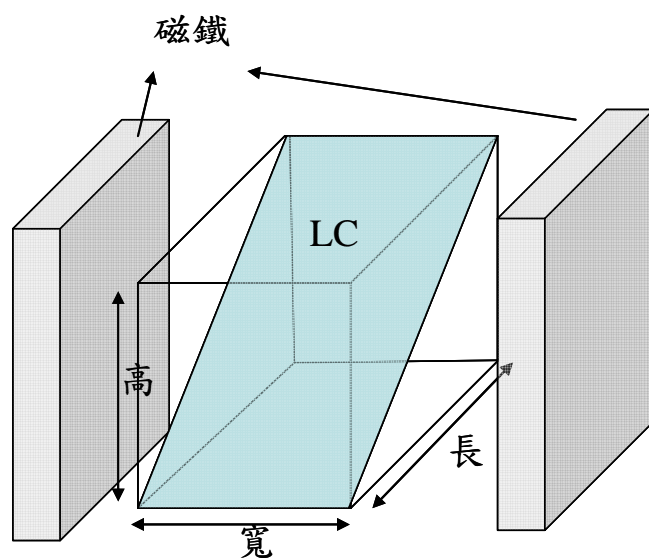


圖 2-2.4 樣品設計圖；其中液晶層厚度有 1.95 mm、1.25 mm 及 0.4 mm 三種。

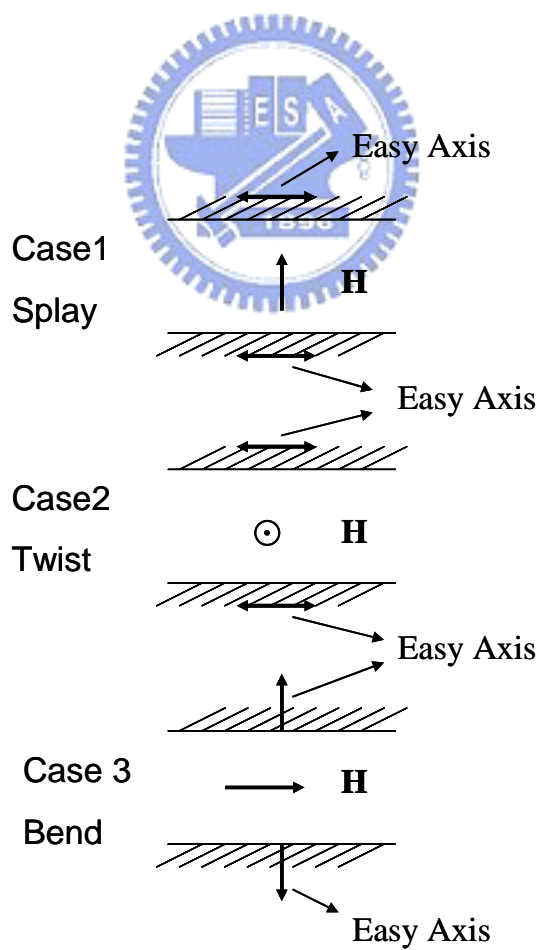


圖 2-2.5 使用磁場驅動不同狀況下之液晶分子示意圖

辨訊號與雜訊。

第二種製作方式(樣品實際圖如圖 2-2.7 所示),是利用兩塊直角三角形的熔融的二氧化矽塊材,再將熔融的二氧化矽用 AB 膠黏在一塊經過計算尺寸鋁板上,以此來控制所需的溝槽寬度。溝槽深度是與熔融的二氧化矽塊材本身的高度設計有關,故這種製作方法可以得到較大的可視面積;另外溝槽面透過拋光過程,也可以有較好的平整度。樣品組成步驟,首先將熔融的二氧化矽清洗乾淨,清洗順序為將熔融的二氧化矽依序放入清潔劑、丙酮、甲醇、去離子水中,以超音波震盪器清洗 10 分鐘,再使用氮氣將水吹去,最後放入烤箱烘乾水氣後,冷卻備用。清洗完成後,第一種樣品製作只需將液晶灌入樣品中,使用塑膠膜蓋住封口,再用 AB 膠密封起來,即可完成樣品製作;第二種樣品製作則需將塊材固定於鋁板上,再將溝槽兩側用 AB 膠封好後,再放入液晶,蓋上另一片鋁板,最後用 AB 膠固定即可。

2-3 實驗方法

THz-TDS 系統產生的兆赫波偏振方向為水平方向。若要讓經過樣品的兆赫波為 e-ray 的狀況,則外加的磁場方向需為水平方向,讓液晶為水平配向方向,也就是說讓兆赫波經歷的液晶折射係數為 n_e ;定此時的樣品擺放角度為 0 度。假設是在 o-ray 狀況下,則同時轉動樣品及磁場,使磁場方向為垂直方向,兆赫波經歷的液晶折射率為 n_o ;設定此時的角度為 90 度。

在改變不同角度的實驗中,角度定義為磁場與水平方向的夾角,在轉動

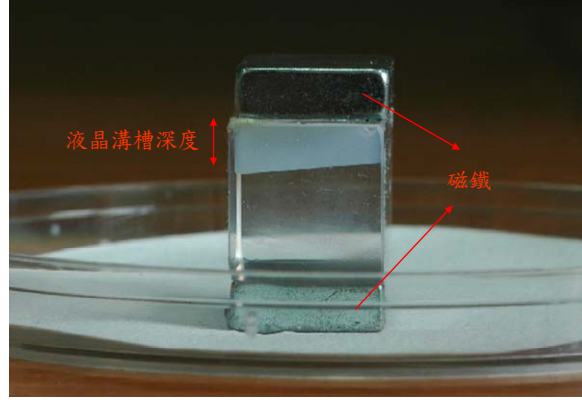
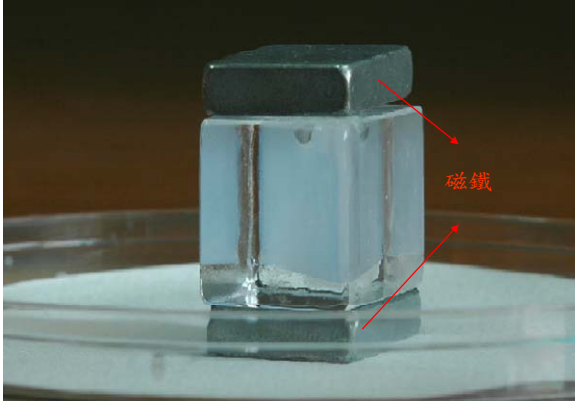


圖 2-2.6 樣品實際圖；(a) B 樣品；(b) C 樣品。

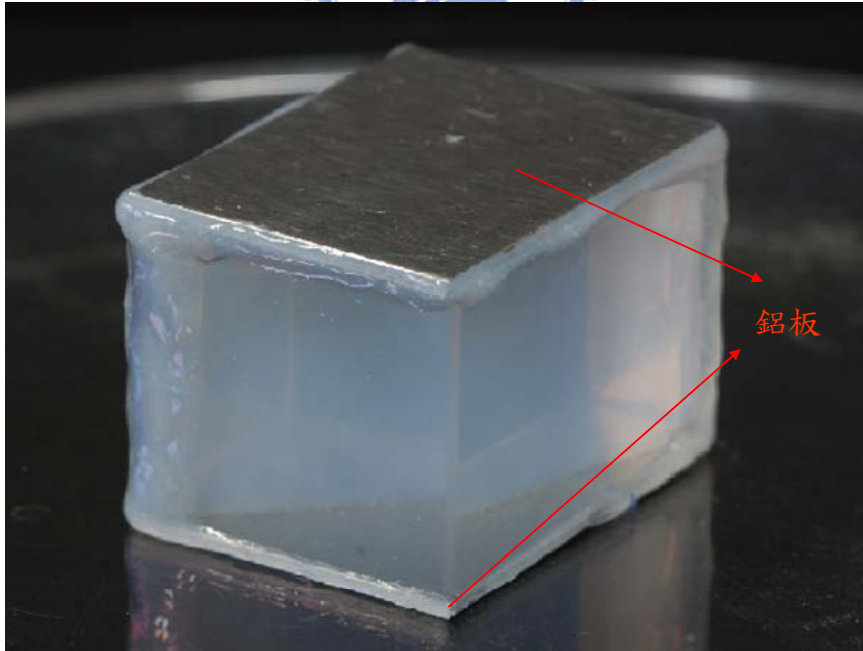


圖 2-2.7 A 樣品實際圖。

磁場的同時，也需同時轉動樣品。當樣品介於 0 度與 90 度之間，兆赫波會分成垂直與水平液晶長軸方向的兩道光，換言之，會有部分光穿透，部分光被全反射，隨著樣品轉動的角度越大，穿透光的分量會漸漸減少，直到 90 度 o-ray 的狀況，兆赫波被全反射。除了轉動不同角度的量測實驗之外，另外還有改變不同液晶厚度的實驗量測。在不同液晶厚度的實驗量測中，經由不同樣品的量測結果，可以得出一個有最佳偏振效果厚度的樣品。



第三章 理論分析

在本實驗中，定義當入射光偏振方向與液晶長軸方向垂直，此時液晶的折射率對兆赫波而言為 n_o ，這種狀態下的入射光為尋常光(Ordinary Ray，o-ray)；若入射光偏振方向和液晶長軸平行，兆赫波經歷液晶的折射率為 n_e ，稱此種光為非尋常光 (Extraordinary Ray，e-ray)。在這一章節中，將針對當旋轉液晶方向時，改變兩種光分量時的穿透光強度變化，並用 Snell 及 Fresnel 光學理論來分析探討。

3-1 非尋常光理論

在樣品設計上，設定在 e-ray 狀況下，兆赫波是被允許通過元件。當電磁波由介質一傳輸到介質二時，在介面處會有反射及折射兩種狀況發生：若被反射的電磁波不會再進入介質二，隨著兩介質的折射率相差越大，反射損耗就越大；而折射的電磁波可以在介質二中繼續前進，在介質二中傳遞時會有材料吸收所造成能量的損失。而在最後由介質二回到介質一時，又再經歷一次反射折射過程。

首先，考慮介面反射損耗。由 Fresnel's equation 知，在入射光為由介質一入射到介質二的狀況下，反射的電場振幅與入射的電場比值可表示為：

$$r = \frac{\tilde{n}_1(\omega) \cos \theta_1 - \tilde{n}_2(\omega) \cos \theta_2}{\tilde{n}_1(\omega) \cos \theta_1 + \tilde{n}_2(\omega) \cos \theta_2} \quad (2-3.1)$$

其中 $\tilde{n}_1(\omega)$ 、 $\tilde{n}_2(\omega)$ 為介質一和介質二之折射率， θ_1 和 θ_2 則為入射角與折射角。又電磁波強度的反射率為 $R = r^2$ ，穿透率則為 $T = 1 - R$ 。

電磁波共經歷四次介面，分別為：1. 空氣到 Fused Silica，2. Fused Silica 到液晶，3. 液晶到 Fused Silica，以及 4. Fused Silica 到空氣。其中第 1 及第 4 部分，因電磁波為垂直入射及出射，所以 θ_1 和 θ_2 皆為 90 度，又空氣折射率為 1，Fused Silica 折射率在兆赫波段下為 1.95；計算穿透率結果皆為 0.8963 ($T_1=T_4$)。而第 2 和第 3 部份，將已知的入射角 θ_1 (樣品 A ~ D 分別為 55.9°、55.99°、55.78°、56.35°)，而折射角 θ_2 可利用 Snell's Law 分別計算出來 (樣品 A ~ D 分別為 70.31°、70.48°、70.08°、70.67°)；液晶折射率為 $n_e=1.71$ ，故由計算可得穿透率 T_2 和 T_3 ($T_2=T_3$)，而樣品 A ~ D 分別為 0.9049、0.9032、0.9071、0.9032。所以考慮各介面上的反射損耗，總穿透率可寫成：

$$T_{total} = T_1 \times T_2 \times T_3 \times T_4 \quad (3-1.2)$$

其次，考慮電磁波在液晶層中，被液晶吸收所造成的損耗；由之前選擇適當材料時的折射率量測，可知 Fused Silica 的折射率虛部很小 (<0.001)，暫時將 Fused Silica 對兆赫波的吸收部分忽略。電磁波電場可表示為：

$$E(\omega) = E_0(\omega) \times e^{i[n(\omega)+i\kappa(\omega)]kd} \quad (3-1.3)$$

而電場強度則可由上式計算可得：

$$I(\omega) = I_0(\omega) \times e^{-2\kappa(\omega)kd} \quad (3-1.4)$$

其中， $n(\omega)$ 和 $\kappa(\omega)$ 是液晶折射率的實部與虛部， k 為液晶中的波數 (wave number)， d 為液晶層厚度，但考慮電磁波在液晶層中，因入射光非垂直入射，故實際兆赫波在液晶經歷的光程 $d' > d$ 。利用 Snell's Law 計算的折射角 θ_2 ，修正後光程可表示成 $d' = d / (\cos \theta_2)$ ；表 3-1 為各樣品實際厚度與修正後

厚度的對照表。

綜合以上電磁波的介面反射與液晶層吸收的損耗，e-ray 的穿透光強度可以表示成：

$$I_e(\omega) = \frac{I'(\omega)}{I_{ref}(\omega)} = \frac{T_{total} \times I_0(\omega) \cdot e^{-2\kappa(\omega)kd'}}{I_0(\omega)} = T_{total} \times e^{-2\kappa(\omega)kd'} \quad (3-1.5)$$

將已知的 T_{total} 、 κ 、 k 及 d' 代入 (3-1.5) 式中，即可求得理論的 I_e 值。上式中將 I_e 取對數後，可以得到 $\log I_e$ 會與 $-\kappa fd'$ 成正比關係（因 $k = 2\pi f / c$ ），而若 $\log I_e$ 對頻率 f 做圖，其斜率會隨著 d' 增加而增加。

另外，在先前理論估計中，在熔融的二氧化矽的吸收方面，因吸收係數過小，忽略不計，但由後來的實驗結果得知（圖 3-1.1），熔融的二氧化矽在頻率越高時吸收效果越明顯，對於兆赫波強度的影響也越重要。因此為了去除熔融的二氧化矽的效應，將參考樣品由空氣改為熔融的二氧化矽塊材來取代。而 (3-1.5) 式中只需考慮液晶與熔融二氧化矽的介面反射損耗， T_{total} 改為 $T_2 \times T_3$ 代入即可。

圖 3-1.2 為樣品 A ~ D 所計算的理論值。圖中樣品穿透率的理論值隨著厚度的增加而減少。另外，穿透率也隨著頻率上升而下降，這是因為當頻率越高時所對應的波長越短，在同樣的液晶層厚度下，高頻波在介質中所走的波數目會比低頻波來的多；換句話說，可以將其視為相同的厚度下高頻波在介質中有較長的光程。故介質的吸收造成的損耗對高頻而言相對較多，穿透率自然就會較低。

	A 樣品	B 樣品	C 樣品	D 樣品
實際厚度 d	1.95 mm	1.25 mm	0.40 mm	0.75 mm
修正後光程 d'	5.79 mm	3.74 mm	1.17 mm	2.26 mm

表 3-1 兆赫波在 e-ray 狀況下在液晶層經歷的光程對照表。

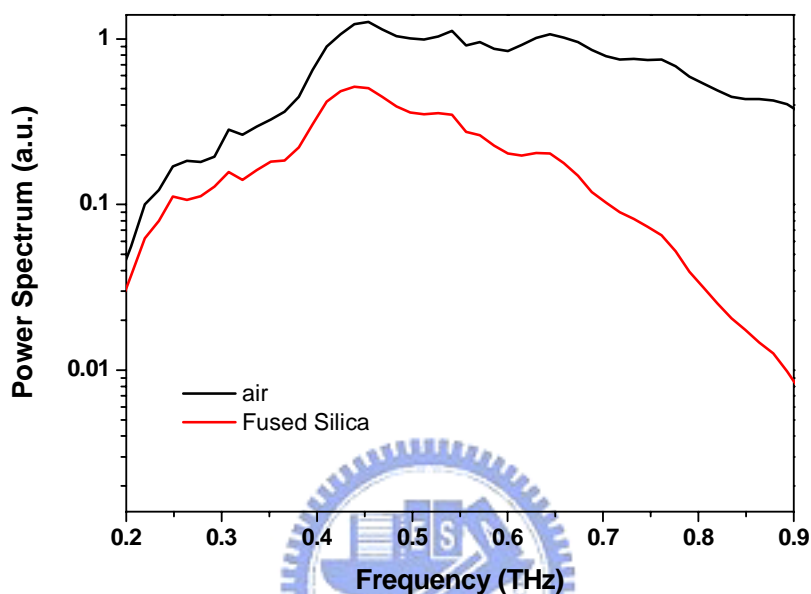


圖 3-1.1 空氣與熔融的二氧化矽的訊號頻譜圖。

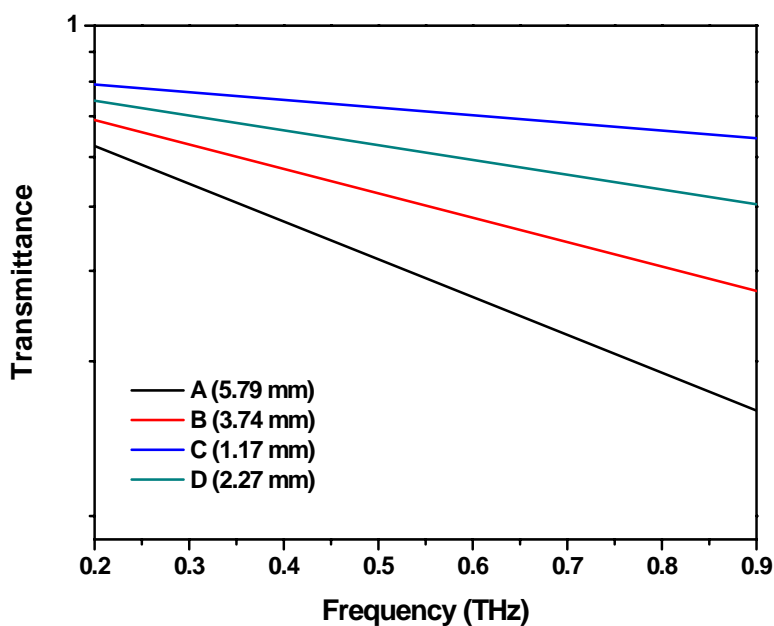


圖 3-1.2 不同液晶層厚度樣品之非尋常光穿透光強度 I_e 。

3-2 尋常光理論

在樣品設計上 o-ray 是會被全反射，所以按照理論來說，將沒有電磁波通過元件；但在實驗中，卻可量到些微弱訊號，故我們引入衰逝波 (Evanescent Wave) 的概念。

當一束光以大於臨界角的角度入射至介面時，入射光能量會被全部反射，但卻仍有微弱的電磁波可穿透介面，此時這電磁波稱為衰逝波。假設一道光以入射角 β 由折射率 n_1 的介質入射到折射率為 n_2 的介質中(折射角為 φ)，穿透介面的電場強度可表示為 [16]：

$$E_t(\omega) = E_0(\omega) \cdot e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

又

$$\begin{aligned} \vec{k} \cdot \vec{r} &= k' \times x \sin \varphi - k' \times y \cos \varphi \\ &= k \times x \sin \beta - k' \times y \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{n^2}} \end{aligned} \quad (3-2.1)$$

其中 k 和 k' 為在介質一及介質二之波數，且 $k' = n_2 k$ ， n 為 n_2 / n_1 ， x 為沿著介面方向， y 為電磁波穿透方向。透過 Snell's Law 可將 (3-2.1) 式中，折射角 φ 換算成以入射角 β 形式來表示；而當全反射發生時， $\sin \beta > n$ ，則 $\cos \varphi$ 是虛數，所以 (3-2.1) 式可改寫成：

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = k \times x \sin \beta - in_2 k \times y \sqrt{\frac{\sin^2 \beta}{n^2} - 1}$$

故電場可表示為：

$$E_t(\omega) = E_0(\omega) \cdot e^{-\alpha \times y} \cdot e^{i(k \times x \sin \beta - \omega t)} \quad (3-2.2)$$

其中 α 為衰減係數，定義 $\alpha = k' \sqrt{\frac{\sin^2 \beta}{n^2} - 1}$ 。由 (3-2.2) 式可知，衰逝波可沿

著介質面方向傳遞，但當越深入介質時強度會以指數的方式衰減；若介質厚度不夠厚，則將有電磁波穿透。在本實驗中的樣品，若液晶層不夠厚，將有電磁波會穿透樣品。

若考慮將介質中的折射率 n_2 為複數，表示成 $\tilde{n}_2 = n_2 + i\kappa_2$ ，則一般電磁波在介質中的電場表示形式為：

$$\begin{aligned}
 E'_t &= E_0(\omega) \cdot e^{i(\tilde{n}_2 kd)} \\
 &= E_0(\omega) \cdot e^{i(n_2 + i\kappa_2)kd} \\
 &= E_0(\omega) \cdot e^{in_2 kd} \cdot e^{-\kappa_2 kd} \\
 &= E_0(\omega) \cdot e^{-\kappa_2 kd} \cdot e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\
 &= E_0(\omega) \cdot e^{-\kappa_2 kd} \cdot e^{-\alpha \times d} \cdot e^{-i(k \times x \sin \beta - \omega t)}
 \end{aligned} \tag{3-2.3}$$

上式中 d 為介質厚度， n_2 為介質的實部折射率， κ_2 為介質虛部折射率。

以上衰逝波的理论，若是以空氣當參考樣品，必須再考慮電磁波在空氣與熔融的二氧化矽界面的反射造成的能量損失。由 3-1 節中的穿透率計算可以得知，在空氣與熔融的二氧化矽界面造成的反射損耗後的總穿透率 T 。但由於熔融的二氧化矽在兆赫波下的強度會隨頻率增加而衰減，故改以熔融的二氧化矽為參考樣品，所以總穿透率 T 視為 1，對於 o-ray 部份的總穿透光可表示為：

$$I_o(\omega) = \frac{E_t(\omega) \times E_t^*(\omega)}{E_0^2(\omega) \cdot e^{2(k \times x \sin \beta - \omega t)}} = T \times e^{-2\kappa_2 kd} \times e^{-2\alpha d} \tag{3-2.4}$$

圖 3-2 顯示，在不同樣品的液晶厚度下，以 (3-2.4) 式所得到的穿透光強

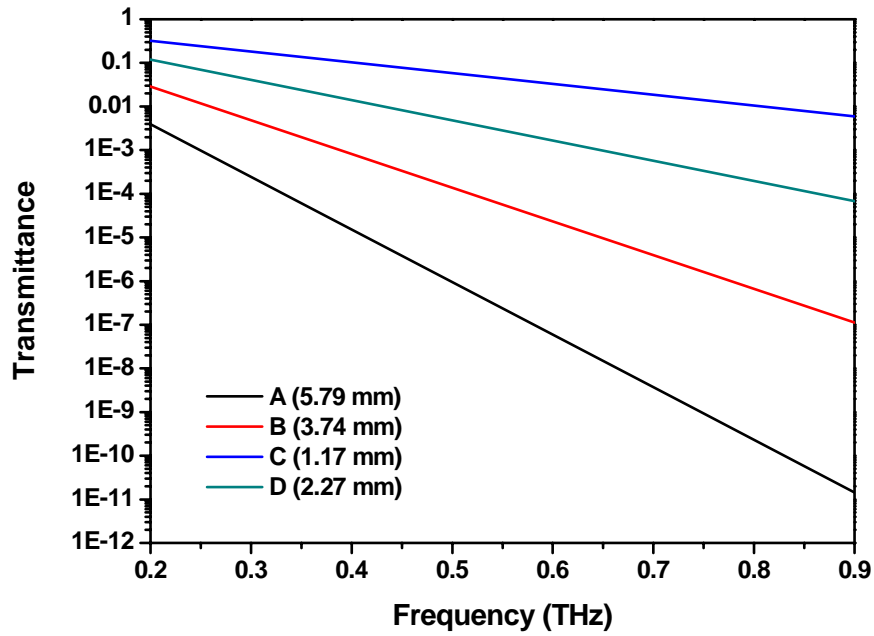


圖 3-2 不同液晶層厚度樣品之 o-ray 穿透光強度 I_o 。

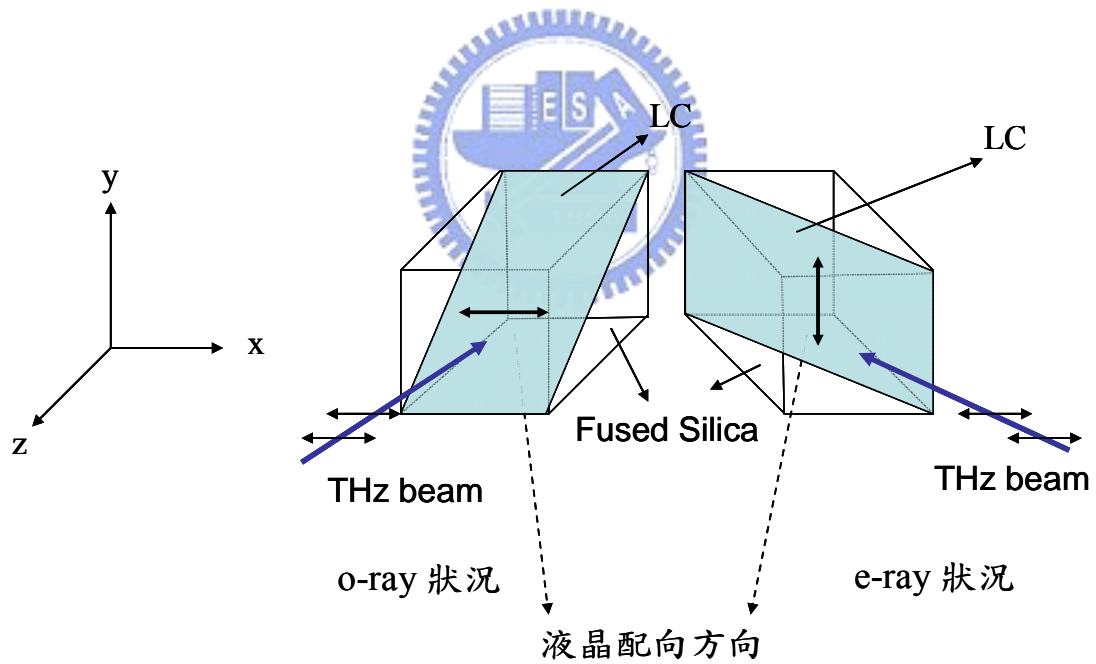


圖 3-3 樣品在尋常光與非尋常光狀況示意圖。

度。圖中顯示液晶層厚度越厚，理論穿透的衰逝波強度越弱，且頻率越高，強度衰減越明顯；因此在圖中會觀察到光強度隨著厚度與頻率增加而減少。

3-3 不同角度下穿透光強度變化

在 e-ray 狀況下，液晶配向方向（磁場方向）與兆赫光偏振方向（ x 方向）平行，設定此時的選轉角度 γ 為 0 度；若在 o-ray 情形下，液晶配向與偏振方向垂直，設定角度 γ 為 90 度。圖 3-3 為樣品在 e-ray 及 o-ray 情形之示意圖。可沿著圖 3-3 的 z 軸旋轉樣品，改變液晶分子與兆赫波偏振方向的夾角來量測元件。

由 Malus's Law 知，當一道光經過偏振片時，穿透光強度隨著光的偏振方向與偏振片穿透軸的夾角變化而改變。假設入射光之電場偏振方向與偏振片穿透軸方向夾一個角度 γ ，則入射光通過的偏振器的電場可以寫成：

$$E_t = E_0 \cos(\gamma) \quad (3-3.1)$$

所以穿透光強度可以表示為：

$$I_t = I_0 \cos^2(\gamma) \quad (3-3.2)$$

也就是說穿透光強度會與 $\cos^2\gamma$ 成正比。

在本實驗中，當兆赫波經過液晶分子時，會分解成垂直液晶長軸方向、與平行液晶長軸方向的兩道光；平行方向的兆赫波會通過液晶分子，而垂直方向的兆赫波會被全反射。所以可以將液晶元件視為和偏振片有相等的效果之偏振器；故當轉動液晶元件時，就相當於改變(3-3.2)式中的 γ ，穿透光強度也會隨著角度變化而改變。

又實驗使用的系統中，激發與接收兆赫的天線，也具有選擇特定偏振光的特性，故實際上可視為將樣品放置於兩偏振器中，穿透光強度實際上會與 $\cos^4\gamma$ 成正比。



第四章 結果與討論

本章節將討論實驗結果理論計算結果的比較。將分成以下幾個部份來討論；首先針對各樣品 e-ray 及 o-ray 兆赫波穿透率的部份做討論，其次探討在不同旋轉角度下樣品穿透率變化情形，最後引進兩個參數來討論樣品偏振效果。

4-1 穿透率量測結果

由 THz-TDS 系統中量測所得之訊號，是兆赫波電場時域圖。本實驗使用的液晶為正型液晶 E7，其折射率 $n_e > n_o$ ，故 e-ray 的訊號會比 o-ray 訊號在液晶中的光程長，也就是說 e-ray 的訊號被延遲的較後面。圖 4-1.1 到 4-1.4 為四個不同樣品之 e-ray、o-ray 與參考樣品的兆赫波時域圖；圖中的兆赫波電場強度因每次實驗的訊號條件有些許不同，所以必須先除以每次的參考樣品訊號再互相比較，即樣品的 e-ray 及 o-ray 之穿透率是絕對的。

其中最厚液晶層的 A 樣品 (1.95 mm) 其 e-ray 及 o-ray 訊號強度比最大 (約 100 倍)，B 樣品 (1.25 mm) 次之 (約 22 倍)，D 樣品 (0.75 mm) 與 C 樣品 (0.40 mm) 最小 (約 4.5 倍)。故由時域圖可知 e-ray、o-ray 訊號強度比值與液晶層厚度成正比。實驗使用之樣品 A ~ C 為方法一製成之樣品，樣品 D 則是用方式二做成的，為何要用不同方法製作樣品，其原因將於 4-1.1 討論。

本實驗使用的 THz-TDS 系統之兆赫波中心頻率約在 0.3 THz 處，其對應的波長是 1 mm，故元件中的液晶層厚度設計在 1 mm 會有較好的效果。其

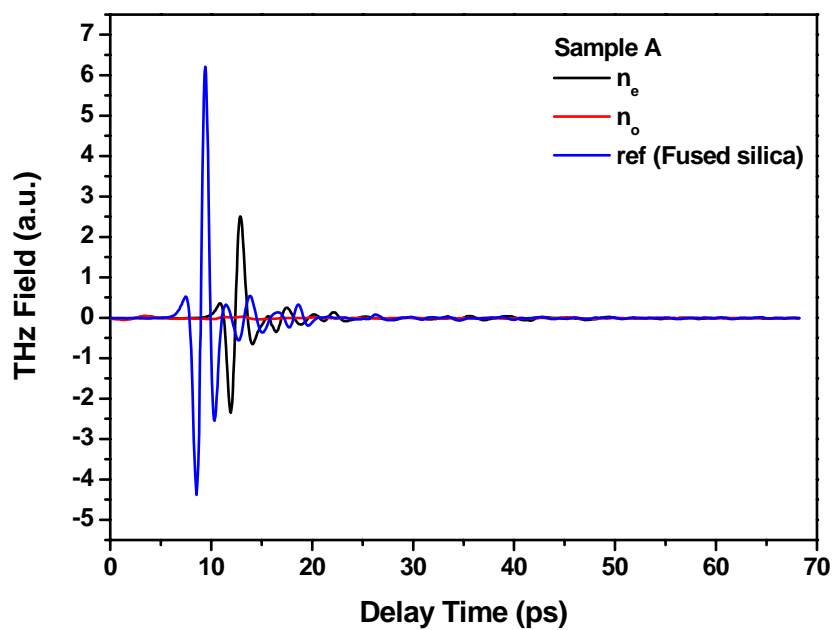


圖 4-1.1 A 樣品尋常光與非尋常光時域圖。

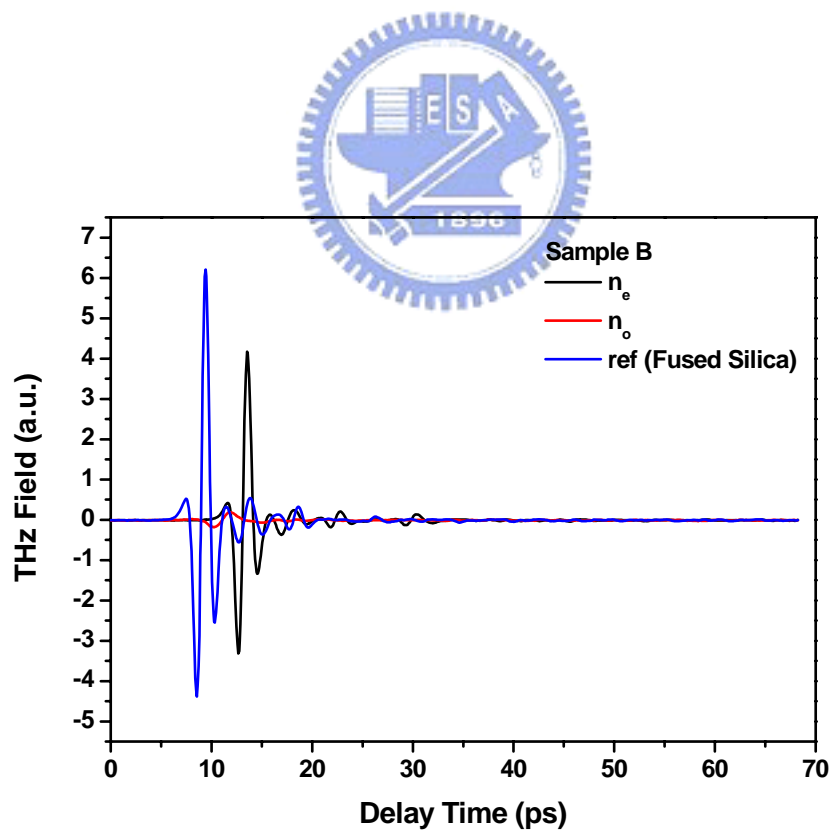


圖 4-1.2 B 樣品尋常光與非尋常光時域圖。

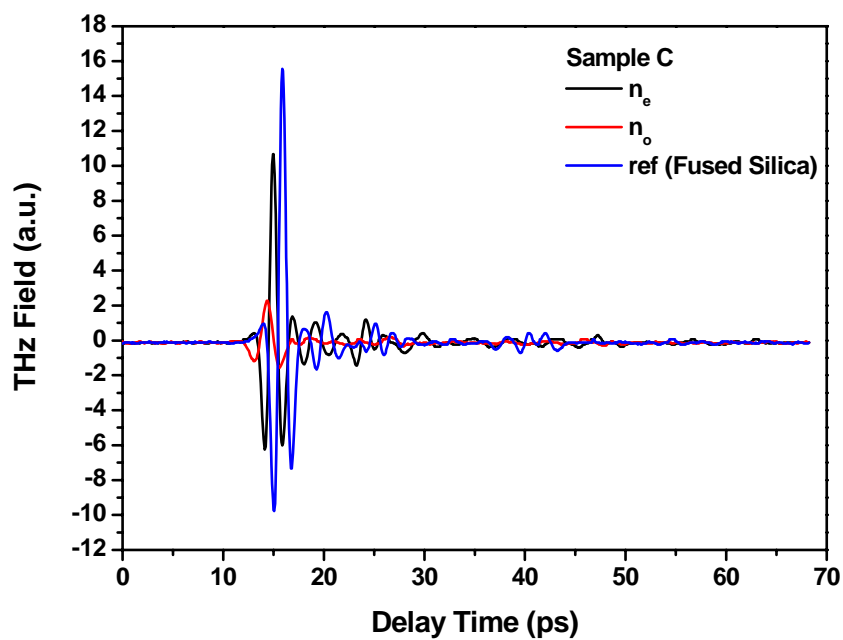


圖 4-1.3 C 樣品尋常光與非尋常光時域圖。

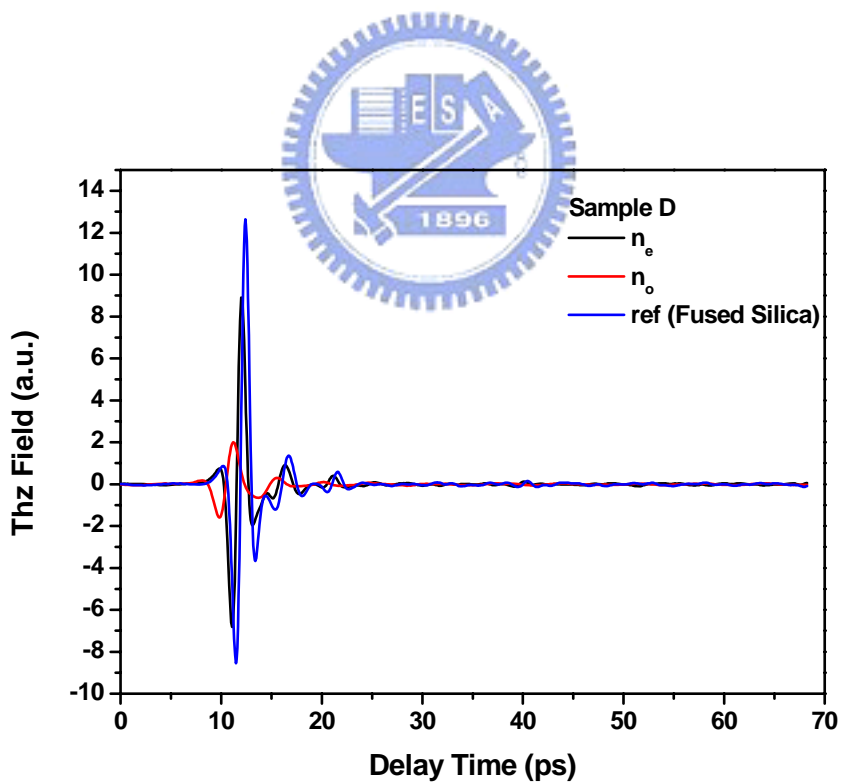


圖 4-1.4 D 樣品尋常光與非尋常光時域圖。

他如高頻的 0.9 THz，其波長換算為 0.33 mm；而在低頻的 0.1 THz，其對應波長為 3 mm。換句話說，以中心波長的角度，厚度 1 mm 的液晶層可以使偏振器達到較好的效果，若想要使高頻區有較好的效果，則需減少液晶層厚度；相反的，若要低頻訊號有較好的效果，就要將液晶層加厚。

4-1.1 非尋常光 (e-ray)實驗結果

將時域訊號透過快速傅立葉轉換 (FFT) 得到頻域訊號，可得知不同頻率下兆赫波強度分布之頻域圖 (圖 4-1.5 ~ 圖 4-1.8)；再將樣品訊號除以參考樣品的訊號後，可以得到樣品穿透率 (Transmittance)。

從理論估計結果得知，e-ray 穿透率在液晶層越厚的狀況下，穿透率越低，且隨頻率上升訊號也隨之變弱，這是因高頻對應之波長相對較小，在相同厚度的液晶樣品中，高頻兆赫波的光程較低頻長，相對液晶吸收兆赫波的損耗也越顯著，穿透率自然就降低，故穿透率是會隨著液晶厚度與頻率的增加而降低。

各樣品在不同頻率下之強度分布如圖 4-1.9 所示。圖中可觀察到不同樣品之穿透率由大到小依序為：C、D、B、A，其順序為樣品由薄到厚的排列。由此可歸納出一個的結論：穿透率與厚度有著厚度越厚穿透率越低的關係。而各樣品的穿透率也隨著頻率的增加有降低的趨勢，實驗結果與理論預期相符合。

其中 C 樣品為利用方式一所製作的樣品，其實際的可視面積因溝槽深度

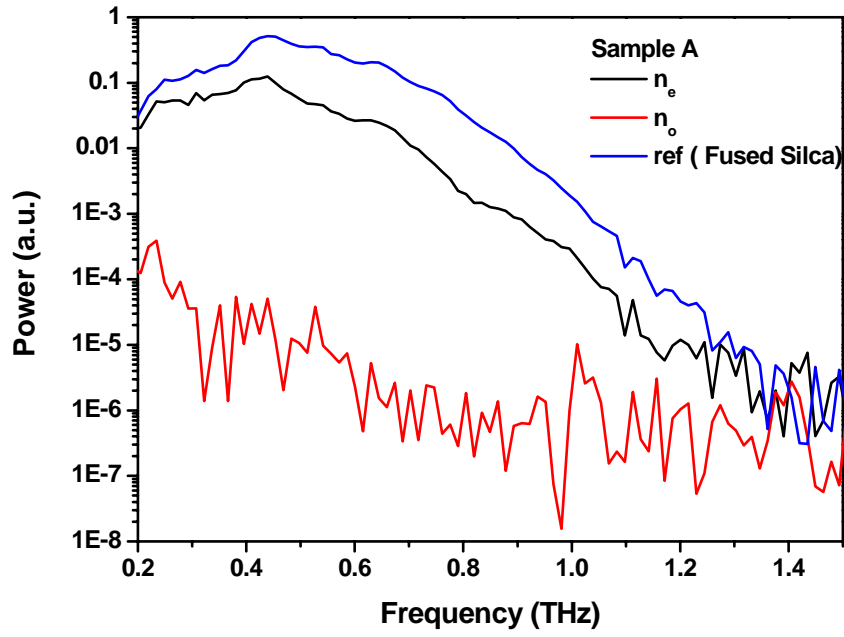


圖 4-1.5 A 樣品之頻域圖

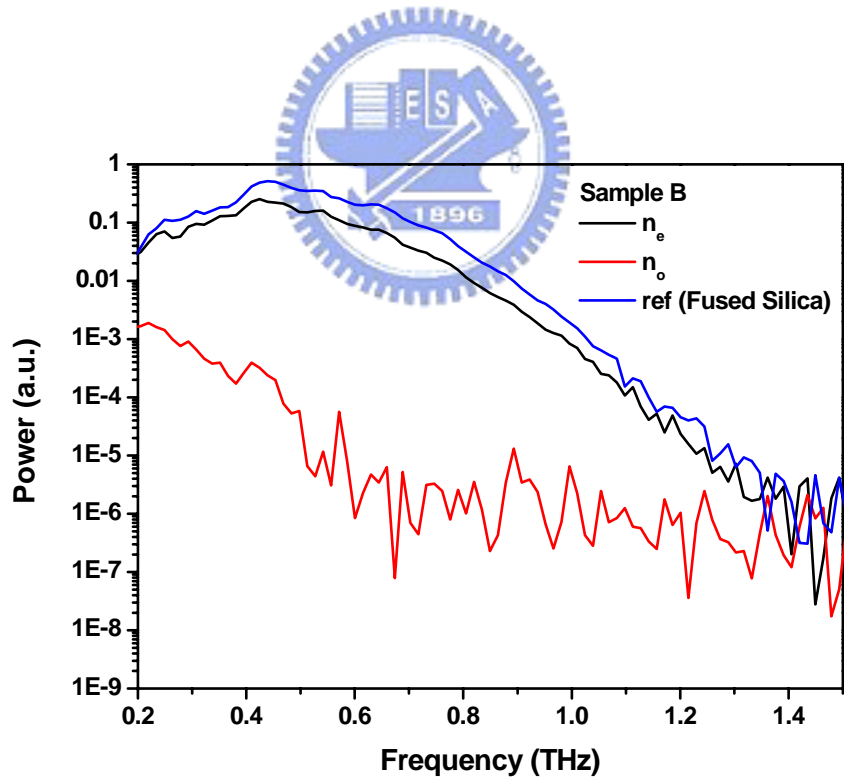


圖 4-1.6 B 樣品之頻域圖

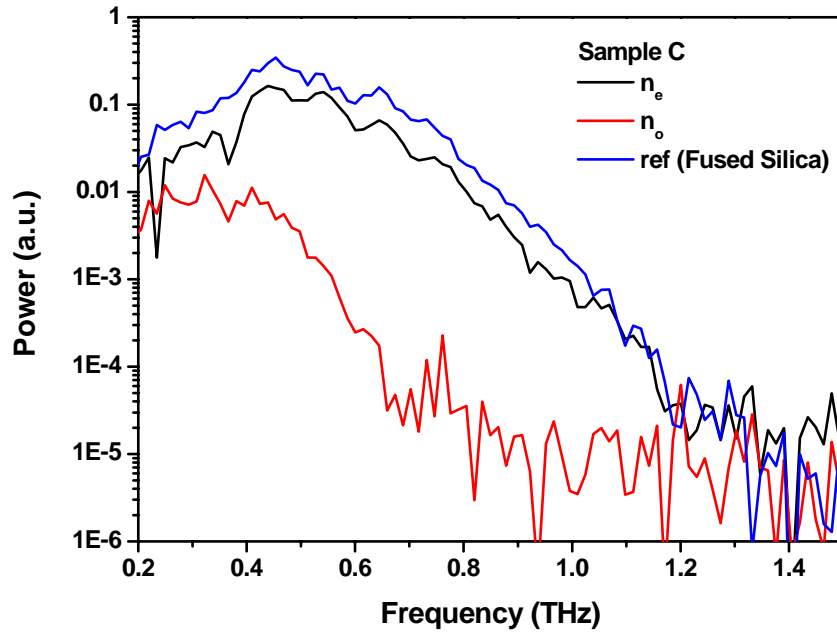


圖 4-1.7 C 樣品之頻域圖

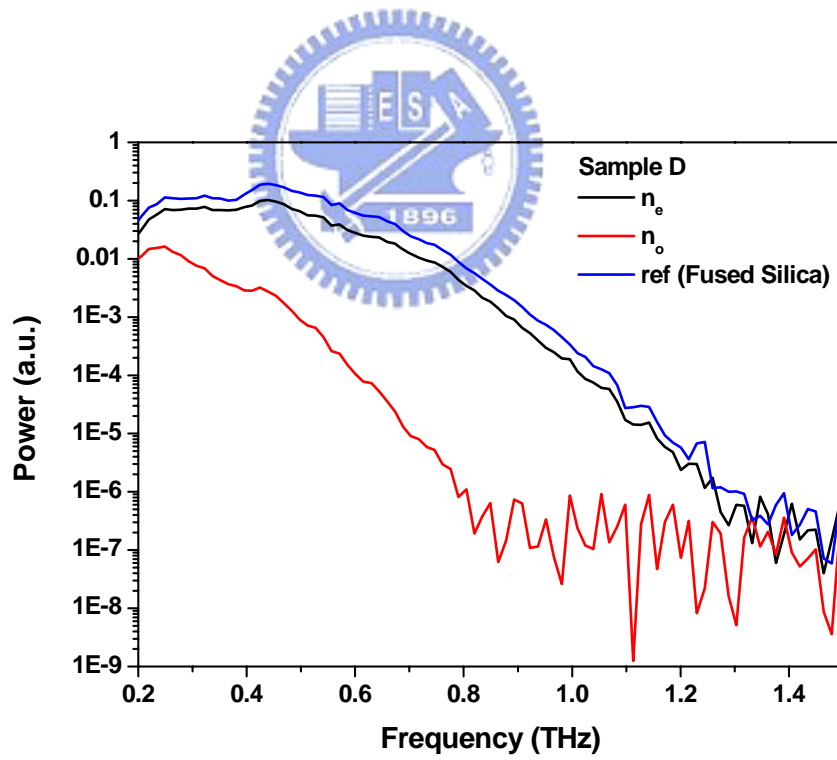


圖 4-1.8 D 樣品之頻域圖

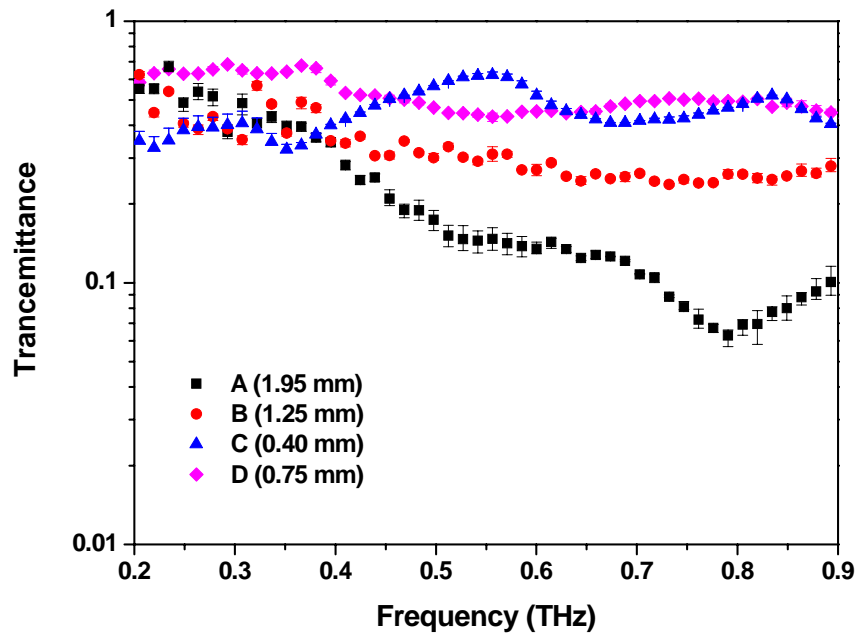


圖 4-1.9 不同液晶層厚度樣品之非尋常光穿透率。



較淺，約為一直徑為 4 mm 的圓，在量測時入射兆赫波強度相對其他樣品（可視範圍為 10 mm）較弱，易受雜訊影響，致使量測訊號跳動明顯。因此為改善此問題，我們改用第二種製作樣品方式，來達到增加可視面積、入射光強度可提升，進而達到增加訊噪比的目的。D 樣品即在此種想法下製作出來。

樣品訊號的可信度可由訊號的強度得知，實驗時會重復取訊號數次，若所量得的兆赫波訊號可重復性越高，代表所量得的訊號越可信，於是將同次實驗取得的兩次實驗結果相除，若值在 1 附近代表訊號重復率越高，其結果可信度越高。圖 4-1.10 ~ 圖 4-1.13 為各樣品在同次量測中得到之兩次訊號強度相除結果。由圖可知，對於 A ~ D 樣品其 e-ray 量測結果皆為可信的；o-ray 部份，對 A 樣品在 0.2 ~ 0.3 THz 是可信的，對於 B 樣品則是在 0.2 ~ 0.55 THz 範圍重復性高，C 樣品在 0.2 ~ 0.65 THz 範圍為可信的，而 D 樣品是在 0.2 ~ 0.7 THz 範圍重復率好。

圖 4-1.14 到 4-1.17 為實驗數據與理論的比較。圖中可見實驗與理論計算結果大致相符；尤其是 B 樣品實驗結果幾乎與理論估計吻合，而 A、D 樣品量測結果則較理論估計稍小，唯 C 樣品因訊號較差，故與理論相差較多。以 e-ray 穿透率的立場來評估，D 樣品的穿透率結果是最佳。

影響 e-ray 穿透率的原因，可就幾點來討論：以兆赫波的波長來說，當厚度增加或頻率上升時，液晶層是波長的數倍，在液晶層內光程越大，液

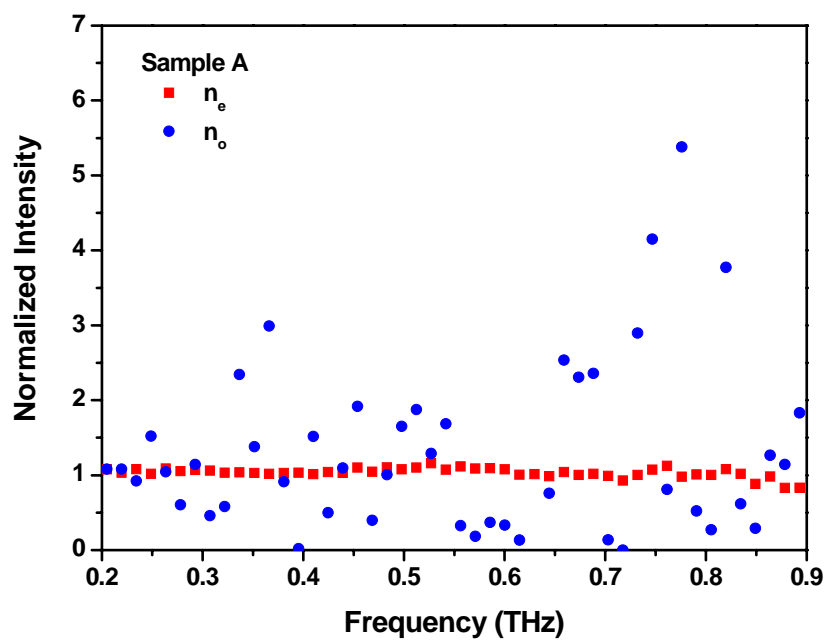


圖 4-1.10 A 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除。

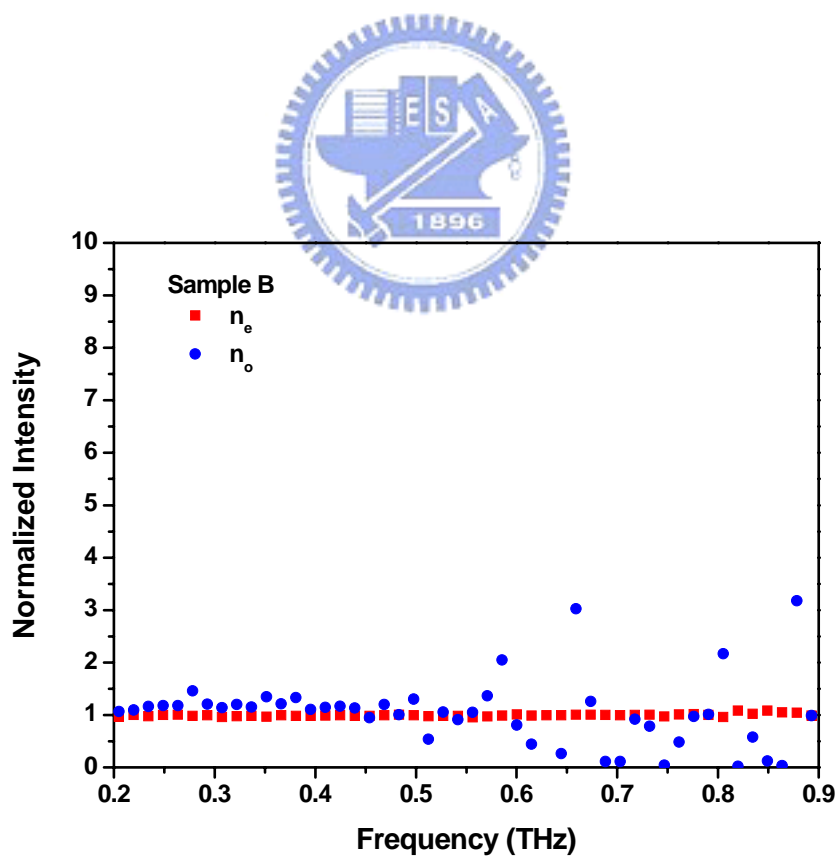


圖 4-1.11 B 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除。

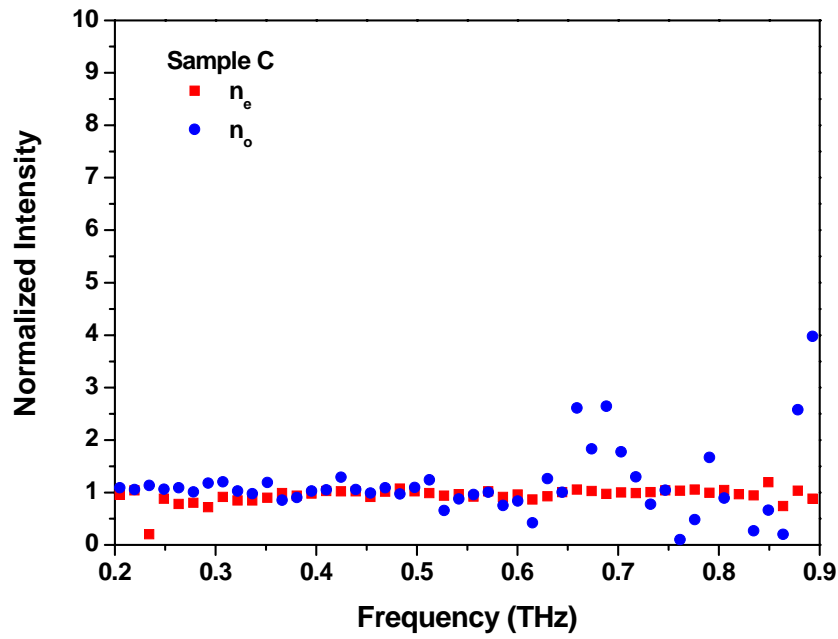


圖 4-1.12 C 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除。

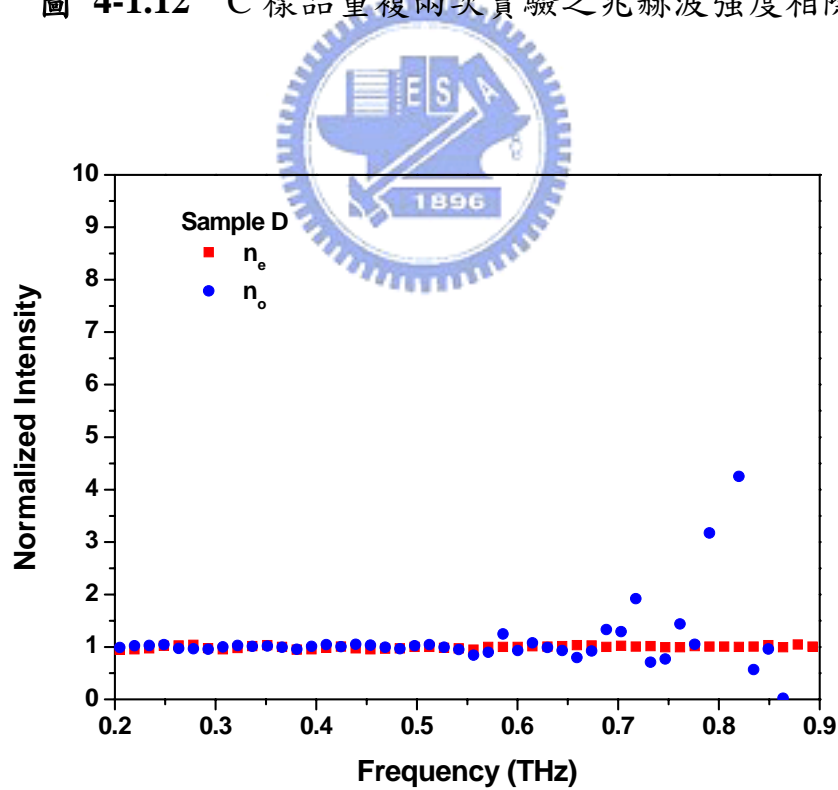


圖 4-1.13 D 樣品重複兩次實驗之兆赫波強度相除。

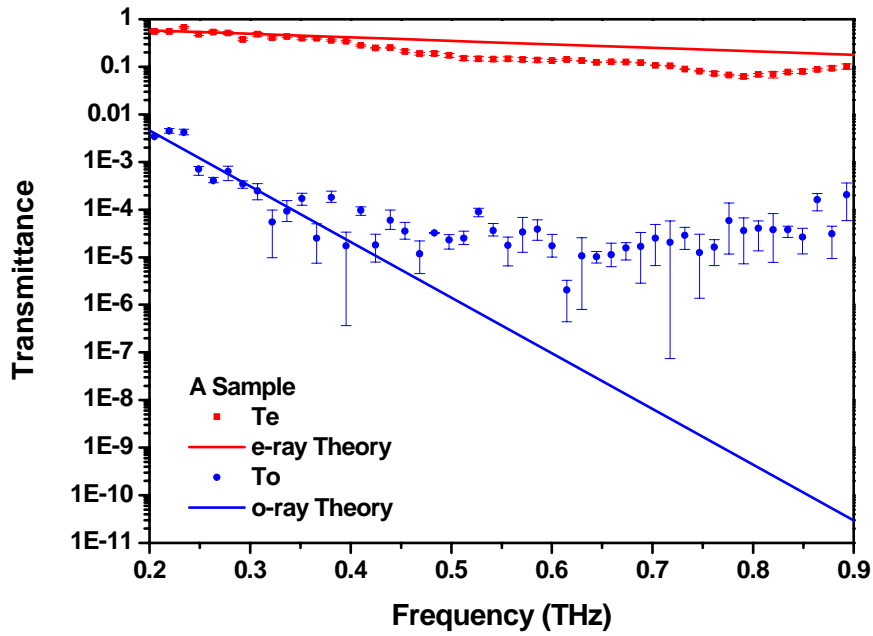


圖 4-1.14 A 樣品之 e-ray 及 o-ray 實驗與理論計算的穿透率。

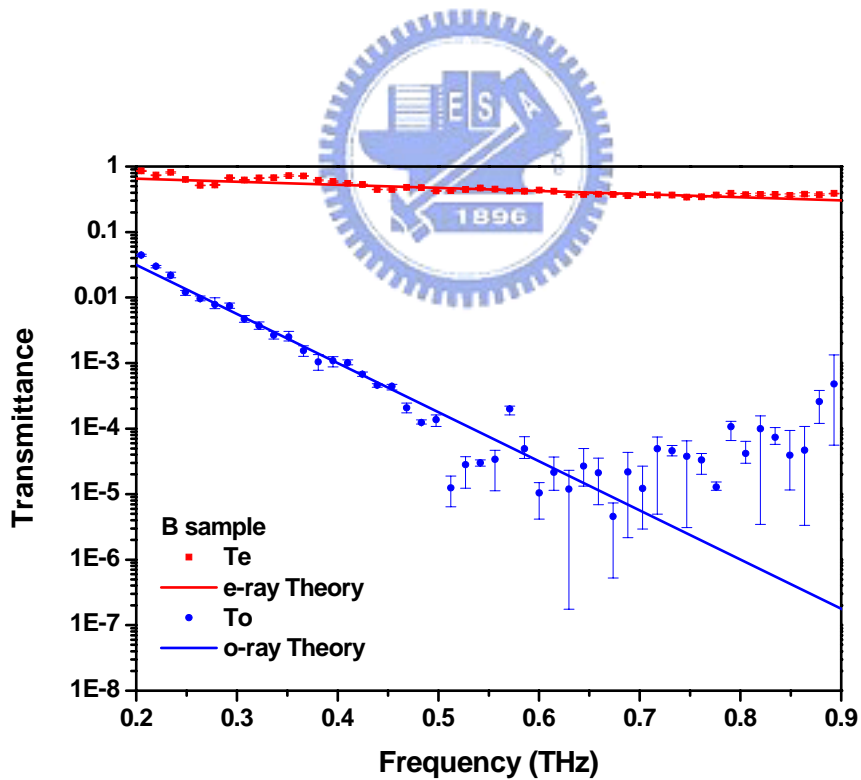


圖 4-1.15 B 樣品之 e-ray 及 o-ray 實驗與理論計算的穿透率。

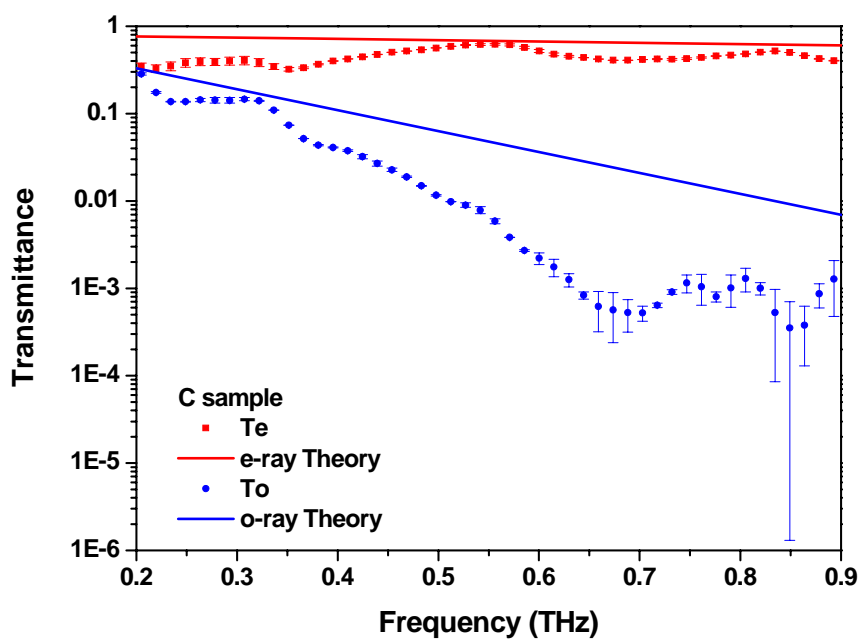


圖 4-1.16 C 樣品之 e-ray 及 o-ray 實驗與理論計算的穿透率。

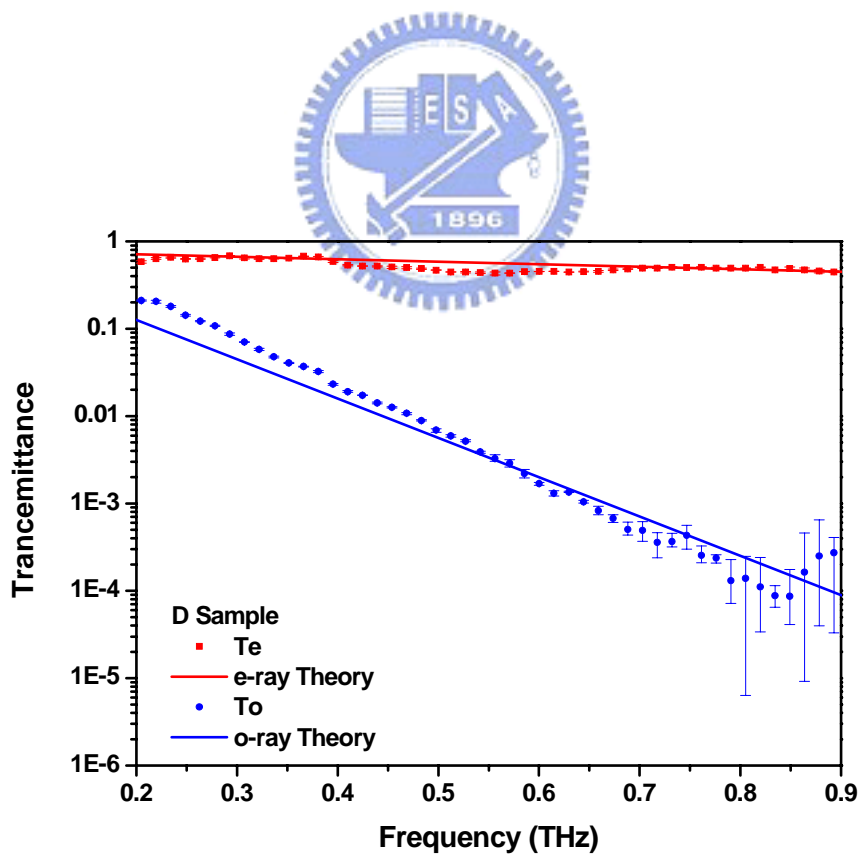


圖 4-1.17 D 樣品之 e-ray 及 o-ray 實驗與理論計算的穿透率。

晶吸收的效果明顯，對穿透率影響大。

4-1.2 尋常光 (o-ray)實驗結果

在 o-ray 設計上的兆赫波是被全反射的，但實際上卻能在樣品之後收集到微弱的訊號，因此理論方面是以衰逝波的觀點來解釋未被吸收的殘餘兆赫波。當樣品的液晶層越薄，液晶的吸收效應越不明顯，衰逝波穿透訊號越強。故在理論預期上，越厚的液晶樣品會有越小的 o-ray 穿透光強度，其全反射效果最佳。

由圖 4-1.18 不同樣品的實驗數據可觀察出：o-ray 穿透光強度依序為 $C > D > B > A$ ；液晶層厚度越厚，能穿透的兆赫波強度越小，故實驗結果與理論預期效果相同。且透過 o-ray 結果中可以更明顯的看到兆赫波隨頻率增加，強度衰減的情況。

當頻率越高頻，液晶厚度相對於波長的波數越大，越能清楚看到液晶吸收效果，強度衰減現象更為明顯。

理論計算與量測結果如圖 4-1.14 ~ 4-1.17 所示。以 A 樣品來說，液晶厚度越厚造成的吸收影響越顯著，所以 o-ray 整體的穿透率都不高，且隨頻率上升迅速衰減，到達系統可解析的訊噪比極限，無法分辨量測訊號與雜訊，因此造成實驗無法完全吻合理論估計。但就各樣品 o-ray 實驗結果而言，A 樣品穿透之兆赫波強度最小，這表示樣品對於不能其偏振器效果越佳。

B 樣品之實驗結果與理論趨勢大致符合，但隨著頻率上升至 0.65 THz，

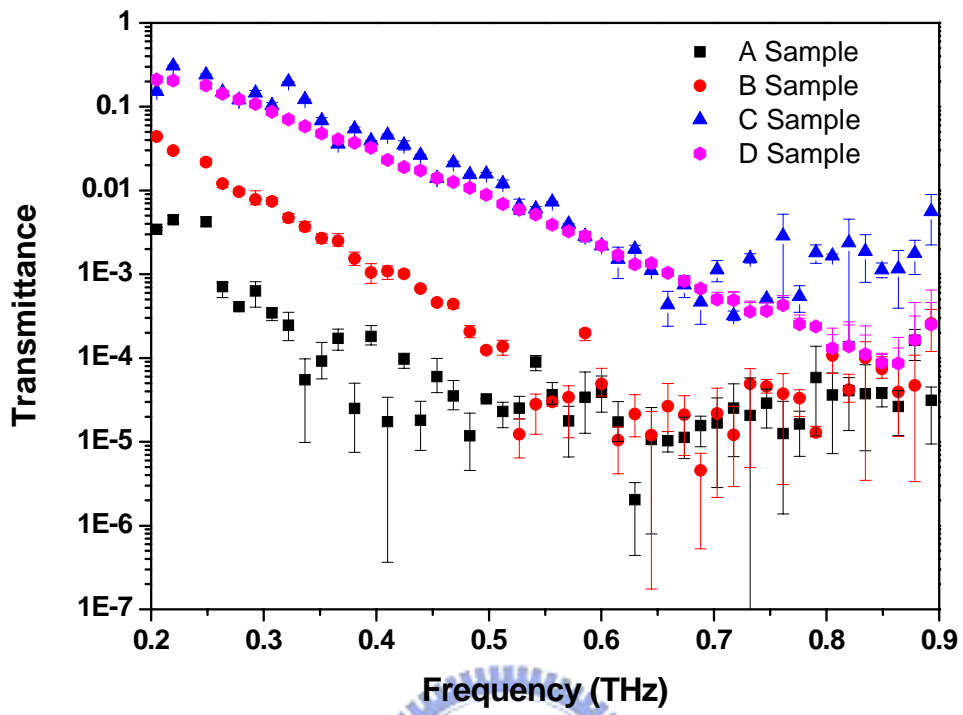


圖 4-1.18 不同液晶層厚度樣品之尋常光穿透率。



訊號開始出現跳動，這是由於系統限制造成的。C 樣品液晶厚度較薄，相對可通過的 o-ray 訊號較大，訊號隨著頻率增加而衰減的趨勢則可持續到 0.7 THz。數據上可見強度衰減的趨勢比理論預計更快，這是因 C 樣品的入射光能量太小（可視面積受限），造成強度衰減過快而無法以理論估計，但整體而言，o-ray 穿透訊號仍高。

D 樣品則是所有實驗結果中與理論估計最為吻合的。因樣品的兆赫波入射面積相對較大，兆赫波之訊噪比最好，且液晶層厚度較 A、B 樣品薄，穿透的兆赫波強度較大，隨頻率增加強度衰減程度尚未達系統極限，可明顯解析訊號。

各樣品數據中，在高頻部分的跳動明顯且無法預測。這是因為系統訊噪比限制的關係，無關於液晶層厚度的條件。系統在頻率大於 0.7 THz 後，訊號的訊噪比會開始變差，所造成誤差也較大。

4-1.3 不同角度下的穿透率

將樣品擺放在兆赫波通過樣品是 e-ray 的狀況，也就是說兆赫波經歷的液晶折射率是 n_e 時，設定此時的旋轉角度 γ 為 0 度。若兆赫波通過樣品是在 o-ray 狀況時，設定此時的旋轉角度 $\gamma = 90$ 度。若樣品在其他旋轉角度，光強度會介於這兩種狀況之間，且是以不同比例的 e-ray 和 o-ray 兩種分量組成。當角度越接近 0 度，e-ray 分量越多，光強度越強；反之若接近 90

度，則 e-ray 分量越少，光強度越弱。

圖 4-1.19 到 4-1.22 為各樣品隨角度變化下之時域圖。由圖可知隨著角度的增加，訊號 (最大處) 往下遞減，整體兆赫波強度也隨之減弱，也就是說角度變大 e-ray 的分量減少 (因主要的光強度貢獻是來自於 e-ray)。透過時域圖可以概略的了解到訊號整體的行為，但若要實際了解各頻率狀況，則仍需將時域訊號透過 FFT 轉換到頻域訊號，觀察實際各角度各頻率之穿透光訊號狀況。

圖 4-1.23 到 4-1.26 為頻域訊號 (未除以參考樣品訊號)，圖中以每 20 度或 30 度為角度間隔，探討兆赫波強度隨角度的變化情形。經由轉動樣品角度，各樣品穿透兆赫波強度減弱的情形，與 Malus's Law 的關係。在 A 樣品實驗結果中，0 度與 90 度訊號強度比值為 $10^2 \sim 10^4$ 倍；B 樣品中，0 度與 90 度訊號比值為 $10 \sim 10^3$ ；C 樣品訊號比值為 $2 \sim 10^2$ ；D 樣品訊號比值為 $3 \sim 10^3$ 。故可知當樣品液晶層厚度越厚，訊號衰減速度越快。亦即液晶厚度越厚，o-ray 被全反射的量越多，能夠穿透過的兆赫波越少，可以達到更好的濾波效果，所以當角度增加時，o-ray 分量增加並不會造成穿透光強度有明顯增加的狀況。若 o-ray 沒有完全的被全反射掉，則增加角度時 o-ray 分量增加，就會造成穿透光強度的減弱情形不明顯。

由頻域圖可以得出和時域圖類似的結果，當樣品中的液晶層厚度增加，隨著角度越接近 90 度，在時域圖上會看到訊號最大處有明顯的下降，頻域

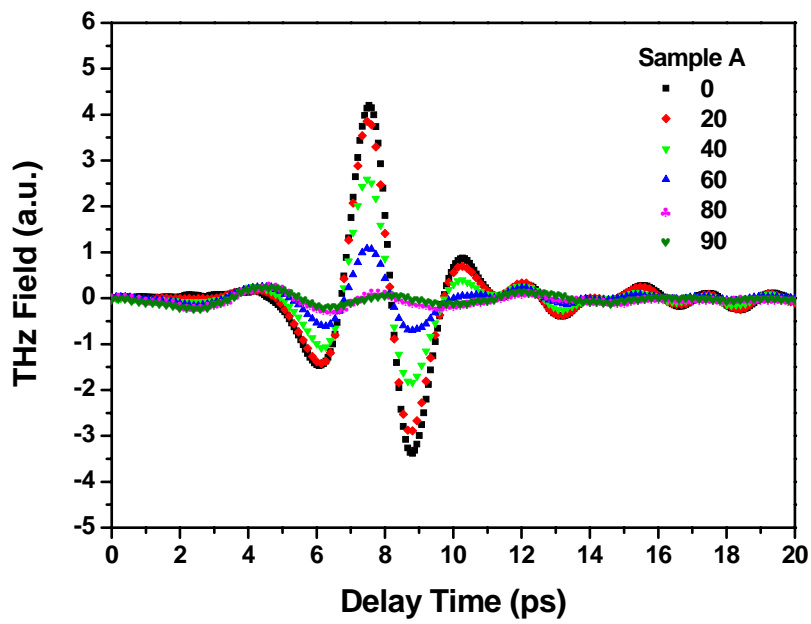


圖 4-1.19 A 樣品之光強度隨角度變化時域圖。

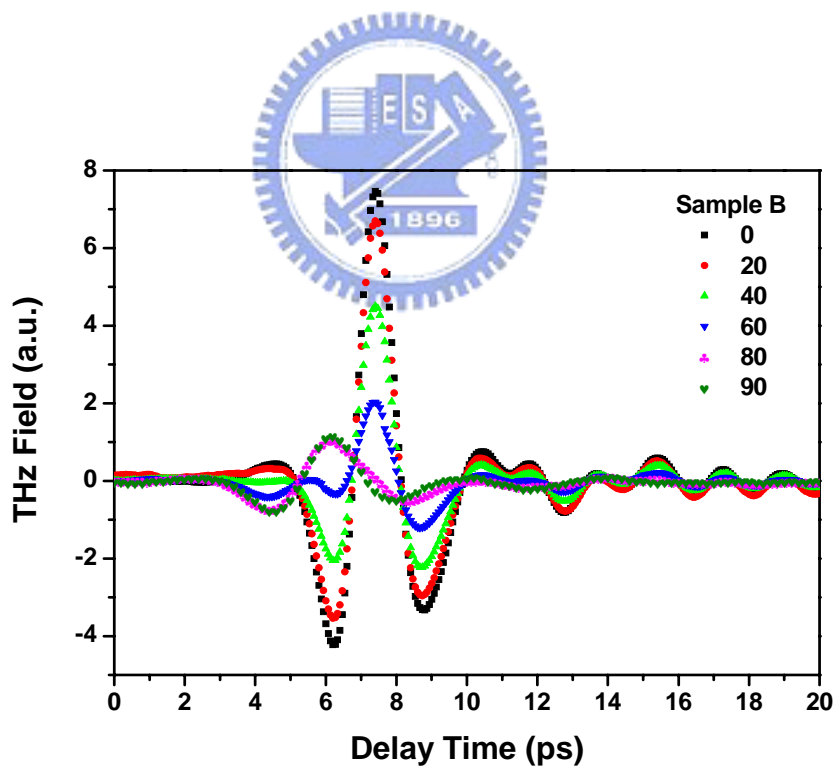


圖 4-1.20 B 樣品之光強度隨角度變化時域圖。

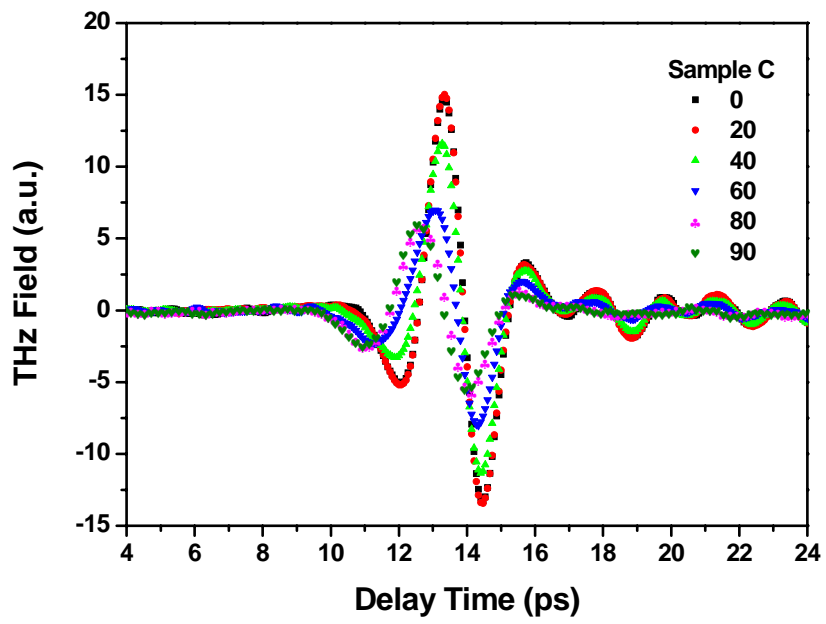


圖 4-1.21 C 樣品之光強度隨角度變化時域圖。

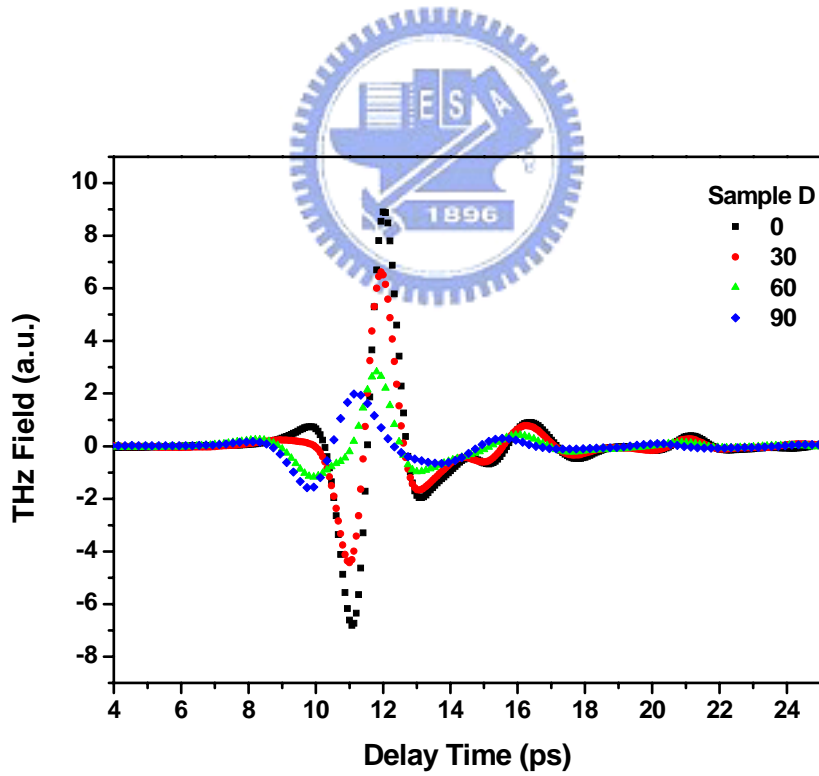


圖 4-1.22 D 樣品之光強度隨角度變化時域圖。

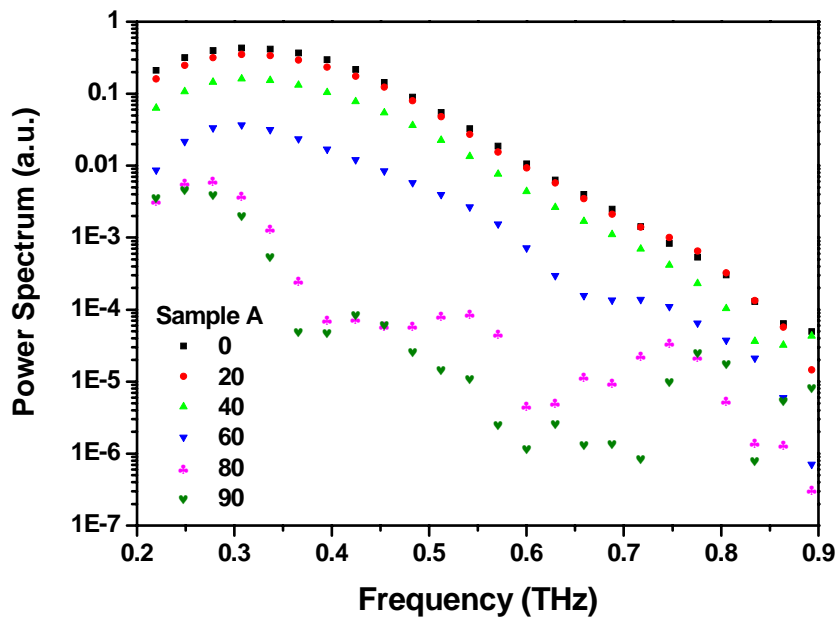


圖 4-1.23 A 樣品之各角度下穿透光頻域圖。

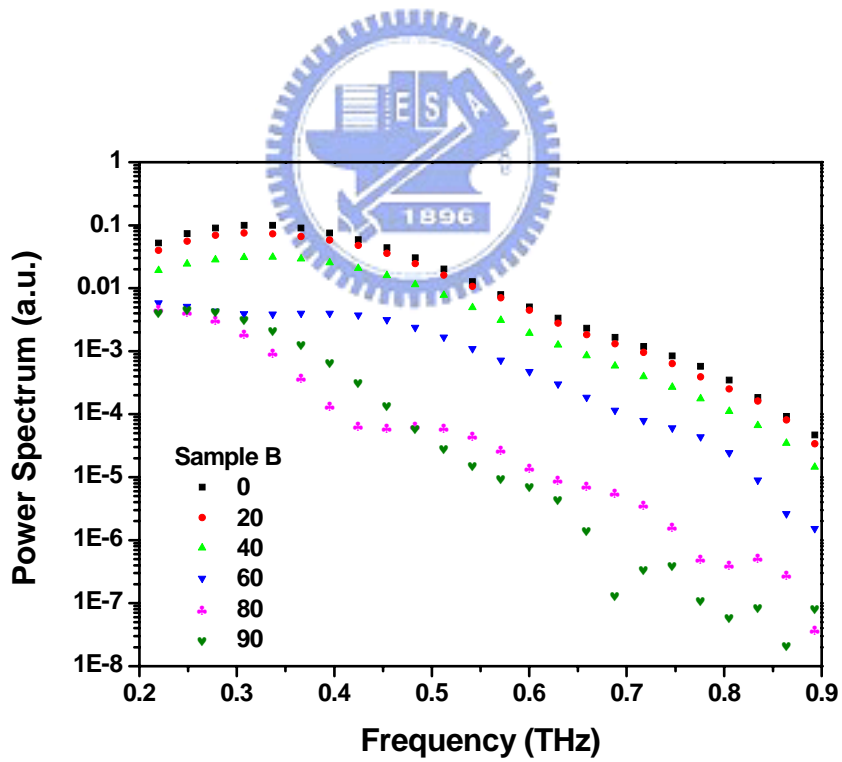


圖 4-1.24 B 樣品之各角度下穿透光頻域圖。

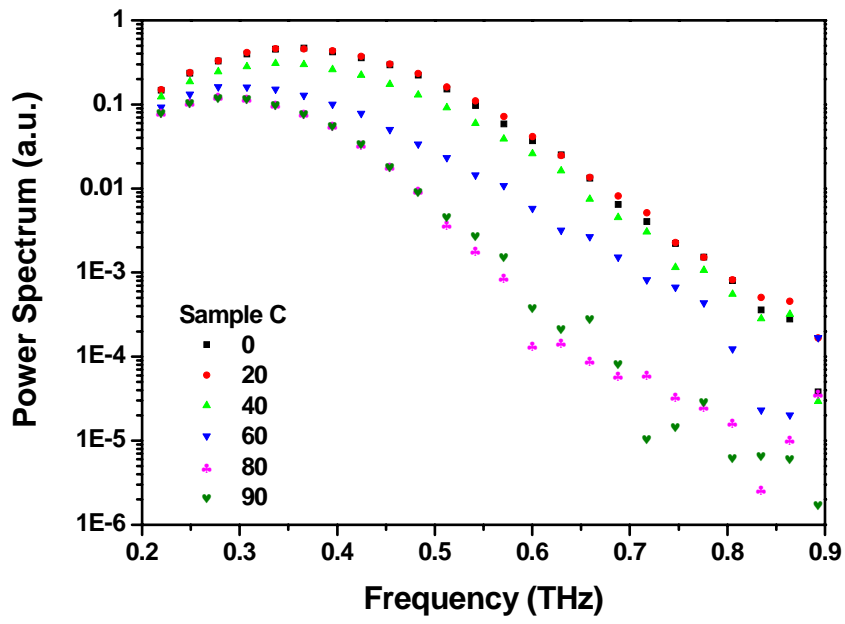


圖 4-1.25 C 樣品之各角度下穿透光頻域圖

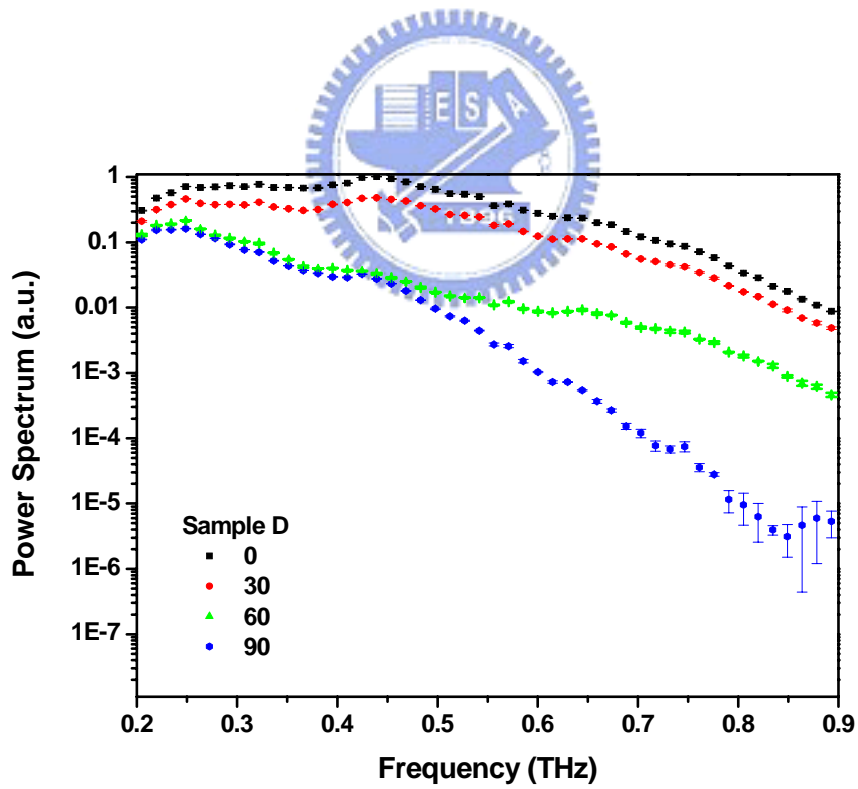


圖 4-1.26 D 樣品之各角度下穿透光頻域圖

圖中則可觀察到在越厚的樣品中穿透訊號強度越小；也就是說越厚的液晶層可以達到更好的濾波效果。

又針對 0.3 THz 頻率訊號處，探討在此特定波長下各樣品的偏振效果，比較不同角度的情形。由於實驗使用的液晶元件為偏振器，故可使用 Malus's Law 來探討不同厚度之液晶元件的偏振器效果。圖 4-1.27 為 0.3 THz 下實驗結果與 Malus's Law 比較。圖中顯示樣品 A 與理論估計最為符合，而隨著樣品厚度的減少（樣品厚度 $B > D > C$ ），實驗點與理論估計差距越大，這是因 o-ray 的全反射不完全（液晶層相對較薄之故），由於實驗上量測的穿透光則同時有 e-ray 和 o-ray 的效果，致使在其他角度時，數據點較理論估計值高。

4-2 偏振器效果參數

本節將引入兩種參數來探討利用液晶製作而成的偏振器元件效果。第一種參數為 Extinction Ratio，另一個參數為 Polarization Factor；兩種參數皆在以下有詳細的定義及描述。

4-2.1 Extinction Ratio

Extinction Ratio 通常是在一般量產的偏振器中用來描述偏振器效果的參數，一般 Extinction Ratio 公式，是用衰減波的光強度除以穿透偏振器的光強度；在本實驗中的定義為： $ER=I_{To}/I_{Te}$ ，其中 I_{Te} 及 I_{To} 為 e-ray 及 o-ray 的穿透光強度。藉由兩種光的比例，來得知偏振效果。在本實驗中 o-ray 會被全反射，若全反射效果不完全，則 e-ray 和 o-ray 比例越接近，Extinction

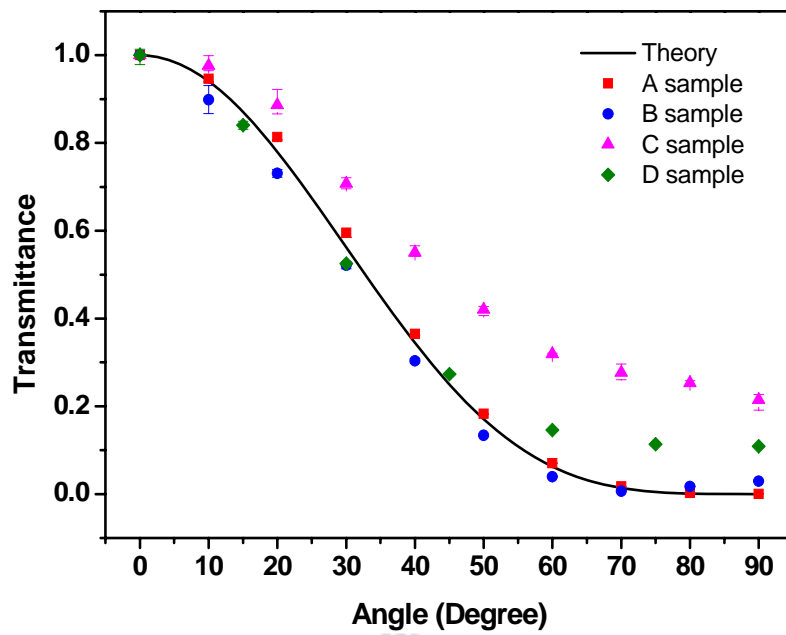


圖 4-1.27 各樣品在 0.3 THz 處穿透光隨角度變化與 Malus's Law 比較。



Ratio 值就會越大，代表偏振器效果越差。反之，若 o-ray 幾乎被全反射，o-ray 的穿透光強度越小，則 e-ray 和 o-ray 的穿透光差距越大，Extinction Ratio 值就會越小，代表偏振器效果越好。

Extinction Ratio 實驗數據與理論比較如圖 4-2.1 到 4-2.4 所示。圖 4-2.1 可以觀察到頻率大於 0.3 THz 範圍，Extinction Ratio 值已經趨於一固定範圍 ($\sim 10^{-4}$)；這是因為大於 0.3 THz 頻率的波長相對較小，而 A 樣品之液晶層厚度為 1.95 mm，已經是波長的數倍，液晶吸收造成的影響較大，e-ray 穿透率隨頻率增加有明顯的下降，但 o-ray 的訊號到 0.3 THz 就已達到最低穿透的限度，故 Extinction Ratio 值很快就達到定值。圖 4-2.3 是樣品中液晶層最薄的 C 樣品的結果，因 o-ray 的產生全反射的量相對較少，o-ray 穿透光的比例高，e-ray 穿透率也高，所以兩者比例接近，Extinction Ratio 值最低可達 10^{-3} ，相較於其他樣品，其偏振效果差。圖 4-2.2 的樣品 B 實驗結果，其 e-ray 的穿透率高，且液晶層厚度也足夠讓 o-ray 產生全反射，Extinction Ratio 值可達 10^{-5} ，偏振效果是各樣品中最好。而圖 4-2.4 的樣品 D 之 Extinction Ratio 值可達 10^{-4} ，雖偏振效果非最好，但實驗數據與理論計算是最為吻合的。

4-2.2 偏極化程度

在一般光學書上，偏極化程度 P 是一個時常被用來探討偏振化程度時使用的參數，其常用的形式是：

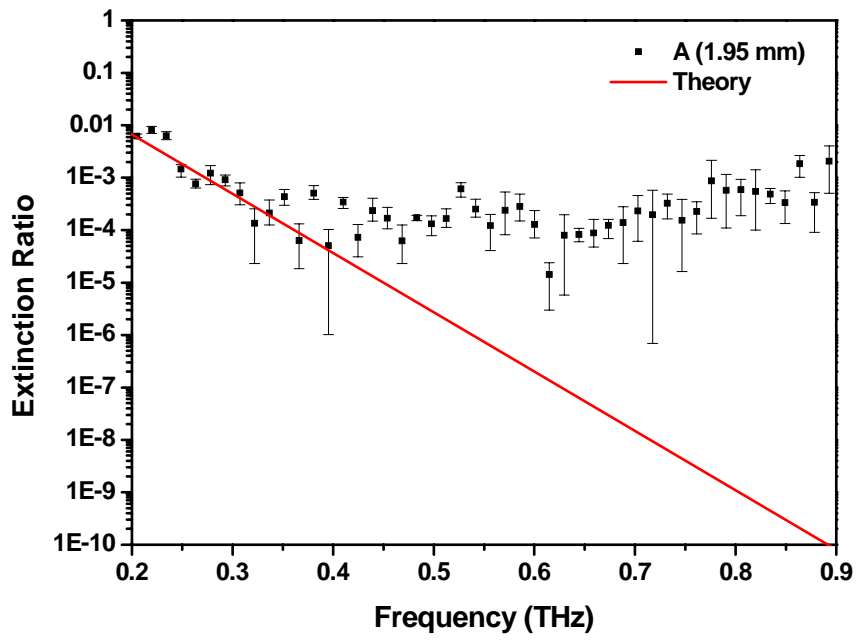


圖 4-2.1 A 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較。

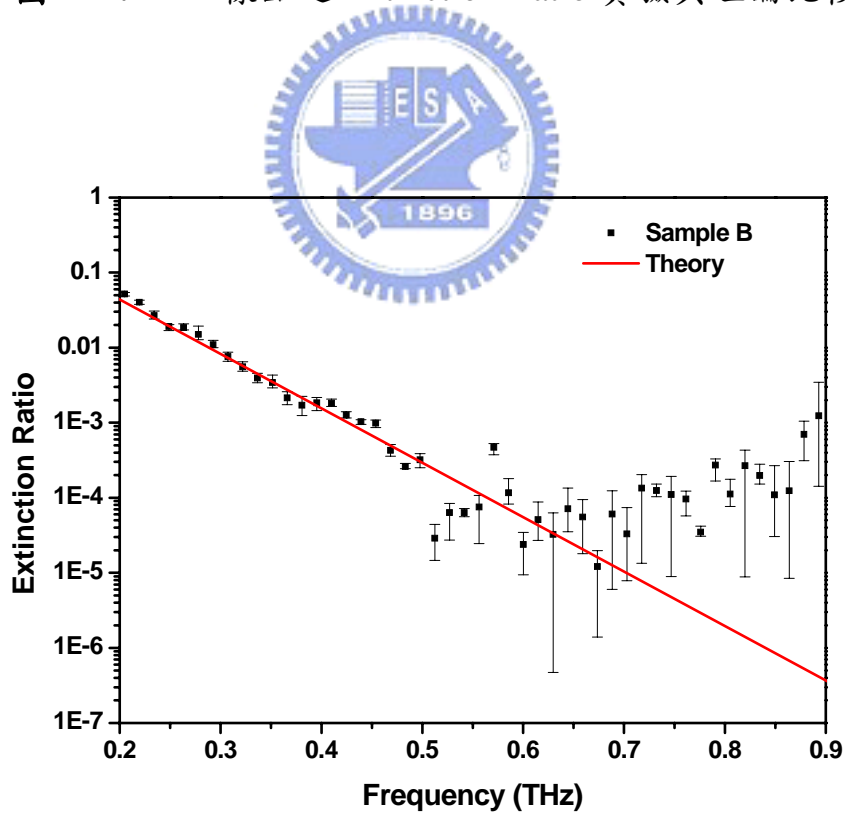


圖 4-2.2 B 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較。

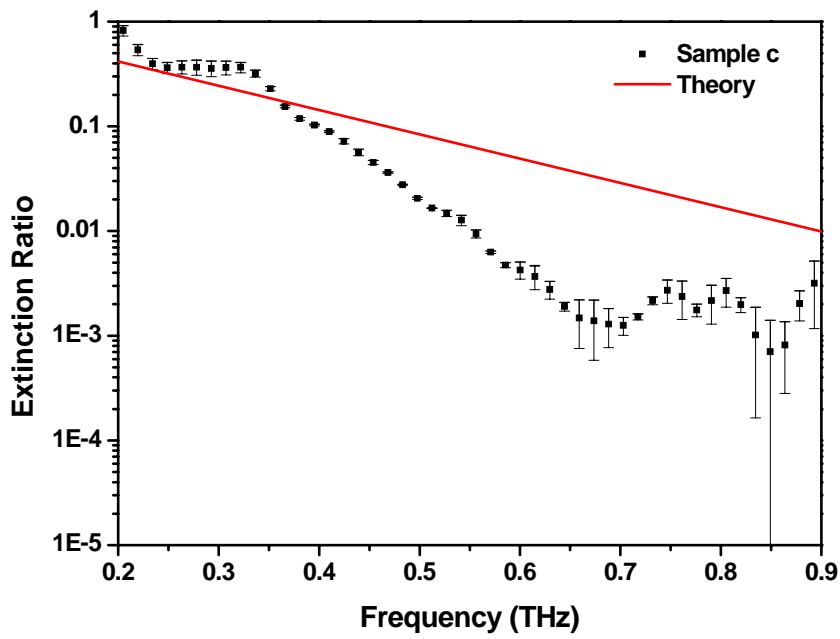


圖 4-2.3 C 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較。

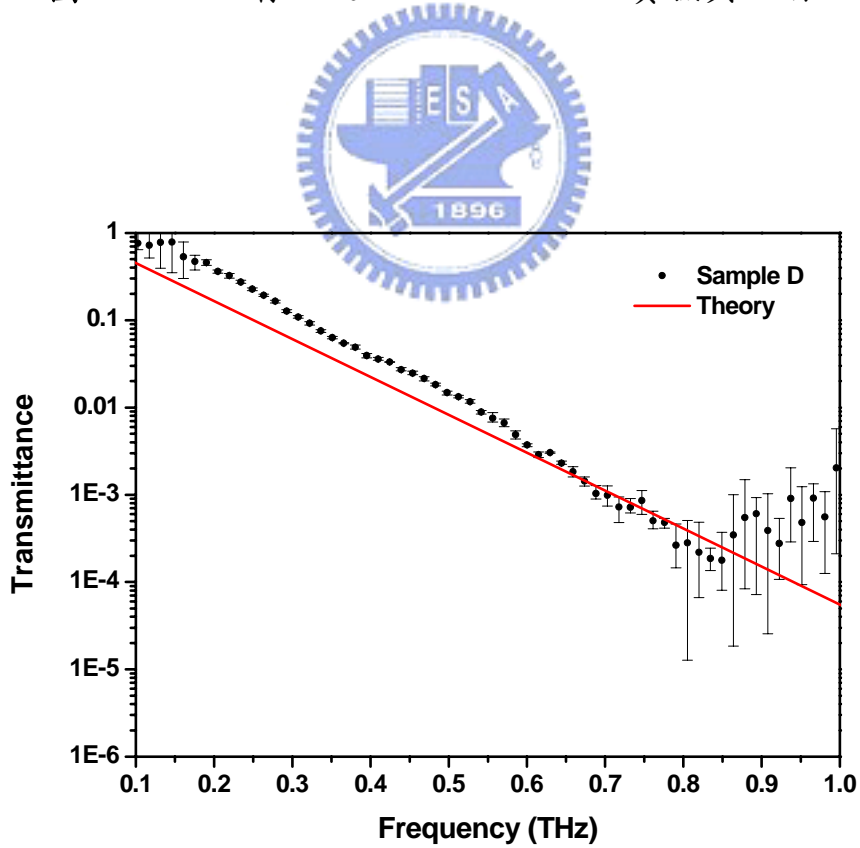


圖 4-2.4 D 樣品之 Extinction Ratio 實驗與理論比較。

$$P = \frac{I_{pol} - I_{unpol}}{I_{pol} + I_{unpol}}$$

其中， I_{pol} 代表被偏振的光強度， I_{unpol} 代表非偏振光強度，此參數可以用來探討偏振光在總強度中所佔的比例。

在本文中借用相同概念，將此參數定義為 [12]：

$$P = \frac{I_{Te} - I_{To}}{I_{Te} + I_{To}}$$

其中 I_{Te} 及 I_{To} 為 e-ray 及 o-ray 的穿透光強度；在一個理想的偏振器狀況下，非偏振方向的光會被完全反射或吸收，其穿透光強度為 0，則此參數在這種狀況下其值為 1。也就是說偏極化程度值為 1 是最理想的狀態。

圖 4-2.5 到 4-2.8 為實際量測結果與理論比較圖。在 A 樣品中，偏極化程度值在 0.2 ~ 0.9 THz 範圍大於 0.98；B 樣品在大於 0.3 THz 範圍的偏極化程度值可達 0.98 以上；C 樣品則須大於 0.45 THz 範圍，偏極化程度值會大於 0.9；最後 D 樣品則在大於 0.45 THz 範圍，偏極化程度值會超過 0.95。故由實驗數據的偏極化程度值來看，A 樣品是具有最佳效果的樣品。與理論預期厚度越厚的樣品，偏極化程度值越接近 1，效果越好的結果吻合。

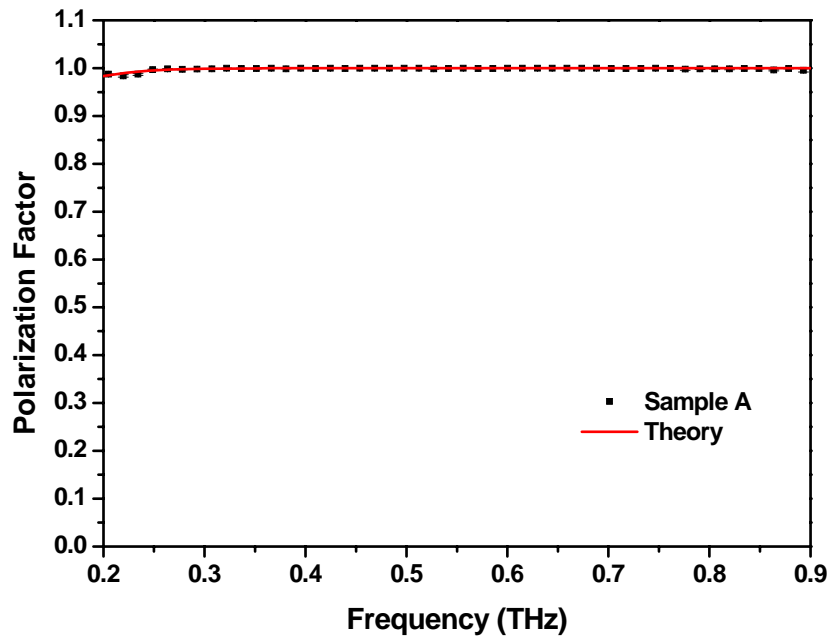


圖 4-2.5 A 樣品之偏極化程度量測結果。

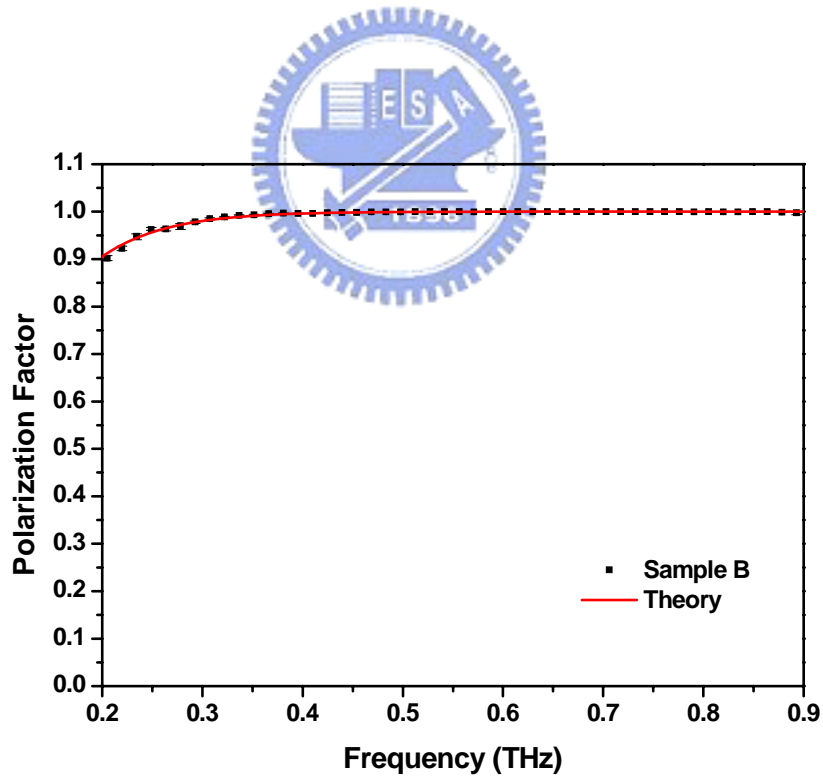


圖 4-2.6 B 樣品之偏極化程度量測結果。

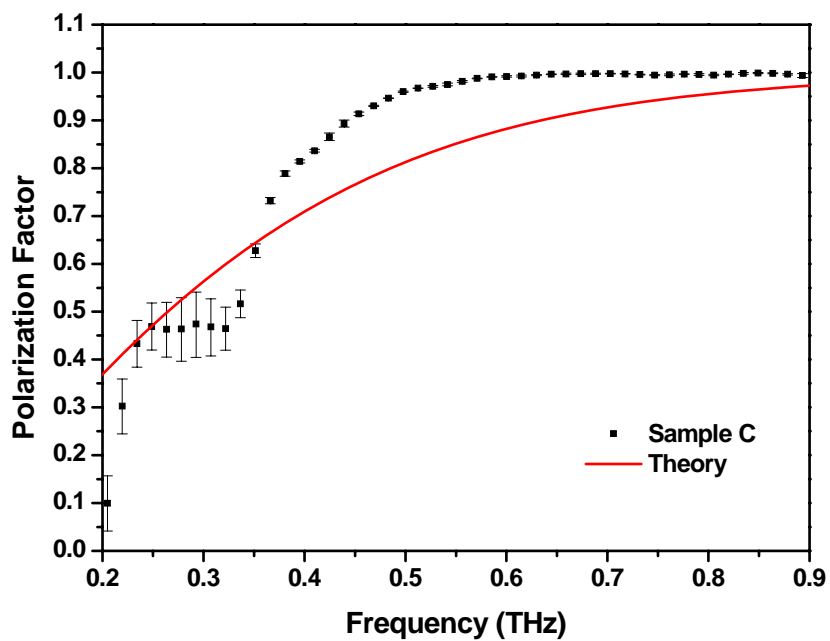


圖 4-2.7 C 樣品之偏極化程度量測結果。

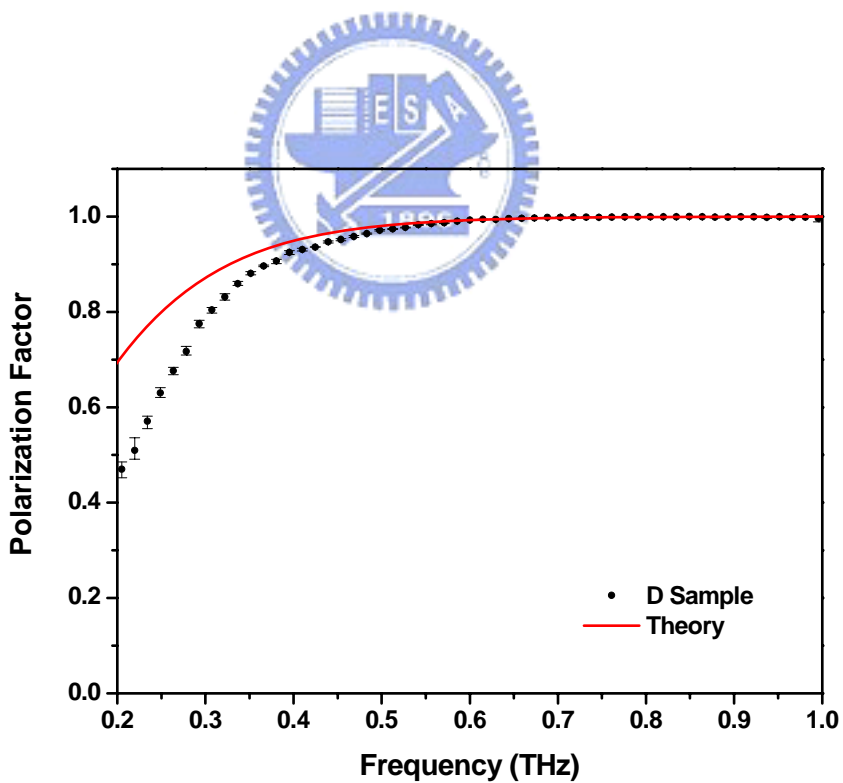


圖 4-2.8 D 樣品之偏極化程度量測結果。

第五章 結論與未來展望

經由第四章的結果與討論可以得出（整理於表 5-1 中）：當液晶層厚度越大，樣品所具有的偏振器效果越好（A、B 樣品），可由 Extinction Ratio 值與偏極化程度值將其效果量化，但其穿透率較低；液晶層厚度小的樣品（D 樣品），可得到較高穿透率，但由 Extinction Ratio 與偏極化程度知其偏振器效果相對較差。故可根據不同的需求來選擇不同厚度的樣品。而 C 樣品則因可視面積較小，入射兆赫波強度小，導致訊號之訊噪比不好，故與理論差異較大。因此可知訊號若能在系統訊噪比可解析的極限下，使用越厚的液晶樣品可得到對比度較高的偏振器效果，但隨著厚度的增加穿透率降低，導致訊噪比變差。

由實驗中的理論計算可知，當入射的角度越大，造成反射的損耗越大，可選擇其他材料來作為盛裝液晶的容器，使入射角度可降低，但此種作法必須選用折射率更大於熔融的二氧化矽材料，會增加空氣-熔融的二氧化矽之間的反射率，故也可在熔融的二氧化矽上鍍一層抗反射膜，或者。對於目前改進實驗的方法，可直接加大樣品尺寸，使入射訊號更強，避免訊噪比太差的問題產生。

Sample	厚度	e-ray 穿透率	o-ray 穿透率	Extinction Ratio	Polarization Factor
A	1.95 mm	低	低	10^{-4}	0.2 ~ 0.9 THz >0.98
B	1.25 mm	中	中	10^{-5}	0.3 ~ 0.9 THz >0.98
C	0.40 mm	最高	最高	10^{-3}	0.5 ~ 0.9 THz >0.95
D	0.75 mm	高	高	10^{-4}	0.45 ~ 0.9 THz >0.95

表 5-1 各樣品實驗結果整理圖。



Reference

- [1] Matthew C. Beard, Gordon M. Turner, and Charles A. Schmuttenmaer *J. Phys. Chem. B*, **106**, 7146-7159 (2002).
- [2] Smith, P. R, Auston, D. H., and Nuss, M. C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 255-260 (1988).
- [3] Fattinger, C. and Grischkowsky, D. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 490-492 (1989).
- [4] L. H. Palmer and M. Tinkham, *Phys. Rev.* **165**, 588 (1968).
- [5] M. V. Exter, C. Fattinger, and D. Grischkowsky, *Opt. Lett.* **14**, 1128 (1989).
- [6] B. B. Hu and M. C. Nuss, *Opt. Lett.* **20**, 1716 (1995).
- [7] R. A. Cheville and D. Grischkowsky, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 1960 (1995).
- [8] A. J. Fitzgerald, E. Berry, N. N. Zinovev, G. C. Walker, M. A. Smith, and J. M. Chamberlain, *Physics in Medicine and biology* **47**, R67 (2002).
- [9] S. W. Smye, J. M. Chamberlain, A. J. Fitzgerald , and E. Berry, *Phys. Med. Biol.* **46**, 101 (2001).
- [10] F. Reinitzer, *Z. Phys. Chem.*, **9**, 241 (1888)
- [11] O. Lehmann, *Z. Phys. Chem.*, **4**, 262 (1889)
- [12] J. P. Auton, *Appl. Opt.*, **6**, 1023 (1967).
- [13] E. Hecht, "Optics", 4^{ed}, Addison Wesley, 1996.
- [14] Dongfeng Liu and Jiayin Qin, *Appl. Optics*, **42**, 3678 (2003).
- [15] P. K. Benicewicz, J. P. Roberts, and A. J. Taylor, *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 2533 (1994).
- [16] P. G. de Gene and J. Prost "The Physics of Liquid Crystals", 1993.