

國立交通大學

電子物理系碩士班

畢業論文

一系列液態晶體在兆赫波段下的光學常數

The optical constants of the homologous series of alkyl
cyanobiphenyl liquid crystals (nCB, n=6 to 12) in THz Range

研究生：許勝嵐

指導教授：趙如蘋 教授

中華民國九十七年七月

一系列液態晶體在兆赫波段下的光學常數

The optical constants of the homologous series of alkyl
cyanobiphenyl liquid crystals (nCB , n=6 to 12) in THz Range

研究生：許勝嵐

Student：Sheng-Lan Hsu

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碩士班

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Electrophysics

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fullfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Electrophysics

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

一系列液態晶體在兆赫波段下的光學常數

研究生：許勝嵐

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

我們利用兆赫波時域頻譜儀 (THz-TDS) 量測 nCB (n=6-12) 系列液晶在兆赫波段下的光學性質。實驗結果顯示 6CB、7CB 和 8CB 在兆赫波段下的雙折射率範圍分別為 0.106-0.130、0.059-0.115 和 0.077-0.124。根據文獻[12]，6CB、7CB 和 8CB 在可見光下的雙折射率範圍分別為 0.109-0.143、0.123-0.171 和 0.093-0.153。9CB、10CB、11CB 和 12CB 在液態時的折射率分別為 1.56、1.60、1.55 和 1.56，其吸收係數均小於 0.05。液晶 nCB (n=6 to 12) 在 0.2-1.6THz 都沒有明顯的吸收頻譜。

The optical constants of the homologous series of alkyl cyanobiphenyl liquid crystals (nCB , n=6 to 12) in THz Range

Student: Sheng-Lan Hsu

Advisor: Dr. Ru-Pin Pan

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The complex refractive indices of the homologous series of alkyl cyanobiphenyl liquid crystals (nCB , n=6 to 12) have been determined by using the terahertz time-domain spectroscopy. We have shown that the terahertz (0.2-1.6THz) birefringence of 6CB, 7CB, and 8CB are 0.106-0.130, 0.059-0.115, and 0.077-0.124, respectively. Based on the bibliography, the visible birefringence of 6CB, 7CB, and 8CB are 0.109-0.143, 0.123-0.171, and 0.093-0.153, respectively.

The real indices of 9CB, 10CB, 11CB and 12CB in isotropic phase are around 1.56, 1.60, 1.55 and 1.56, respectively. Their extinction coefficients are all less than 0.05. There is no sharp absorption features of nCB (n=6 to 12) in the range of 0.2-1.6THz.

致謝

碩士班兩年真的過的很快，在這期間由衷的感謝趙如蘋老師的教導，當我在實驗上遇到困難時，老師總是細心且耐心的指導我，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、家任學長，除了在實驗上指導我，同時也教導我做人做事的道理，真的很感激！感謝阿達學長在程式上的幫忙，讓我對程式有了新的認識。感謝昱智，你總是毫無保留的跟我討論實驗方面的問題，真的很謝謝你。感謝承山，常常協助我做實驗。實驗室的同儕，孟秋、天昱、昱智、馬妹，很高興能和你們在同一間實驗室，我們總是有很多有趣、歡樂、美好的時光，碩士班兩年的記憶我是永遠不會忘記的。實驗室的學弟，哲瑄、正彬、小白熊、韋達、阿鈺，很高興認識你們，你們總是很有活力。

感謝爸媽的支持，你們總是在背後默默支持我。感謝女友的陪伴，一路上無怨無悔的幫助我，謝謝你讓我變得更好。

最後感謝曾經幫助過我的人，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
致謝	iii
目錄	iv
圖表目錄	vi
一、 緒論	1
1-1 研究動機與目的	1
1-2 液態晶體介紹	1
1-3 論文架構	2
二、 實驗系統及樣品製作	6
2-1 兆赫波量測系統	6
2-1-1 兆赫波產生	6
2-1-2 兆赫波量測系統架構	6
2-1-3 兆赫波偵測原理	7
2-2 樣品設計	9
2-2-1 清洗玻璃	9
2-2-2 鍍製配向膜	9
2-2-3 磨刷 PI 配向膜	10
2-2-4 組裝液晶盒及封合	10
2-3 液晶配向效果	12
2-4 加熱系統	19
2-5 實驗方法	22

三、	折射率理論分析.....	23
3-1	折射率理論.....	23
3-2	折射率分析.....	26
四、	實驗結果與分析.....	30
4-1	電場時域圖量測結果.....	30
4-2	光強度頻域圖與相位頻域圖.....	31
4-3	折射率與頻率的關係.....	32
4-3.1	向列型液晶 6CB、7CB、8CB	32
4-3.2	層狀液晶 9CB、10CB、11CB、12CB	33
4-4	折射率與溫度的關係.....	35
4-5	液晶的雙折射率.....	36
五、	結論與未來展望.....	61
參考文獻	65
附錄	66



圖 表 目 錄

圖 1-2.1	液晶的種類.....	4
圖 1-2.2	nCB(n=1~12)液晶的相變溫度圖.....	5
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 2-3.1	液晶座標轉換示意圖.....	15
圖 2-3.2	液晶樣品拍照示意圖.....	15
圖 2-3.3	6CB、7CB、8CB 液晶樣品配向效果照片.....	16
圖 2-3.4	8CB 液晶樣品配向效果照片.....	17
圖 2-3.5	11CB 液晶樣品配向效果照片.....	18
圖 2-4.1	加熱系統圖.....	20
圖 2-4.2	加熱系統溫度測試圖.....	21
圖 3-1.1	液晶樣品.....	23
圖 3-1.2	參考樣品.....	23
圖 3-2.1	Fused silica 的折射率 n 、 κ	29
圖 4-1	6CB 液晶樣品與參考樣品 THz 時域圖.....	37
圖 4-2	6CB 液晶樣品在 26°C-28°C 非尋常光 THz 時域圖.....	37
圖 4-3	6CB 液晶樣品在 26°C-28°C 尋常光 THz 時域圖.....	38

圖 4-4	6CB 液晶樣品尋常光與非尋常光強度頻域圖.....	38
圖 4-5	6CB 液晶樣品尋常光與非尋常光相位頻域圖.....	39
圖 4-6	液晶 6CB 在 25°C 折射率.....	39
圖 4-7	液晶 6CB 在 40°C 折射率.....	40
圖 4-8	6CB 分別在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光折射率 實部對溫度變化關係圖.....	40
圖 4-9	6CB 分別在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率 實部對溫度變化關係圖.....	41
圖 4-10	6CB 在 0.41 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	41
圖 4-11	6CB 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	42
圖 4-12	7CB 液晶樣品與參考樣品 THz 時域圖.....	42
圖 4-13	7CB 液晶樣品在 32°C-40°C 非尋常光 THz 時域圖.....	43
圖 4-14	7CB 液晶樣品在 32°C-40°C 尋常光 THz 時域圖.....	43
圖 4-15	7CB 液晶樣品尋常光與非尋常光強度頻域圖.....	44
圖 4-16	7CB 液晶樣品尋常光與非尋常光相位頻域圖.....	44
圖 4-17	液晶 7CB 在 36°C 折射率.....	45
圖 4-18	液晶 7CB 在 46°C 折射率.....	45
圖 4-19	7CB 分別在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光折射率 實部對溫度變化關係圖.....	46
圖 4-20	7CB 分別在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率 實部對溫度變化關係圖.....	46
圖 4-21	7CB 在 0.41 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	47
圖 4-22	7CB 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	47

圖 4-23	8CB 液晶樣品與參考樣品 THz 時域圖.....	48
圖 4-24	8CB 液晶樣品在 36°C-40°C 非尋常光 THz 時域圖.....	48
圖 4-25	8CB 液晶樣品在 36°C-40°C 尋常光 THz 時域圖.....	49
圖 4-26	8CB 液晶樣品尋常光與非尋常光強度頻域圖.....	49
圖 4-27	8CB 液晶樣品尋常光與非尋常光相位頻域圖.....	50
圖 4-28	液晶 8CB 在 36°C 折射率.....	50
圖 4-29	液晶 8CB 在 50°C 折射率.....	51
圖 4-30	8CB 分別在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光折射率 實部對溫度變化關係圖.....	51
圖 4-31	8CB 分別在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率 實部對溫度變化關係圖.....	52
圖 4-32	8CB 在 0.41 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	52
圖 4-33	8CB 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	53
圖 4-34	液晶 9CB 在 54°C 折射率.....	53
圖 4-35	液晶 10CB 在 56°C 折射率.....	54
圖 4-36	液晶 11CB 在 61°C 折射率.....	54
圖 4-37	液晶 12CB 在 66°C 折射率.....	55
圖 4-38	nCB (n=6-12) 在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光 折射率實部對溫度變化關係圖.....	56
圖 4-39	nCB (n=6-12) 在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光 折射率實部對溫度變化關係圖.....	57
圖 4-40	nCB (n=6-12) 在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光 折射率虛部對溫度變化關係圖.....	58
圖 4-41	nCB (n=6-12) 在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光 折射率虛部對溫度變化關係圖.....	59

圖 5-1	nCB (n=6-8) 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	62
圖 5-2	nCB (n=6-8) 在可見光下，雙折射率對溫度變化關係圖.....	62
表 2-2	液晶樣品與參考樣品的厚度.....	11
表 4-4.1	公式 (4-4.1) 的擬合參數.....	60
表 5-1	nCB (n=6-8) 液晶在 nematic phase，折射率 n_e 、 n_o 、 K 的範圍；在 0.41、0.60THz 下，雙折射率 Δn 的範圍.....	63
表 5-2	nCB (n=6-12) 液晶在 isotropic phase 的折射率值 n 、 K	64



第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

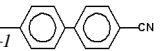
液態晶體的雙折射率 (birefringence) 可以輕易的被外加電場所控制。藉由此特性，許多利用液晶做為材料的產品，便迅速的在市場上發展，如「液晶顯示器」是我們最熟悉的產品。液晶顯示器從最早的靜態顯示 (如：溫度計、電子計算機、電子錶等) 到後來的動態顯示 (如：電腦液晶螢幕、PDA手機、液晶電視等)，都不斷地研究改進，以期望能夠達到更好的顯示效能[1]。

近年來，液晶光學性質的研究與應用主要以探討可見光與遠紅外光波段範圍下的使用[2][3]。然而，隨著兆赫波技術迅速的發展，我們必須將液晶光學性質的研究延伸到兆赫波段的範圍。為了研究開發兆赫波光學元件，如：相移器 (phase shifter)、偏振片 (polarizer / analyzer) 以及波長選擇器 (wavelength selection filter) …等，所以我們第一個步驟是必須能準確的量出液晶的折射率及雙折射率，是故量測液晶的在兆赫波段的光學性質是無法避免的當務之急。

1-2 液態晶體介紹

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 (圖1-2.1 (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；層狀液晶也稱皂狀液晶 (圖1-2.1 (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(圖1-2.1 (c)) 因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[4]。

本實驗量測一系列nCB (n=6~12) 液晶在兆赫波段下的光學性質，其化學式為 C_nH_{2n+1}  (n=6~12)，6CB、7CB、8CB為向列型液晶，9CB、10CB、11CB、12CB為層狀液晶，其相變溫度如圖1-2.2所示，本系列液晶由Merck公司所提供，我們利用磨刷配向法 (Rubbing alignment) [5] [6]，讓液晶分子有較強的配向能力。

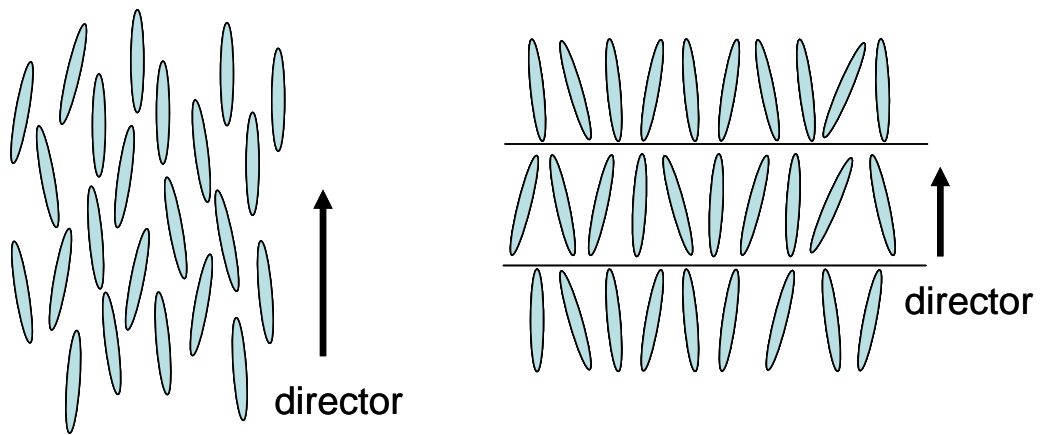
1-3 論文架構

本實驗所使用的量測系統為THz-TDS。將超短脈衝打到砷化鎵光導天線上[7] [8]，則載子從價帶激發到導帶，也同時對天線外加偏壓，使之輻射出兆赫波，原因是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，經由快速富立葉轉換 (FFT) 後，即可得到脈衝

的強度及兆赫波相位的資訊，再經過折射率理論分析，我們可以得知液晶的折射率、雙折射率及吸收係數。

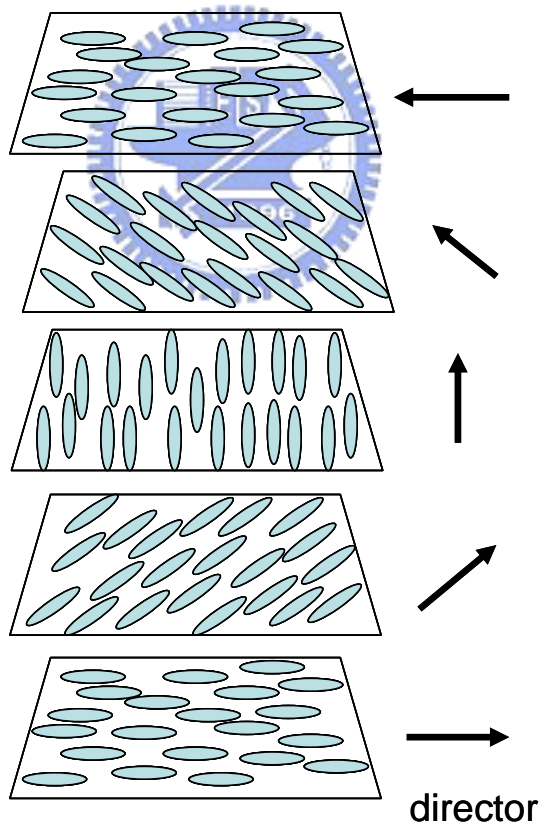
本文第二章將介紹實驗使用的兆赫波系統，及樣品的設計和製作；第三章則介紹本實驗所用之折射率理論與計算；第四章將實驗所得之結果進行分析並相互比較；最後第五章中將對目前的研究作總結及提出未來展望。





(a)

(b)



(c)

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。

4-cyano-4- <i>n</i> -alkylbiphenyls					
Number of C atoms in side chains	Name	K→N, K→S _A or [K→I]	S _A →N	N→I or S _A →I	H K→N or K→S _A † k cal mol ⁻¹
1	K3	[109]	—	(45)*	5.4
2	K6	[75]	—	(22)*	4.1
3	K9	[66]	—	(25.5)	6.4
4	K12	[48]	—	(16.5)	5.5
5	K15	24	—	35.3	4.1
6	K18	14.5	—	29	5.8
7	K21	30	—	42.8	6.2
8	K24	21.5	33.5	40.5	6.76†
9	K27	42	48	49.5	9.59†
10	K30	44(S _A)	—	50.5	8.98†
11	K33	53(S _A)	—	57.5	10.45†
12	K36	48(S _A)	—	58.5	9.22†
4-cyano-4- <i>n</i> -alkyl- <i>p</i> -terphenyl					
5	T15	131	—	240	4.1

Transition temperatures are in °C

() = monotropic transition

K = crystal

N = nematic

S_A = smectic A

I = isotropic liquid

H = enthalpy of fusion

圖 1-2.2 nCB (n=1~12) 液晶的相變溫度圖。

第二章 實驗系統及樣品製作

本章將介紹本實驗所使用的兆赫波量測系統之原理及架設，而後說明樣品的設計、討論液晶的配向問題及加熱系統，最後是實驗量測方法。

2-1 兆赫波量測系統

本實驗所使用的量測系統為兆赫波時域頻譜儀 (THz-TDS)。

此系統是利用砷化鎵光導天線做為兆赫波發射器及偵測器，再用步進馬達延遲 (Delay Stage) 偵測光的光程，描繪出兆赫波在時域的波形。

2-1-1 兆赫波產生

實驗所使用的光導偶極天線結構：在矽基板上低溫成長一層砷化鎵 (LT-GaAs)，並將 Ni/Ge/Au 合金組成的導線製作於其上 (圖 2-1.1 (a))。

另外利用波長 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 [9][10]，此外在天線加上 5.0kTHz 的交流偏壓訊號，載子便會加速輻射出兆赫波。

2-1-2 兆赫波量測系統架構

系統架構圖如圖 2-1.2。將波長 800 nm，脈衝時間為 100 fs，重複率 (Repetition rate) 為 90 MHz 的超快雷射導入 THz-TDS 系統中；再利用分光器 (Beam Splitter) 將雷射光分成兩道，分別以 35 mw 和 50 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。

2-1-3 兆赫波偵測原理

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。

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。量測到的兆赫波訊號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，此即為使天線產生兆赫波脈衝的機制，其中砷化鎵的能

帶結構如圖 2-1.1 (b)。

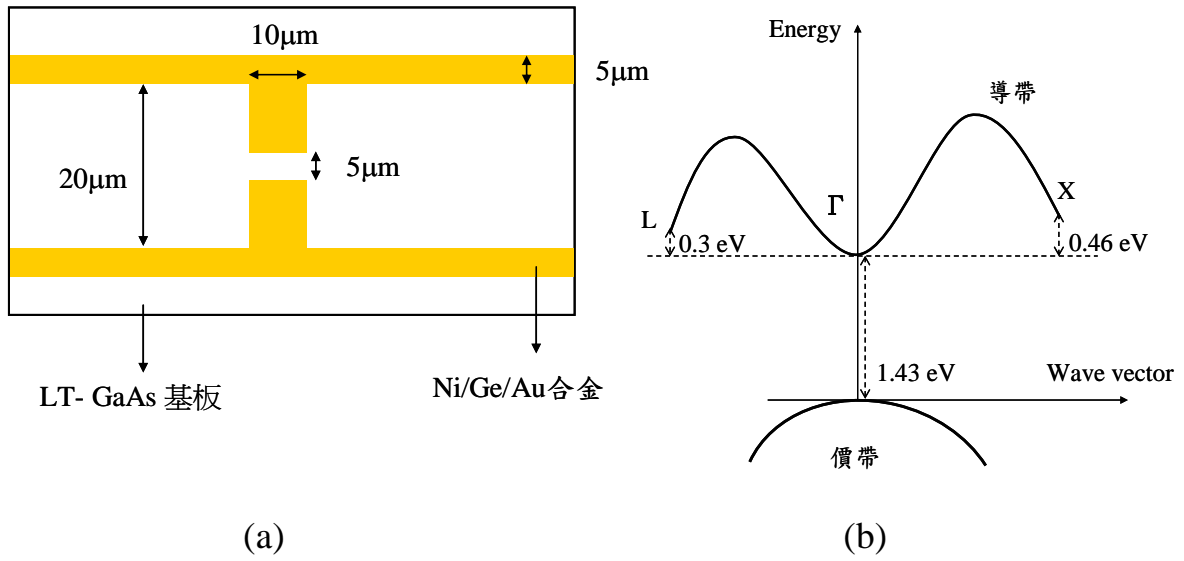


圖 2-1.1 (a) 兆赫波產生器與接收器天線； (b) 低溫成長之砷化鎵能帶圖。

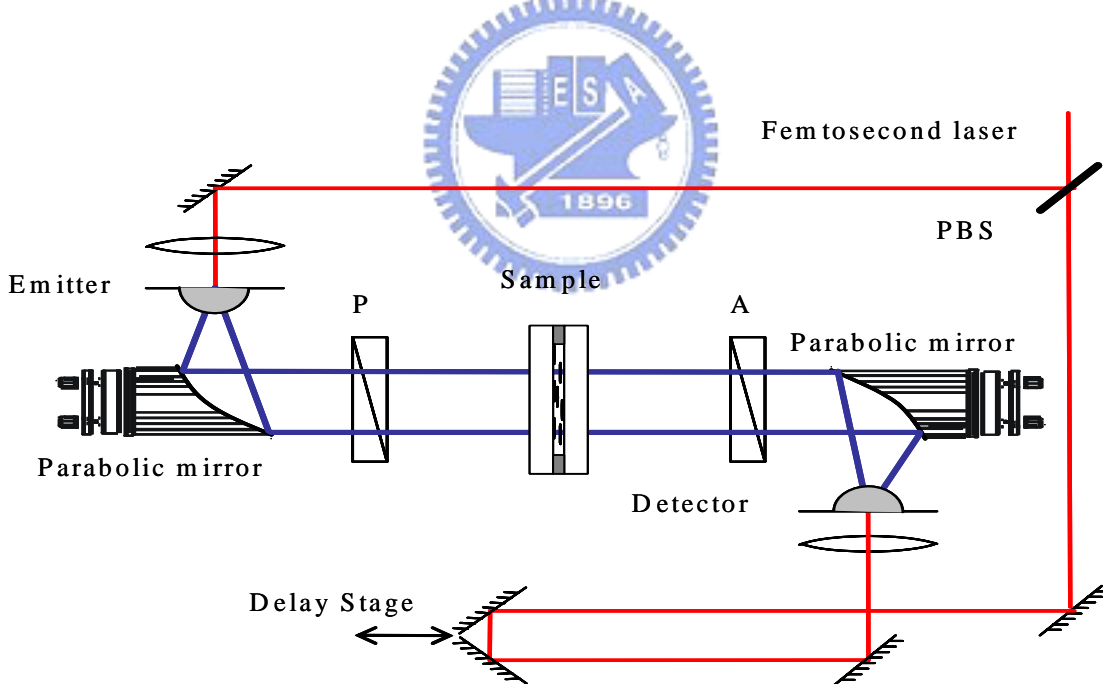


圖 2-1.2 兆赫波時域頻譜系統。

2-2 樣品設計

本實驗利用磨刷 PI 配向膜，製作成 AP(Anti Parallel)液晶樣品。以下將一一介紹製作液晶樣品的流程。

2-2-1 清洗玻璃

(1)本實驗使用石英玻璃當作液晶盒的玻璃基板，玻璃基板的大小為 $40.0 \times 30.0 \text{mm}^2$ 。

(2)將玻璃放入燒杯內，加入中性玻璃清潔劑，再加水蓋過玻璃，將燒杯放入超音波振盪器，以超音波振盪器清洗 10 分鐘。

(3)使用清水將玻璃沖洗乾淨，避免中性清潔劑殘留於玻璃上，沖洗乾淨後放置於另一個乾燥的燒杯內。

(4)加入丙酮(Acetone)到燒杯內，使丙酮蓋過玻璃，將燒杯放入超音波振盪器，以超音波振盪器清洗 10 分鐘，將丙酮回收以免汙染。

(5)加入甲醇(Methanol)到燒杯內，使甲醇蓋過玻璃，將燒杯放入超音波振盪器，以超音波振盪器清洗 10 分鐘，將甲醇回收以免汙染。

(6)加入去離子水(D.I, water)到燒杯裡，將燒杯放入超音波振盪器，以超音波振盪器清洗 10 分鐘。

(7)使用氮氣吹乾，放入烤箱中烤乾水氣，冷卻備用。

2-2-2 鍍製配向膜

利用旋轉塗佈機(spin coater)，均勻的將配向劑塗佈於玻璃表面，藉由

控制旋轉的速度來固定配向膜的膜度。鍍膜的步驟如下：

- (1)將配向劑(Nissan 130B)由冰箱取出，放置於防潮箱中，待其回到室溫後，再行使用。
- (2)將石英玻璃放於旋轉塗佈機上。
- (3)用微量滴管滴數滴在石英玻璃上，旋轉分為兩步驟，條件分別為第一步 2000 rpm (50 sec) ，第二步 4000 rpm (50 sec) 。
- (4)將玻璃取下平放於加熱板上軟烤 60⁰C，3 分鐘，使配向劑中的溶劑蒸發。
- (5)將鍍好配向劑的玻璃放入已預熱高溫 170⁰C的烤箱中，硬烤一小時。
- (6)硬烤完成後，將玻璃取出放入培養皿中，冷卻備用。

2-2-3 磨刷 PI 配向膜

將鍍製好配向膜的玻璃基板擺置在磨刷機的平台，用相同的轉速磨刷玻璃基板，使玻璃基板表面的 PI 膜產生配向的效果。

2-2-4 組裝液晶盒及封合

- (1)取二片磨刷配向完的玻璃基板，以相互平行的方式夾合，鐵氟龍當作 spacer，用 AB 膠將樣品黏合。
- (2)將液晶加熱到液態灌入樣品，以 AB 膠封合缺口，製作成 AP 液晶樣品，其液晶樣品與參考樣品的厚度如表 2-2 所示。

表 2-2 液晶樣品與參考樣品的厚度。

Sample	The LC layer thickness	The thickness of two fused silica of sample cell	The thickness of two fused silica of reference cell
6CB	0.448mm	2.41mm	2.309mm
7CB	0.551mm	2.467mm	2.309mm
8CB	0.528mm	2.360mm	2.309mm
9CB	0.260mm	2.070mm	2.092mm
10CB	0.550mm	2.102mm	2.092mm
11CB	0.264mm	2.084mm	2.092mm
12CB	0.538mm	2.087mm	2.092mm

2-3 液晶配向效果

在液晶樣品前後放入一組正交的偏振片，如果液晶有明顯朝著磨刷方向配向，旋轉液晶樣品即可發現明顯的明暗變化。

首先必須要知道光經過液晶分子後，光強度變化如何，我們定義起偏器 (Polarizer) 的偏振方向為原始座標系 xy 的 x 軸，將液晶長軸方向定義一新座標系 $x'y'$ ，液晶分子長軸與起偏器的偏振方向夾了一個角度 ϕ (圖 2-3.1)，從瓊斯矩陣 (Jones matrix)，定義當光通過偏振片後，電場狀態為

$$E_p = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_{xy} \quad (2-3.1)$$

再將其座標轉換至液晶座標上

$$E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \end{pmatrix}_{x'y'} \quad (2-3.2)$$

電場分量在通過液晶的相位延遲後為：

$$E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} e^{i n_e k d} & 0 \\ 0 & e^{i n_o k d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} e^{i n_e k d} \cos \phi \\ -e^{i n_o k d} \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2-3.3)$$

再將其轉換成原本座標系上

$$\begin{aligned} E_{LC} &= E_0 \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i n_e k d} \cos \phi \\ -e^{i n_o k d} \sin \phi \end{pmatrix} \\ &= E_0 \begin{pmatrix} e^{i n_e k d} \cos^2 \phi + e^{i n_o k d} \sin^2 \phi \\ e^{i n_e k d} \cos \phi \sin \phi - e^{i n_o k d} \sin \phi \cos \phi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2-3.4)$$

最後經過檢偏器後

$$\begin{aligned}
\mathbf{E}_A &= E_0 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{in_e kd} \cos^2 \phi + e^{in_o kd} \sin^2 \phi \\ e^{in_e kd} \sin \phi \cos \phi - e^{in_o kd} \sin \phi \cos \phi \end{pmatrix} \\
&= E_0 \begin{pmatrix} 0 \\ e^{in_e kd} \sin \phi \cos \phi - e^{in_o kd} \sin \phi \cos \phi \end{pmatrix}_{XY} \quad (2-3.5)
\end{aligned}$$

剩下 y 方向至光檢器(Photo detector)

$$\begin{aligned}
\bar{\mathbf{E}}_A &= E_0 e^{in_e kd} \sin \phi \cos \phi - e^{in_o kd} \sin \phi \cos \phi \hat{y} \quad \text{其中 } \bar{n} = \frac{n_{//} + n_{\perp}}{2}, \Delta n = n_{//} - n_{\perp} \\
&= E_0 e^{i\bar{n}kd} \sin \phi \cos \phi (e^{i\frac{\Delta n}{2}kd} - e^{-i\frac{\Delta n}{2}kd}) \hat{y} \\
&= E_0 e^{i\bar{n}kd} \sin \phi \cos \phi (2i \sin \frac{\Delta n kd}{2}) \hat{y} \quad (2-3.6)
\end{aligned}$$

$$I = |\bar{\mathbf{E}}_A|^2 = I_0 \sin^2(2\phi) \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (2-3.7)$$

其中 I_0 為入射光強度、 ϕ 為偏振片方向與液晶配向方向的夾角、 $\Delta\Phi$ 為相位延遲 ($\Delta\Phi = \Delta n kd$)，而相位延遲並不會因為水平旋轉樣品而改變，所以光強度為：

$$I = I'_0 \sin^2(2\phi) \quad (2-3.8)$$



液晶樣品前後放入一組正交的偏振片，在起偏器前放置一光源，將液晶樣品與起偏器(圖 2-3.2 所示)分別夾 0 度和 45 度拍照。可由式(2-3.8)得知，當液晶分子長軸與起偏器夾 45 度時，拍到的照片會最亮；當液晶分子長軸與起偏器夾 0 度時，拍到的照片會最暗。

圖 2-3.3 即為液晶樣品 6CB、7CB、8CB 分別與起偏器夾 0 度和 45 度所拍攝的照片，由圖中可看出明暗變化明顯，故 6CB、7CB、8CB 配向良好，液晶分子大部分沿著磨刷方向排列。

圖 2-3.4 (a)、(b) 為 8CB 在固態與液晶態分別與起偏器夾 0 度和 45 度

所拍攝的照片，可以發現將 8CB 加熱到液晶態可以看出明顯的明暗變化；另外將 8CB 液晶樣品放置於冷凍庫冷卻，讓液晶變成固態，再將樣品放回室溫，觀察配向效果是否會因液晶變成固態而破壞配向膜，導致液晶無法延著磨刷方向配向，結果由圖 2-3.4 (c)、(d) 為 8CB 在固態與液晶態分別與起偏器夾 0 度和 45 度所拍攝的照片所示。再將圖 2-3.4(b)、(d) 做比較，可以看出圖 2-3.4 (d) 已無明顯的明暗變化，顯示了液晶的配向效果已明顯的遭到破壞。

圖 2-3.5 (a)、(b) 為 11CB 其液晶層厚度為 20um、542um 分別與起偏器夾 0 度和 45 度所拍攝的照片，在室溫下，11CB 完全是固態狀態，固態的液晶破壞配向膜更為顯著，所以在正交偏振器下，我們幾乎看不出有明暗變化。

綜合以上的結論，我們將量測 6CB、7CB、8CB 在液晶態與液態的光學性質；此外由於 9CB、10CB、11CB、12CB 在常溫下為固態，已破壞了配向效果，所以我們只量測 9CB、10CB、11CB、12CB 在液態的光學性質。

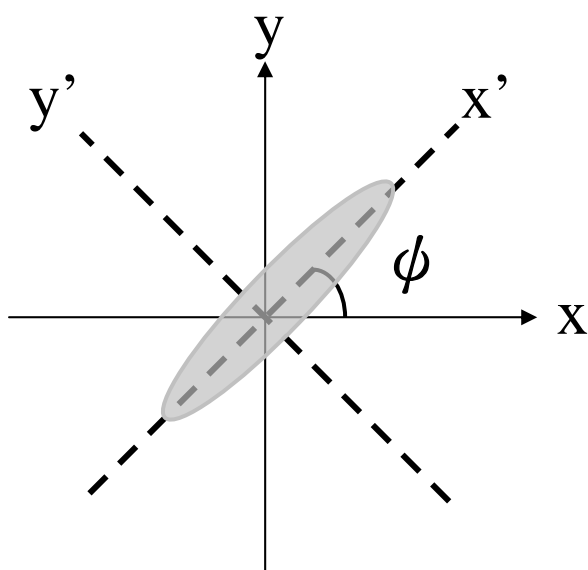


圖 2-3.1 液晶座標轉換示意圖。

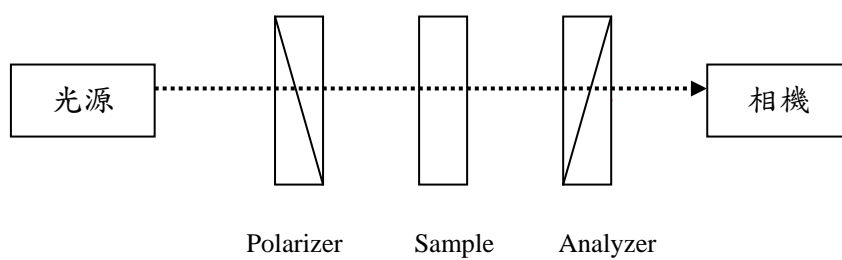


圖 2-3.2 液晶樣品拍照示意圖。

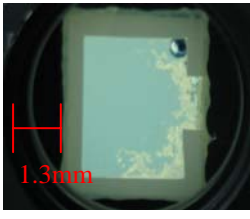
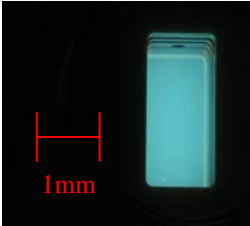
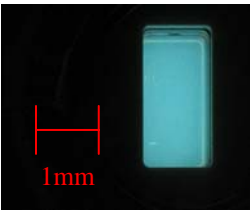
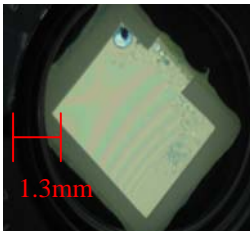
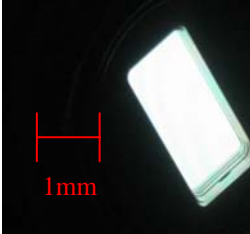
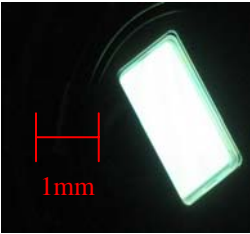
	6CB	7CB	8CB
0 度			
45 度			

圖 2-3.3 6CB、7CB、8CB 液晶樣品配向效果照片。



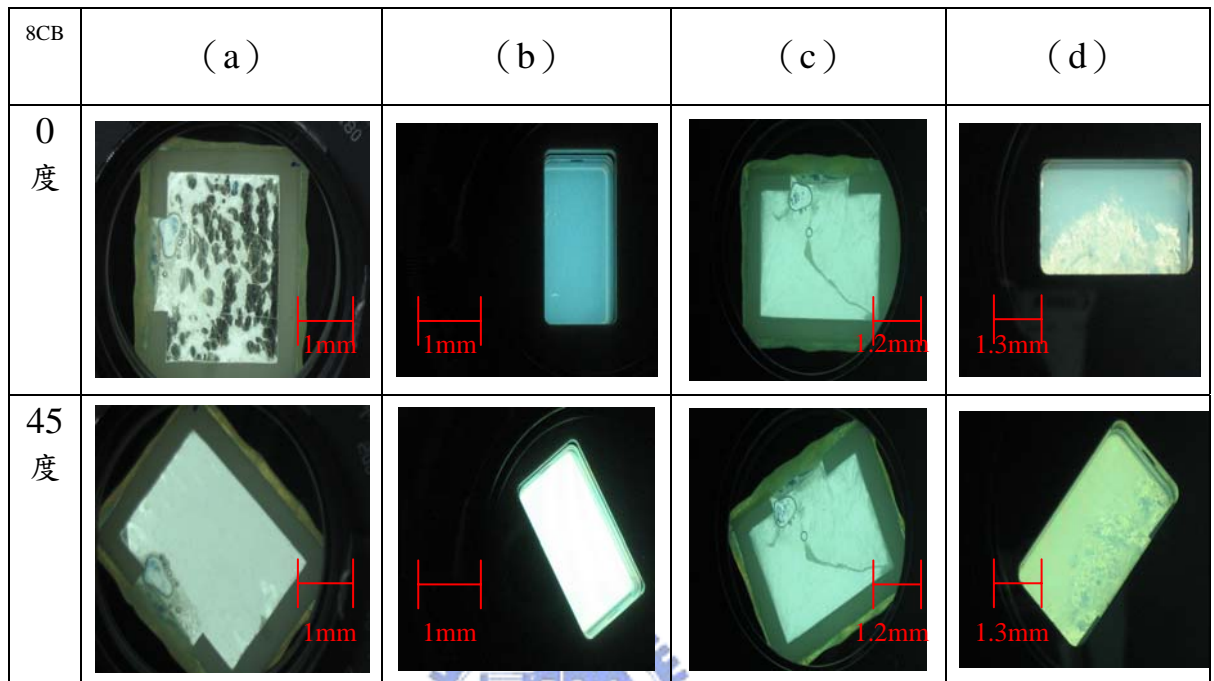


圖 2-3.4 8CB 液晶樣品配向效果照片。

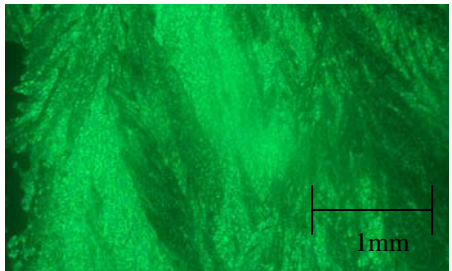
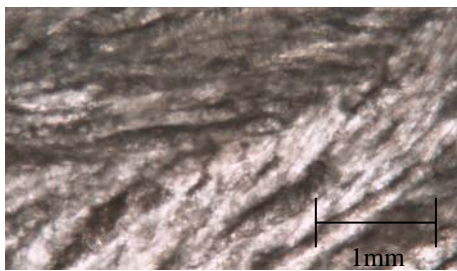
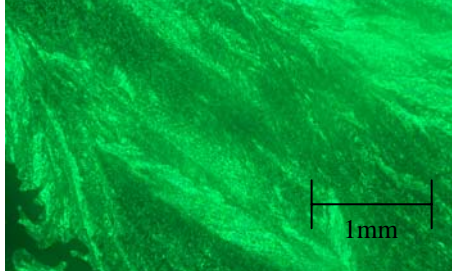
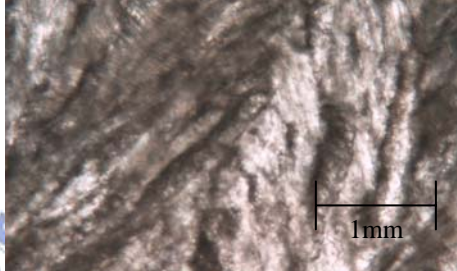
11CB	(a)	(b)
0 度		
45 度		

圖 2-3.5 11CB 液晶樣品配向效果照片。

2-4 加熱系統

本實驗利用加熱器INSTEK MK1 Version 2.52 供給、控制我們所需要的溫度;加熱系統是由一組銅塊盒和恆溫功用的鐵氟龍所組成。液晶樣品放在銅塊盒裡均勻加熱，銅塊盒上面開了小窗戶讓兆赫波通過待測液晶樣品，將銅塊盒放入鐵氟龍盒裡恆溫，以隔絕外面環境溫度對加熱系統溫度的影響。將銅棒塗上散熱膏，利用銅棒加熱我們的加熱系統，使用 2 支溫度偵測計，一支溫度偵測計讀取加熱系統的溫度，回饋給加熱器，另一支溫度偵測計接到萬用電表，讀取溫度偵測計的電阻值，透過GPIB將萬用電表抓到的電阻值傳輸到電腦，利用labview紀錄加熱系統的溫度值。圖 2-4.1 與圖 2-4.2 分別為加熱系統和加熱系統溫度測試圖，當溫度穩定時，其溫度的誤差為 0.09°C

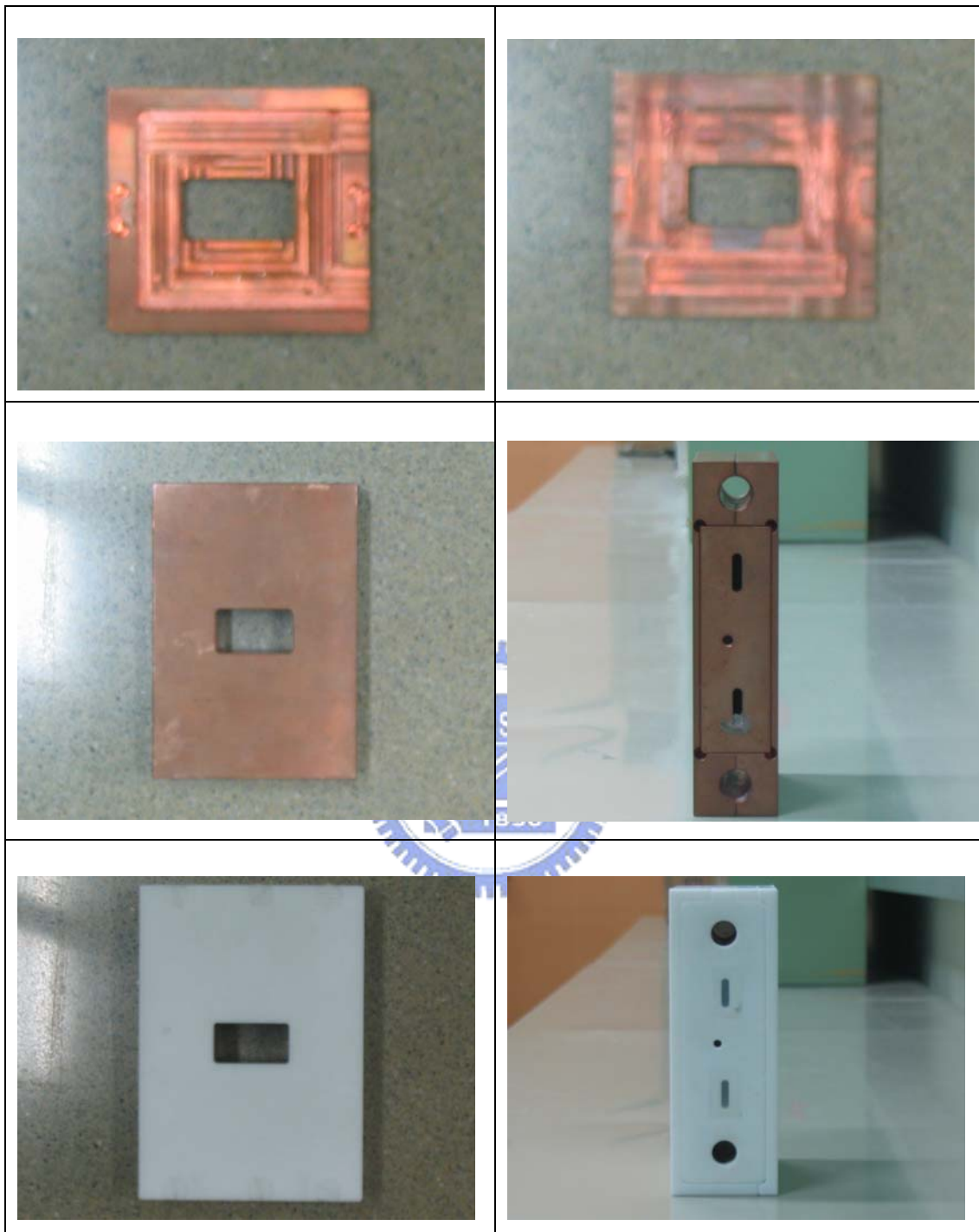


圖 2-4.1 加熱系統圖。一組銅製恆溫裝置（內），一組鐵氟龍（外）。

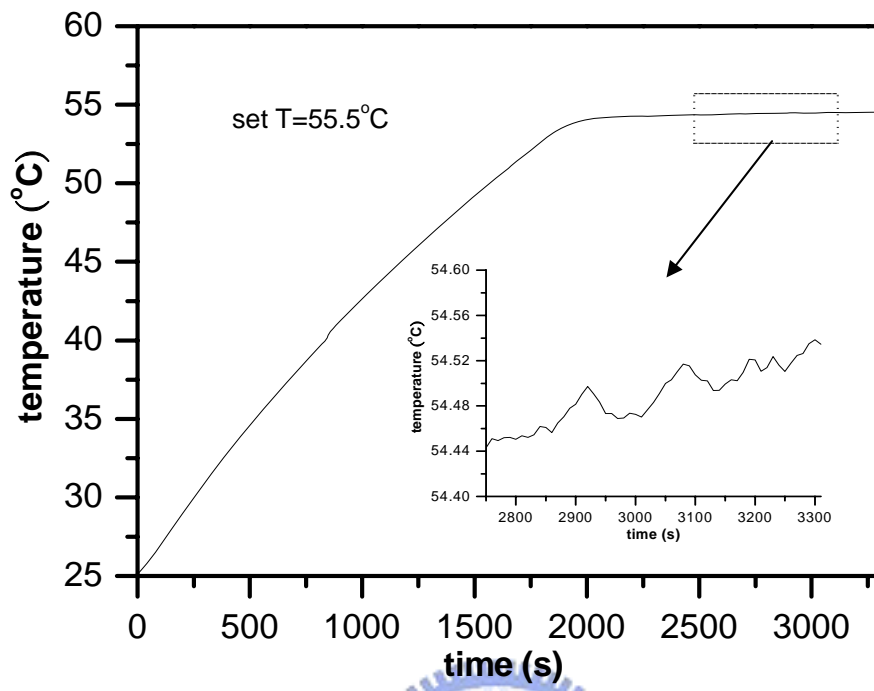


圖 2-4.2 加熱系統溫度測試圖。



2-5 實驗方法

THz-TDS 系統會產生水平方向的兆赫波偏振。將液晶樣品放置於加熱系統加熱至溫度穩定，我們利用壓克力罩蓋住 THz-TDS 系統，在其中充入乾燥的氮氣除濕，讓相對溼度為 4% 以下，開始進行兆赫波時域圖量測。當液晶分子長軸放置的方向，與兆赫波偏振方向平行時，我們量到 n_e 的折射率；當液晶分子長軸放置的方向，與兆赫波偏振方向垂直時，我們量到 n_o 的折射率。



第三章 折射率理論分析

本章節將會介紹如何由 THz-TDS 系統中，藉由系統量測到的兆赫波電場時域圖，經過計算可得到液態晶體的折射率。而在計算折射率部份，因為折射率的實部與虛部互相為函數關係，所以必須先透過假設一組粗估的折射率值，重複代入方程式計算，得出一組最適當的折射率值。

3-1 折射率理論

在光學常數量測中，我們準備兩個樣品，液晶樣品和參考樣品。液晶樣品是由兩片石英玻璃基板，基板兩側以鐵氟龍當做間隙物，灌入要量測的液晶所組成(圖 3-1.1)。玻璃內層鍍上 Nissan 130B，磨刷玻璃，製做成水平配向的液晶樣品。參考樣品是由兩片緊密黏在一起的石英玻璃基板所組成(圖 3-1.2)。

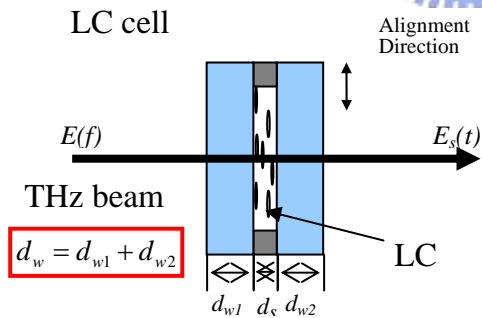


圖 3-1.1 液晶樣品

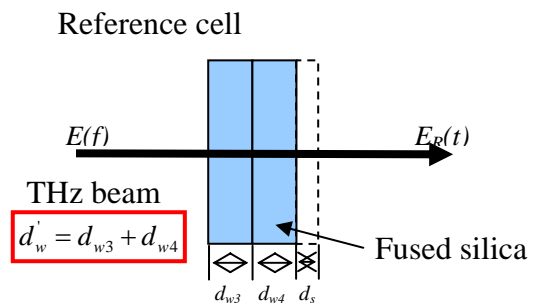


圖 3-1.2 參考樣品

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。假設平面波正向穿越過液晶樣品，穿越過樣品的電場可表示為[11]：

$$E_S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E(f) \tilde{t}_{AW} \tilde{t}_{WS} \sum_{m=0}^N \left[\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_s d_s}{c} (2m+1) \right)} \right] \tilde{t}_{SW} \tilde{t}_{WA} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_w d_w}{c} \right)} e^{-i2\pi f t} df \quad (3-1.1)$$

假設平面波正向穿越過參考樣品，穿越過樣品的電場可表示為：

$$E_R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E(f) \tilde{r}_{AW} \tilde{t}_{WA} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_w d_w}{c} \right)} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_A (d_s + \Delta d)}{c} \right)} e^{-i2\pi f t} df \quad (3-1.2)$$

其中 \tilde{n}_S 、 \tilde{n}_A 、 \tilde{n}_W 為液晶、空氣和 Fused silica 之折射率； d_S 、 d_W' 、 Δd 為液晶層、參考樣品和液晶樣品兩片玻璃與參考樣品兩片玻璃厚度差的厚度； \tilde{r}_{XY} 為反射係數， \tilde{t}_{XY} 為透射係數， $\tilde{n}_X = n_X + i\kappa_X$ ，其中 X、Y 可以是液晶、Fused silica 或空氣；反射係數與透射係數可表示為：

$$\tilde{r}_{XY} = \frac{\tilde{n}_X - \tilde{n}_Y}{\tilde{n}_X + \tilde{n}_Y}$$

$$\tilde{t}_{XY} = \frac{2\tilde{n}_X}{\tilde{n}_X + \tilde{n}_Y}$$

將(3-1.1)式除以(3-1.2)式可表示為：

$$\sqrt{T} e^{i(\phi_S - \phi_R)} = \frac{E_S(t)}{E_R(t)} = \tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left[\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S (2m+1)}{c} \right)} \right] e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_w d_w}{c} - \frac{\tilde{n}_w d'_w}{c} - \frac{\tilde{n}_A (d_S + \Delta d)}{c} + \frac{\tilde{n}_S d_S}{c} \right)} \quad (3-1.3)$$

其中 T 為液晶樣品電場平方除以參考樣品電場平方的透射率， $\phi_S - \phi_R$ 為電場通過液晶樣品與電場通過參考樣品的相位差；3-1.3 式方程式左右兩邊取 ln 可表示為：

$$\ln \sqrt{T} + i(\phi_S - \phi_R) = i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_w d_w}{c} - \frac{\tilde{n}_w d'_w}{c} - \frac{\tilde{n}_A (d_S + \Delta d)}{c} + \frac{\tilde{n}_S d_S}{c} \right) + \ln \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left(\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S \times 2m}{c} \right)} \right) \right] \quad (3-1.4)$$

將 3-1.4 式化簡可得：

$$\begin{aligned} \phi_S - \phi_R = & \frac{2\pi f}{c} (n_W d_W - n_W d'_W - n_A (d_S + \Delta d) + n_S d_S) \\ & + \text{Im} \left\{ + \ln \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left(\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S \times 2m}{c} \right)} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3-1.5)$$

$$\ln \sqrt{T} = \text{Re} \left\{ \ln \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left(\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S \times 2m}{c} \right)} \right) \right] \right\} - \frac{2\pi f}{c} (\kappa_W d_W - \kappa_W d'_W + \kappa_S d_S) \quad (3-1.6)$$

將 3-1.5、3-1.6 式整理完可得：

$$\begin{aligned} n_S = & \frac{1}{2\pi f d_S / c} (\phi_S - \phi_R) + n_A - \frac{(n_W - n_A) \Delta d}{d_S} \\ & - \frac{1}{2\pi f d_S / c} \arg \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left(\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S \times 2m}{c} \right)} \right) \right] \end{aligned} \quad (3-1.7)$$

$$\kappa_S = -\frac{1}{2\pi f d_S / c} \ln \left[\frac{\sqrt{T}}{\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left(\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_S d_S \times 2m}{c} \right)} \right)} \right] - \frac{\kappa_W \Delta d}{d_S} \quad (3-1.8)$$

n_S 、 κ_S 分別為液晶折射率的實部與虛部。

3-2 折射率分析

首先，利用藍寶石超快鎖模雷射光(Ti:sapphire Laser)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的光程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。藉由移動 Delay Stage，我們便可把整個 THz 訊號完整的描繪出來。

以 7CB 為例子，我們將玻璃所造成的多次反射訊號去除，僅考慮液晶層所造成的多次反射訊號 THz 時域圖(圖 4-12 所示)，將圖 4-12 時域圖經過傅立葉轉換成強度頻域訊號(圖 4-15 所示)和相位頻域訊號(圖 4-16 所示)。

同理，我們將參考玻璃的 Thz 時域圖去掉玻璃所造成的多次反射訊號，經過傅立葉轉換，我們可以得到參考玻璃的強度頻域圖(圖 4-15 所示)和相位頻域圖(圖 4-16 所示)。

此外，由折射率理論，可以得知折射率的實部與虛部表示為：

$$n_s = \frac{1}{2\pi f d_s / c} (\phi_s - \phi_R) + n_A - \frac{(n_W - n_A)\Delta d}{d_s} - \frac{1}{2\pi f d_s / c} \arg \left[\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left(\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_s d_s}{c} \times 2m \right)} \right) \right] \quad (3-2.1)$$

$$\kappa_s = -\frac{1}{2\pi f d_s / c} \ln \left[\frac{\sqrt{T}}{\tilde{t}_{WS} \tilde{t}_{SW} \sum_{m=0}^N \left(\tilde{r}_{SW}^{2m} e^{i2\pi f \left(\frac{\tilde{n}_s d_s}{c} \times 2m \right)} \right)} \right] - \frac{\kappa_W \Delta d}{d_s} \quad (3-2.2)$$

從式(3-2.1)、(3-2.2)可以得到有 2 個方程式，而且只有 2 個未知數 n_s 、

κ_s ，不過，每個方程式裡又有 \tilde{n}_s ($\tilde{n}_s = n_s + i\kappa_s$) 這個未知數，所以沒辦法帶入已知的常數將 n_s 、 k_s 求出。但已知滿足這 2 個方程式的 n_s 、 k_s 只有一組，所以可以利用疊代法的方式趨近我們要的折射率。

一開始先給定一組初始值帶入方程式(3-2.1)、(3-2.2)，就會得到另一組 n_s 、 κ_s ，將得到的 n_s 、 κ_s 再帶入方程式(3-2.1)、(3-2.2)求一次 n_s 、 κ_s ，重覆此動作 20 次，我們就可以得到在特定頻率下，此頻率一組精確的折射率。用同樣的方法，我們便可以把整個頻率波段下的折射率計算出來。圖 4-17 為我們計算出來 7CB 液晶在 36 度下的折射率。

因為我們要給定一組合理的 n_s 、 κ_s ，所以假設液晶樣品的玻璃基板與參考樣品的玻璃基板一樣厚，液晶層的厚度與空氣層的厚度一樣，圖 4-16 可知電磁波通過液晶樣品與參考樣品所造成的相位差為

$$\phi_S - \phi_R = (n_s - n_{air})kd \quad (3-2.3)$$

所以由式(3-2.3)，我們可以得到

$$n_s = \frac{\phi_S - \phi_R}{kd} + 1 = \frac{\phi_S - \phi_R}{2\pi fd/c} + 1 \quad (3-2.4)$$

此即為我們一開始給定的初始值 n_s 。

圖 4-15 可知通過液晶樣品的光強度會比通過參考樣品光強度小，因為會有液晶的吸收，所以我們可以得到下列的關係式

$$\sqrt{T} = \frac{E_{LC}}{E_{ref}} = e^{-\kappa_s kd} \quad (3-2.5)$$

由式(3-2.5)，我們可以得到

$$\kappa_s = -\frac{\ln \sqrt{T}}{kd} = -\frac{\ln \sqrt{T}}{2\pi fd / c} \quad (3-2.6)$$

此即為我們一開始給定的初始值 κ_s 。

同理，我們可以算出 fused silica 的折射率（如圖 3-2.1 所示），折射率 $n \sim 1.95$ 、 κ 均小於 0.01。



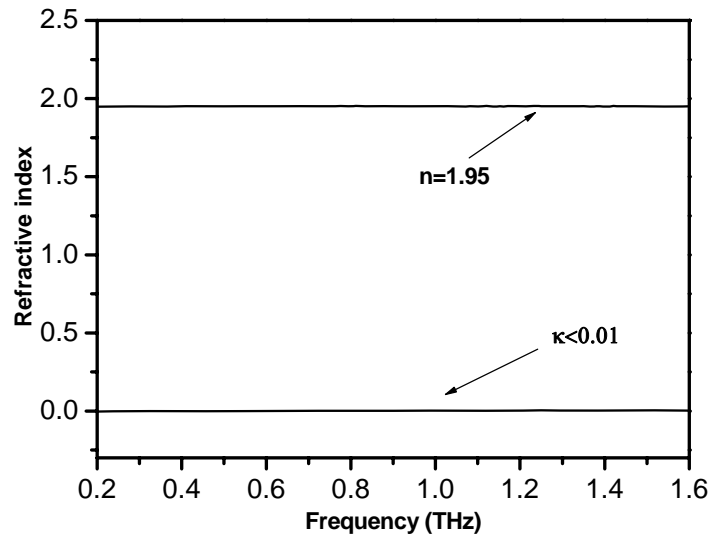


圖 3-2.1 Fused silica 的折射率 n 、 κ 。



第四章 實驗結果與分析

本章節將討論nCB(n=6-12)液晶折射率隨著溫度變化的情形。將分成以下幾個部份：首先針對各液晶的電場時域圖隨溫度變化的情形來討論，其次探討各液晶在固定溫度狀況下，折射率 n_e 、 n_o 的光強度圖、相位圖變化的情形，最後在固定頻率情況下，綜合比較各液晶的折射率和雙折射率隨溫度變化的情形。

4-1 電場時域圖量測結果

由 THz-TDS 系統量測所得之訊號，即為兆赫波電場時域圖。

實驗所量測出的結果中，發現液晶 6CB、7CB、8CB其e-ray的訊號會比o-ray訊號相對於參考樣品的訊號被延遲的較後面，也就是說e-ray的訊號比o-ray訊號在液晶中的光程長，所以液晶 6CB、7CB、8CB均為正型液晶，其折射率 $n_e > n_o$ ，(如圖 4-1、圖 4-12、圖 4-23 所示)。

此外，可以發現液晶 6CB、7CB、8CB其 n_e 的折射率隨著溫度的上升，兆赫波電場時域訊號被延遲的越來越前面，也就是說隨著溫度的上升， n_e 的折射率有逐漸變小的趨勢(如圖 4-2、圖 4-13、圖 4-24 所示)；而其 n_o 的折射率隨著溫度的上升，兆赫波電場時域訊號被延遲的越來越後面，也就是說隨著溫度的上升， n_o 的折射率有逐漸變大的趨勢(如圖 4-3、圖 4-14、圖 4-25 所示)。

4-2 光強度頻域圖與相位頻域圖

將 THz-TDS 系統量測所得之時域訊號透過快速傅立葉轉換 (FFT) 得到頻域訊號，可得到不同頻率下兆赫波強度與相位之頻域圖。

比較液晶 6CB、7CB、8CB 之強度頻域圖，可以發現 e-ray 的強度訊號都比 o-ray 的強度訊號大，意味著 κ_o (o-ray 折射率的虛部) $>$ κ_e (e-ray 折射率的虛部) (如圖 4-4、圖 4-15、圖 4-26 所示)。

再比較液晶 6CB、7CB、8CB 之相位頻域圖，發現 e-ray 的相位延遲都比 o-ray 要來的大，也就是說 n_e (e-ray 折射率的實部) $>$ n_o (o-ray 折射率的實部) (如圖 4-5、圖 4-16、圖 4-27 所示)。

綜合以上結果，歸納出液晶 6CB、7CB、8CB 折射率 $n_e > n_o$ ；折射率 n_e 隨著溫度的上升有下降的趨勢，折射率 n_o 隨著溫度的上升有上升的趨勢。

4-3 折射率與頻率的關係

當入射光偏振方向與液晶長軸方向垂直，這種狀態下的入射光為尋常光 (Ordinary Ray, o-ray)，此時液晶的折射率對兆赫波而言為 n_o ；若入射光偏振方向和液晶長軸平行，稱此種光為非尋常光 (Extraordinary Ray, e-ray)，此時液晶的折射率對兆赫波而言為 n_e 。

此節將討論nCB(n=6-12)液晶在固定溫度下，折射率 n_e 、 n_o 隨著頻率0.2THz~1.6THz變化的情形。

4-3.1 向列型液晶 6CB、7CB、8CB

觀察 6CB在 25°C下折射率隨頻率變化的關係圖，可以發現 $n_e > n_o$ 、 $\kappa_e < \kappa_o$ ， $n_e \approx 1.63$ 、 $n_o \approx 1.49$ ， κ_e 、 κ_o 均小於 0.05，頻率從 0.2THz到 1.6THz中，沒有明顯的吸收訊號（如圖 4-6）；其在液態時折射率的頻域圖，折射率 $n \approx 1.53$ 、 κ 均小於 0.04（如圖 4-7）。此外重複量測 6CB在 26°C、27°C、28°C、29°C、30°C、32°C、40°C下折射率的頻域圖（附錄），發現其清亮點（液晶態轉變液態的相位點）約在 29°C。溫度在 25°C到 28°C下， n_e 隨著溫度的上升而下降， n_o 隨著溫度的上升而上升。

同樣地，觀察 7CB在 36°C下折射率隨頻率變化的關係圖，可以發現 $n_e > n_o$ 、 $\kappa_e < \kappa_o$ ， $n_e \approx 1.69$ 、 $n_o \approx 1.58$ ， κ_e 、 κ_o 均小於 0.03，頻率從 0.2THz到 1.6THz中，沒有明顯的吸收訊號（如圖 4-17）；其在液態時折射率的頻域圖，折射率 $n \approx 1.61$ 、 κ 均小於 0.03（如圖 4-18）。另外重複量測 7CB在 32°C、34°C、

38°C、40°C、42°C、43°C、44°C、46°C下折射率的頻域圖(附錄)，其清亮點約在 42.8°C。溫度在 32°C到 40°C下， n_e 隨著溫度的上升而下降， n_e 隨著溫度的上升而上升。

觀察 8CB在 36°C下折射率隨頻率變化的關係圖，可以發現 $n_e > n_o$ 、 $\kappa_e < \kappa_o$ ， $n_e \approx 1.69$ 、 $n_o \approx 1.57$ ， κ_e 、 κ_o 均小於 0.04，頻率從 0.2THz到 1.6THz中，沒有明顯的吸收訊號(如圖 4-28)；其在液態時折射率的頻域圖，其折射率 $n \approx 1.58$ 、 κ 均小於 0.03(如圖 4-29)。重複量測 8CB在 33°C、38°C、40°C、40.5°C、43°C、50°C下折射率的頻域圖(附錄)，其清亮點約在 40.5°C。溫度在 33°C到 40°C下， n_e 隨著溫度的上升而下降， n_e 隨著溫度的上升而上升。



4-3.2 層狀液晶 9CB、10CB、11CB、12CB

由於層狀液晶 9CB、10CB、11CB、12CB 在室溫 27°C下是固態，所以會破壞液晶表面的配向，所以當入射光偏振方向與液晶長軸同方向時，量到的折射率不是 n_e ，而當入射光偏振方向與液晶長軸垂直時，量到的折射率亦不會是 n_o ，我們只能確定層狀液晶在液態的折射率。

9CB 的清亮點約在 49.5°C，圖 4-34 為 9CB 在液態時折射率的頻域圖，其折射率 $n \approx 1.56$ 、 κ 均小於 0.05；10CB 的清亮點約在 50.5°C，圖 4-35 為 10CB 在液態時折射率的頻域圖，其折射率 $n \approx 1.60$ 、 κ 均小於 0.03；11CB 的清亮點約在 57.5°C，圖 4-36 為 11CB 在液態時折射率的頻域圖，其折射

率 $n \approx 1.55$ 、 κ 均小於 0.04；12CB 的清亮點約在 58.5°C ，圖 4-37 為 12CB 在液態時折射率的頻域圖，其折射率 $n \approx 1.56$ 、 κ 均小於 0.02。



4-4 折射率與溫度的關係

研究折射率對溫度變化的情形是一件相當重要的事情，可以從中得到液晶的雙折射率(birefringence)，進而可以應用在元件上。

本節選定特定的頻率 0.41、0.60THz觀察折射率對溫度變化的情形。圖 4-8 和圖 4-9 分別為 6CB 在 0.41 THz 與 0.60 THz 折射率對溫度關係圖；圖 4-19 和圖 4-20 分別為 7CB 在 0.41 THz 與 0.60 THz 折射率對溫度關係圖；圖 4-30 和圖 4-31 分別為 8CB 在 0.41 THz 與 0.60 THz 折射率對溫度關係圖，這個趨勢與液晶在可見光的結果相同[12]。我們將使用方程式(4-4.1)去擬合折射率的趨勢，此方程式沒有任何物理意義，只為了讓我們比較好觀察出 n_e 、 n_o 變化的趨勢[13]


$$n = A \times (B - T_R)^C \quad (4-4.1)$$

其中 n 是折射率， $T_R = T - T_C$ ， T 為測量到的溫度、 T_R 為液晶的清亮點， A 、 B 、 C 為擬合出的參數。圖中 \circ 、 \times 分別代表 n_e 、 n_o ，直線代表 n_e 、 n_o 平均的折射率， $\bar{n} = \frac{2n_o + n_e}{3}$ ；其擬合參數如表 4-4.1 所示。

圖 4-38 與圖 4-39 顯示出 nCB (n=6-12) 在 0.41 THz 與 0.60 THz 折射率實部對溫度關係圖。圖 4-40 與圖 4-41 顯示出 nCB (n=6-12) 在 0.41 THz 與 0.60 THz 折射率虛部對溫度關係圖。

4-5 液晶的雙折射率

液晶的雙折射率(birefringence) [14]是指 $n_e - n_o$ 的意思。雙折射率通常與秩序參數(order parameter)有關，秩序參數是指液晶分子的整齊排列程度，

其定義為 $S = \left(1 - \frac{yT}{T_c}\right)^\beta$ ，其中 T 是量測到的溫度， T_c 是液晶的清亮點， y 、 β

為擬合的參數。 Δn 與 S 關係為 $\Delta n \propto \rho^{\frac{1}{2}} S$ ，其中 ρ 是液晶的體積密度，所以液晶的雙折射率可以表示為

$$\Delta n(T) = D \times \left(1 - \frac{E \cdot T}{T_c}\right)^F \quad (4-5.1)$$

其中 D 、 E 、 F 為擬合的參數。

圖 4-10 和圖 4-11 分別為 6CB 在 0.41 THz 與 0.60 THz 液晶的雙折射率對溫度關係圖；圖 4-21 和圖 4-22 分別為 7CB 在 0.41 THz 與 0.60 THz 液晶的雙折射率對溫度關係圖；圖 4-32 和圖 4-33 分別為 8CB 在 0.41 THz 與 0.60 THz 液晶的雙折射率對溫度關係圖。

從這些途中可以發現 6CB、7CB、8CB 的 Δn 隨著溫度的上升而下降，當溫度超過相變溫度時， Δn 瞬間會趨近於 0。原因可以由液晶分子的熱擾動來解釋，溫度越高，液晶分子熱擾動越劇烈，當溫度超過相變溫度，液晶分子就會混亂的排列，只有一個折射率，所以 Δn 會趨近於 0。

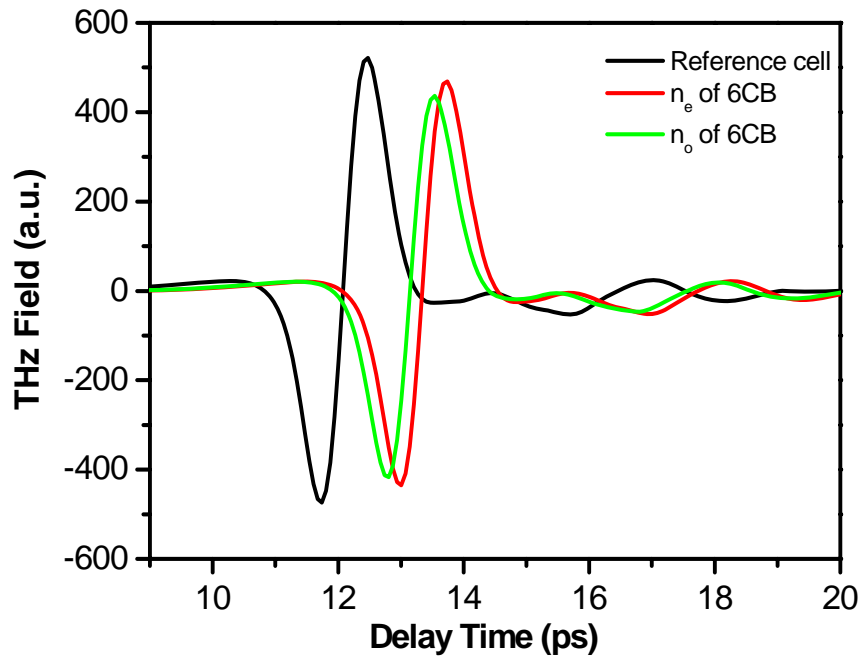


圖 4-1 6CB 液晶樣品與參考樣品 THz 時域圖。

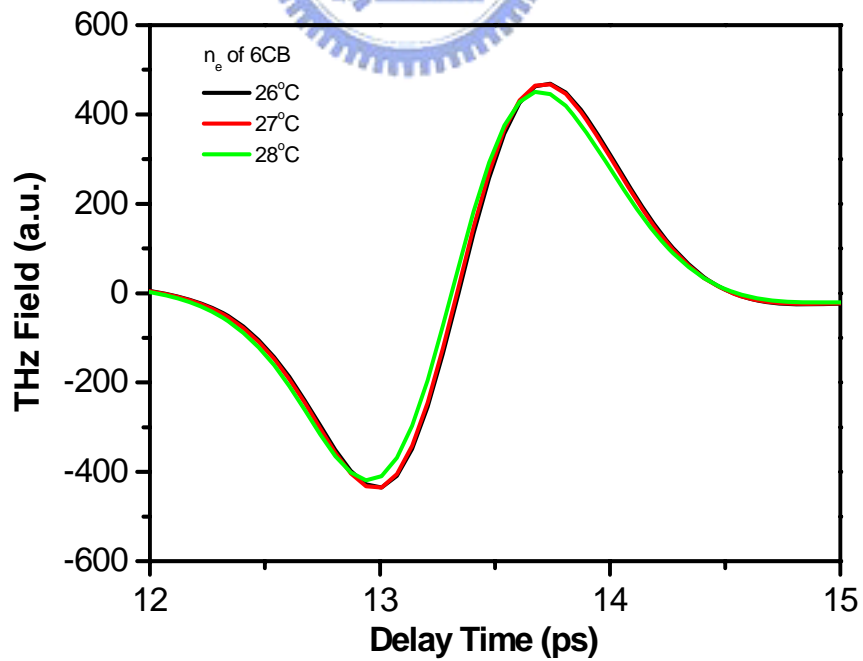


圖 4-2 6CB 液晶樣品在 26°C-28°C 非尋常光 THz 時域圖。

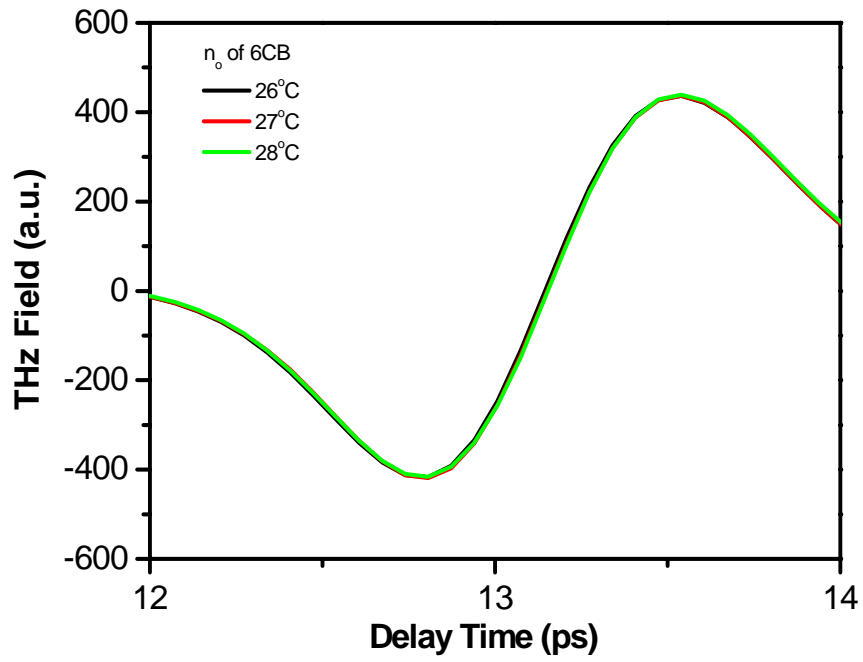


圖 4-3 6CB 液晶樣品在 26°C-28°C 尋常光 THz 時域圖。

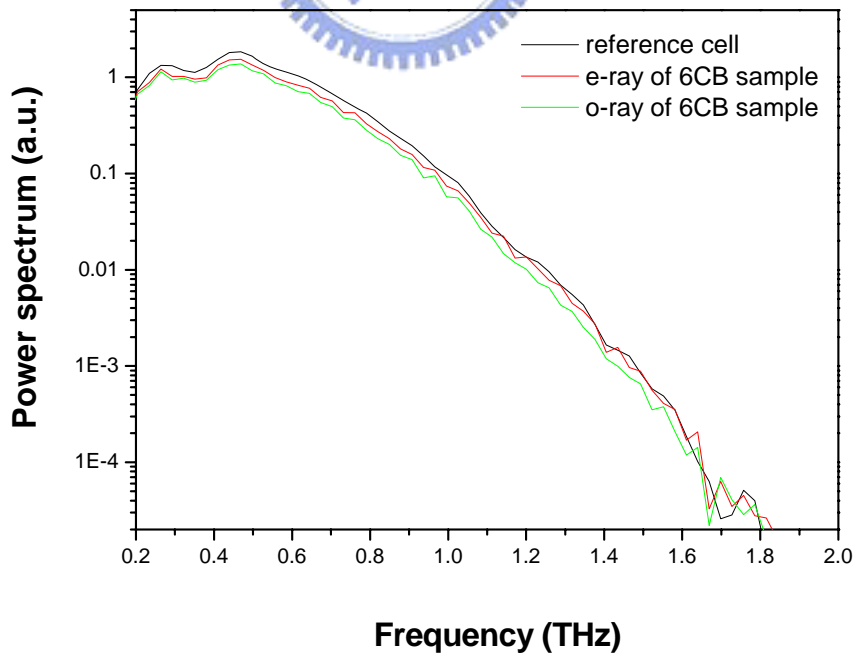


圖 4-4 6CB 液晶樣品尋常光與非尋常光強度頻域圖。

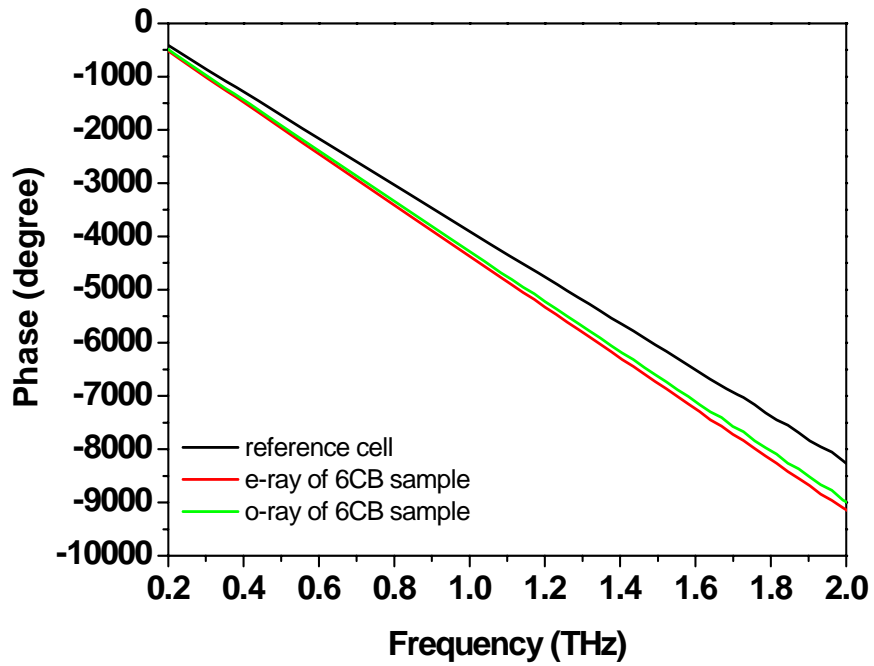


圖 4-5 6CB 液晶樣品尋常光與非尋常光相位頻域圖。

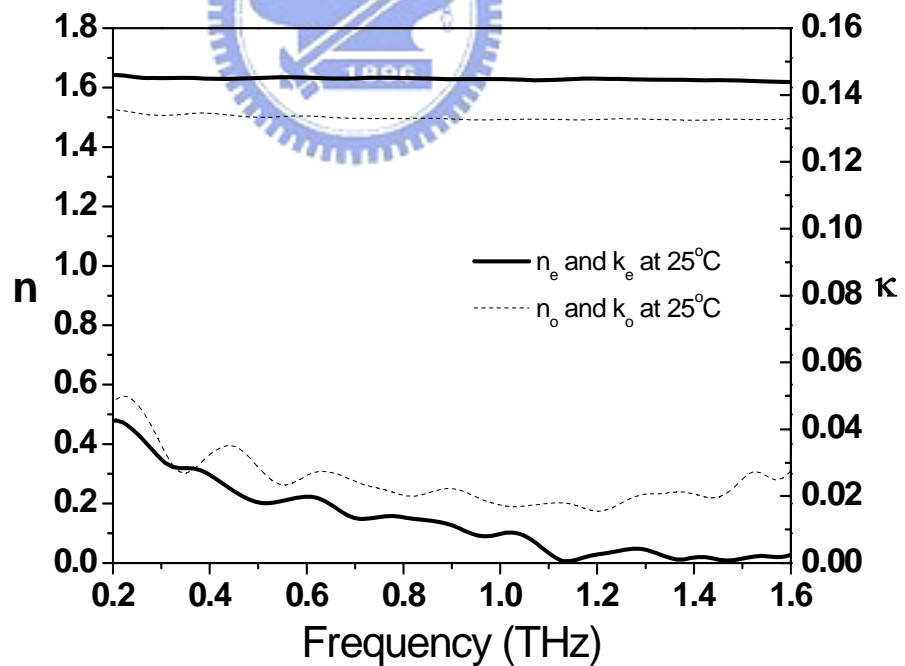


圖 4-6 液晶 6CB 在 25°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；
虛線是尋常光的折射率。

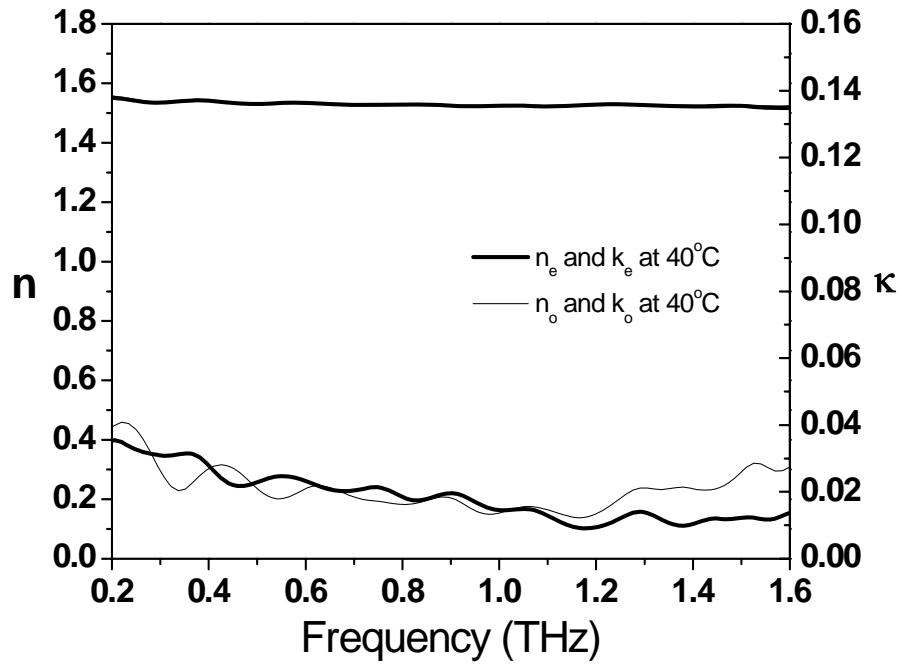


圖 4-7 液晶 6CB 在 40°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；
虛線是尋常光的折射率。

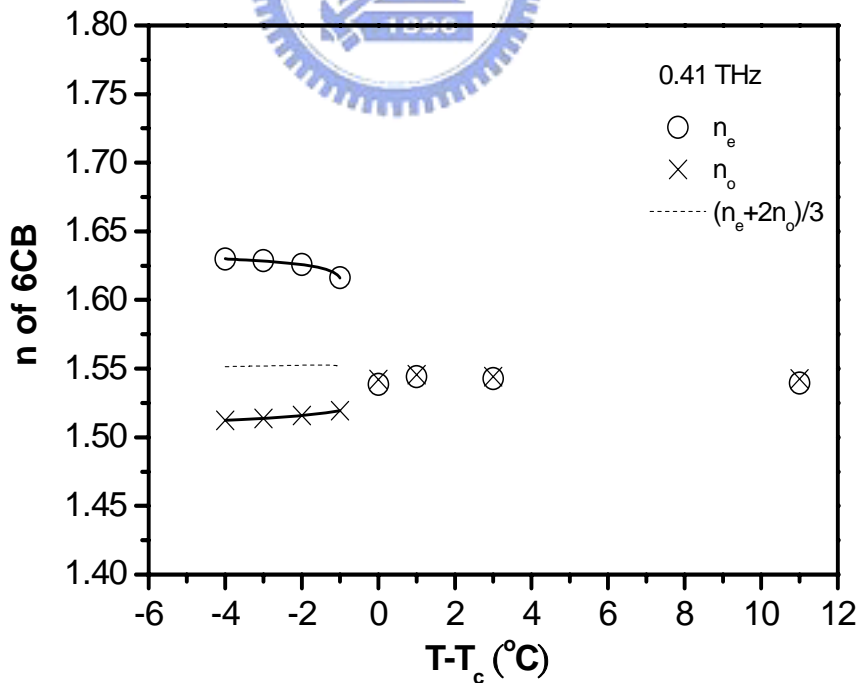


圖 4-8 6CB 分別在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變化關係圖。

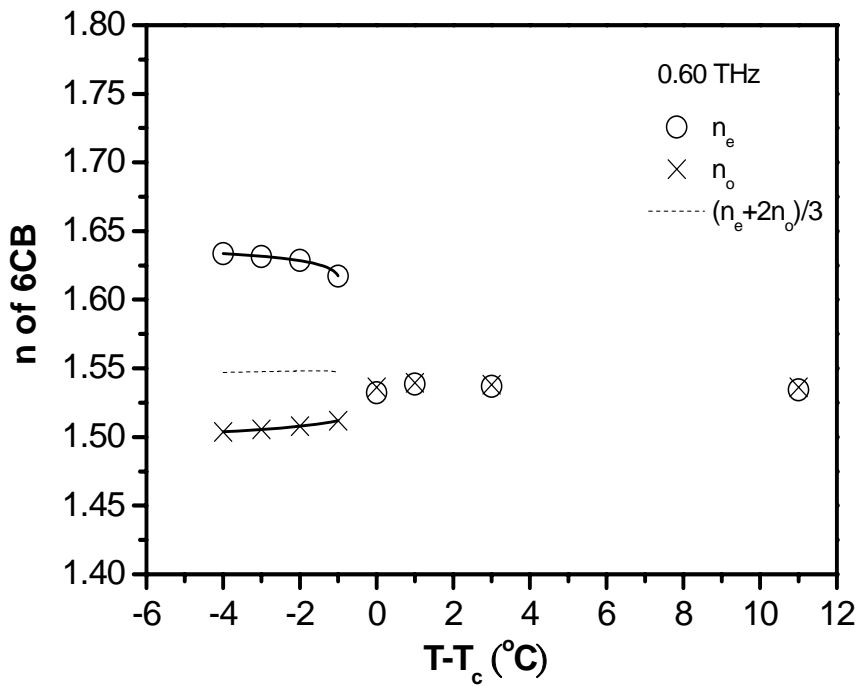


圖 4-9 6CB 分別在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變化關係圖。

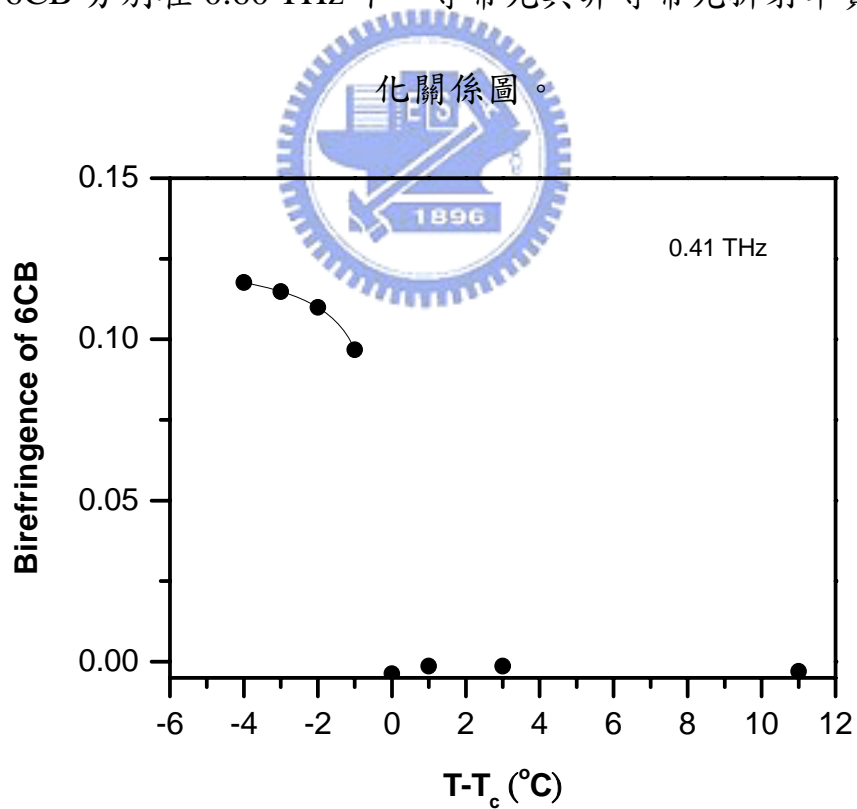


圖 4-10 6CB 在 0.41 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖。

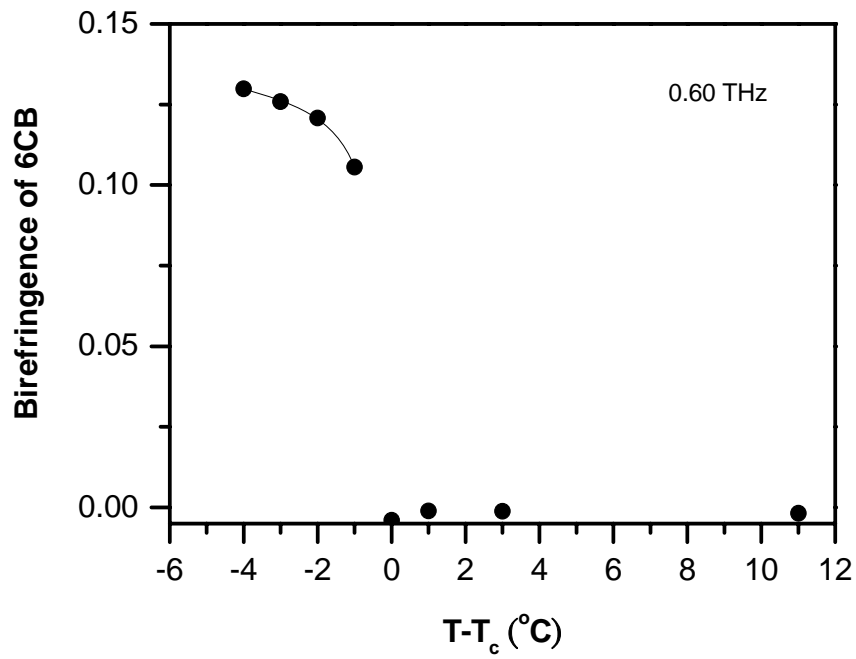


圖 4-11 6CB 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖。

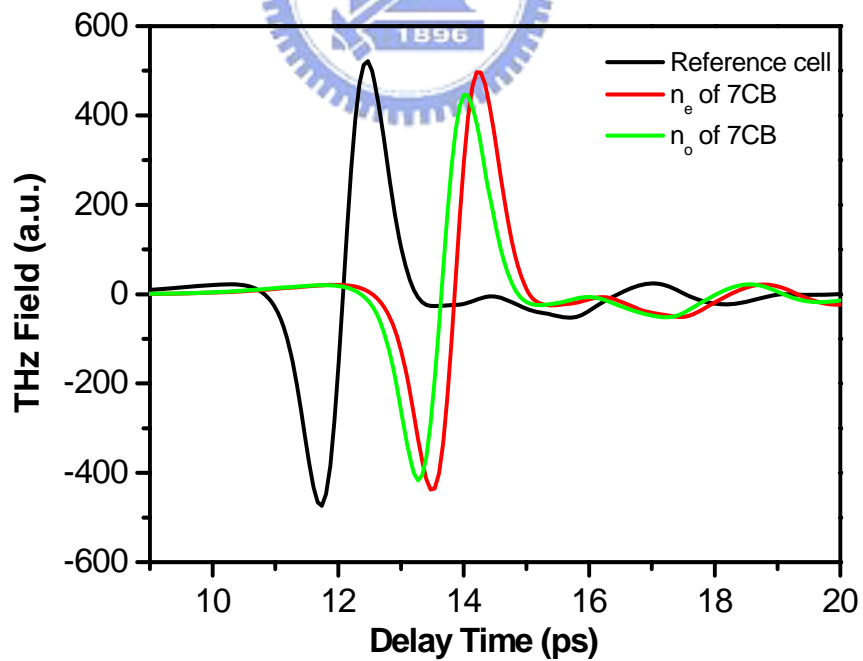


圖 4-12 7CB 液晶樣品與參考樣品 THz 時域圖。

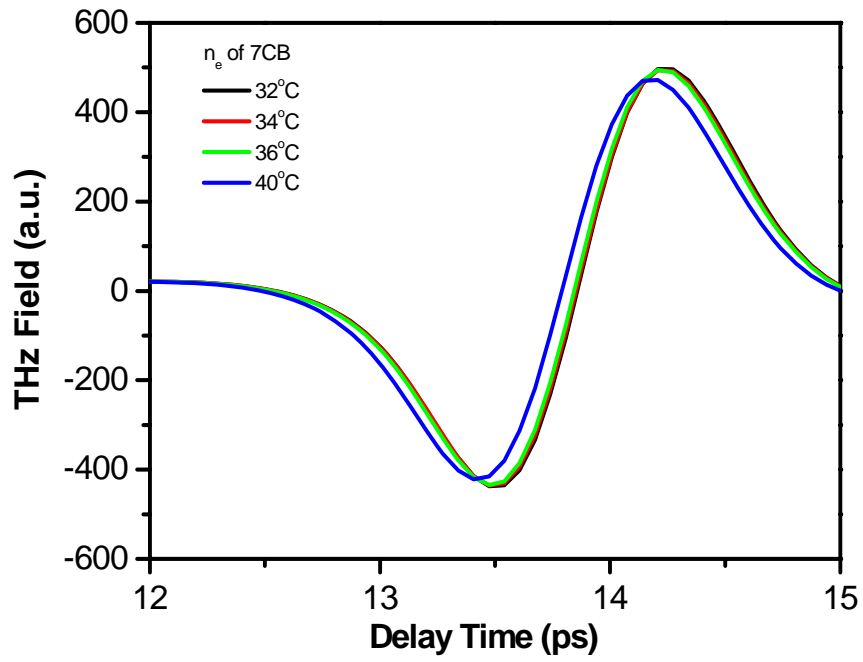


圖 4-13 7CB 液晶樣品在 32°C-40°C 非尋常光 THz 時域圖。

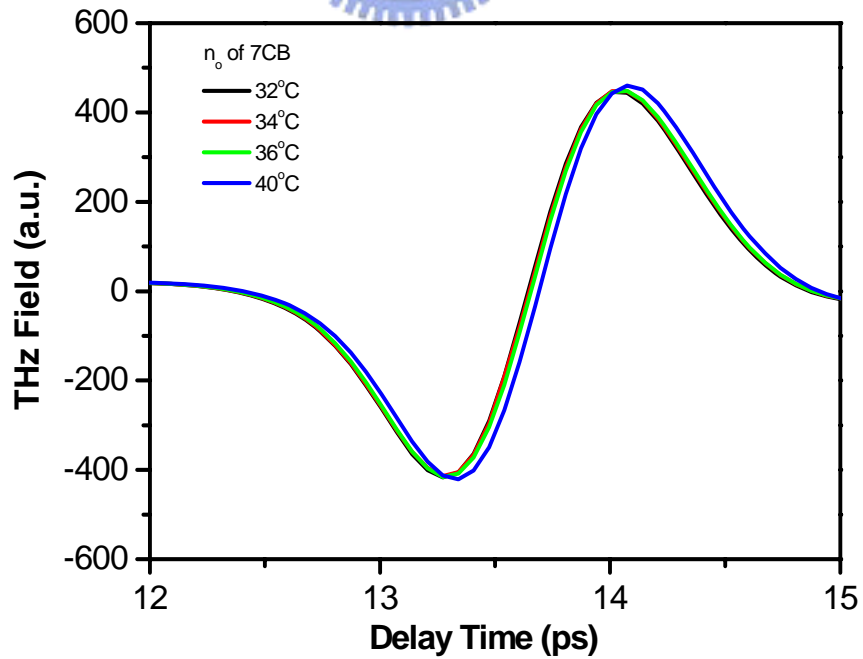


圖 4-14 7CB 液晶樣品在 32°C-40°C 尋常光 THz 時域圖。

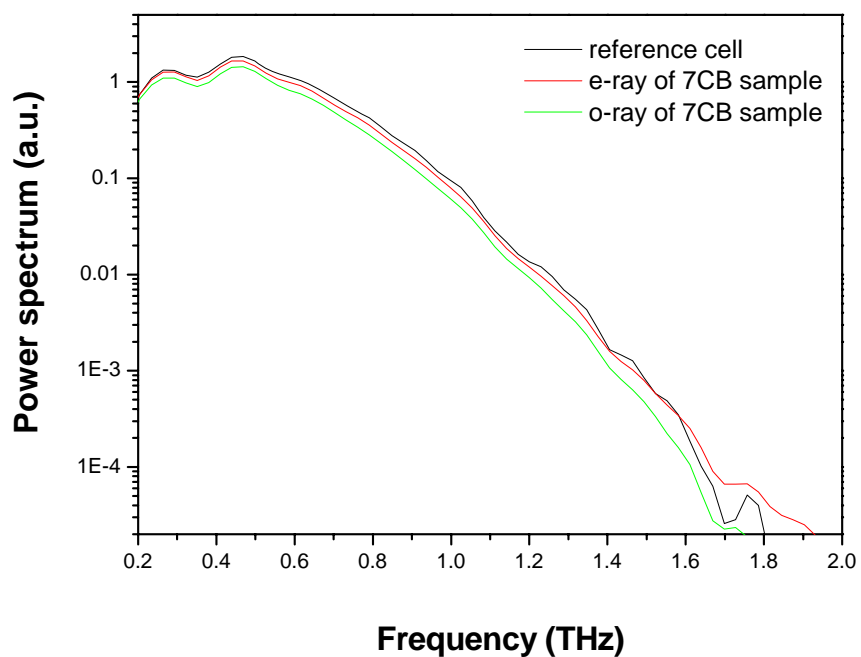


圖 4-15 7CB 液晶樣品尋常光與非尋常光強度頻域圖。

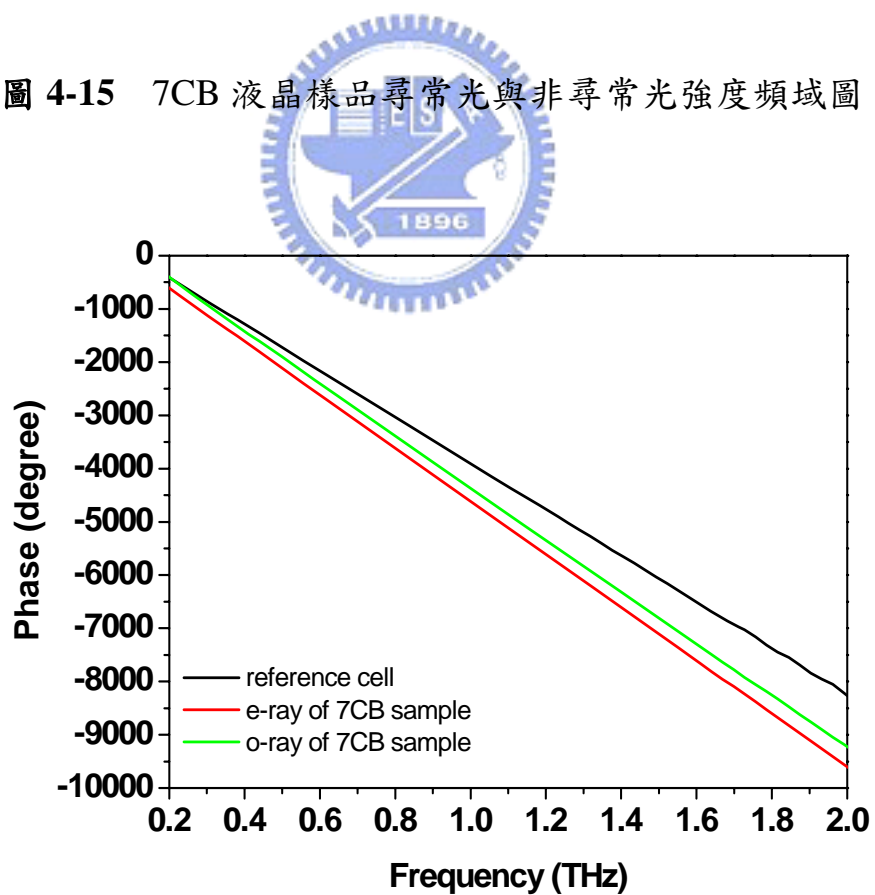


圖 4-16 7CB 液晶樣品尋常光與非尋常光相位頻域圖。

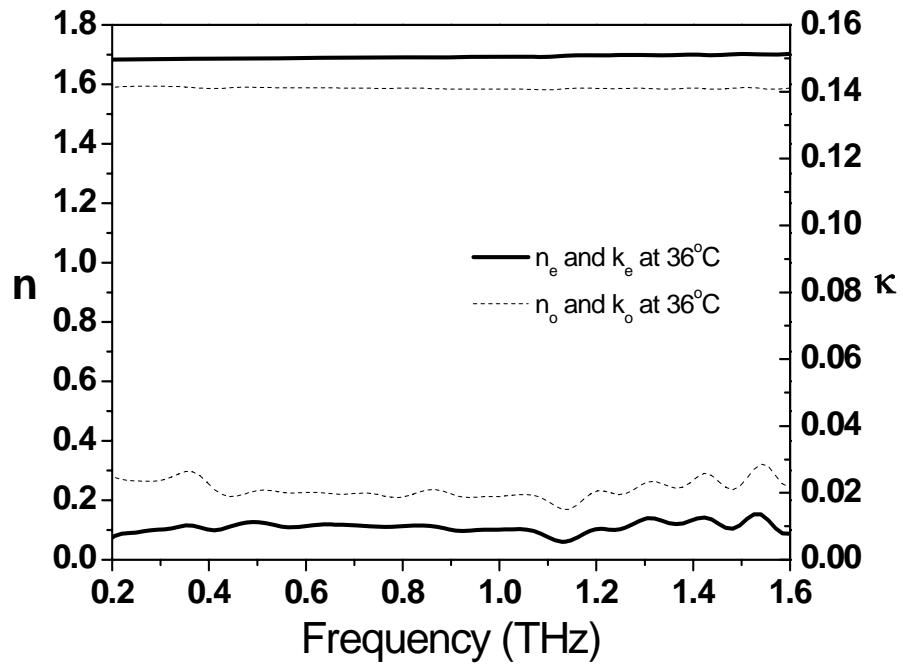


圖 4-17 液晶 7CB 在 36°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；

虛線是尋常光的折射率。

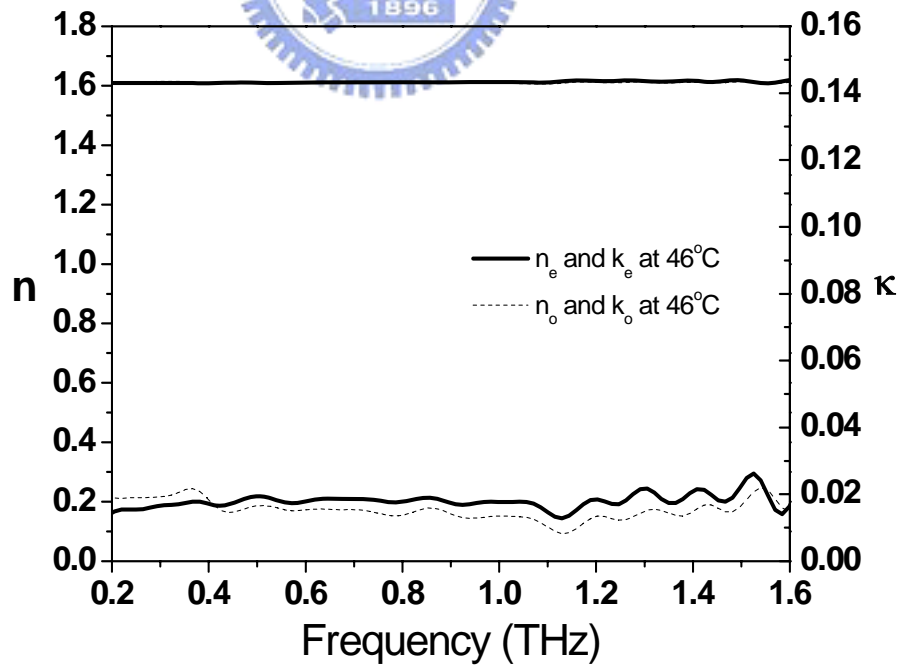


圖 4-18 液晶 7CB 在 46°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；

虛線是尋常光的折射率。

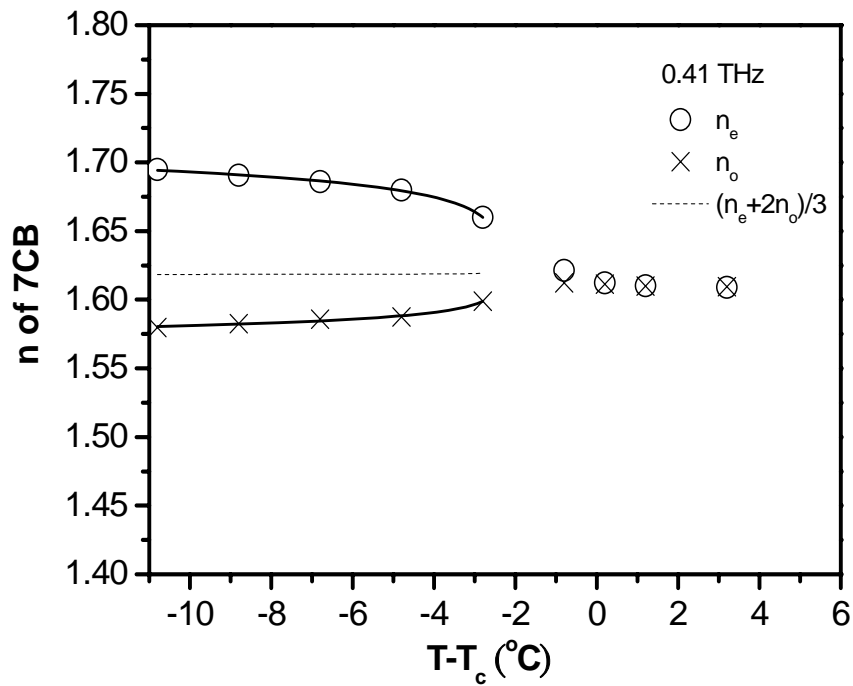


圖 4-19 7CB 分別在 0.41THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變化關係圖。

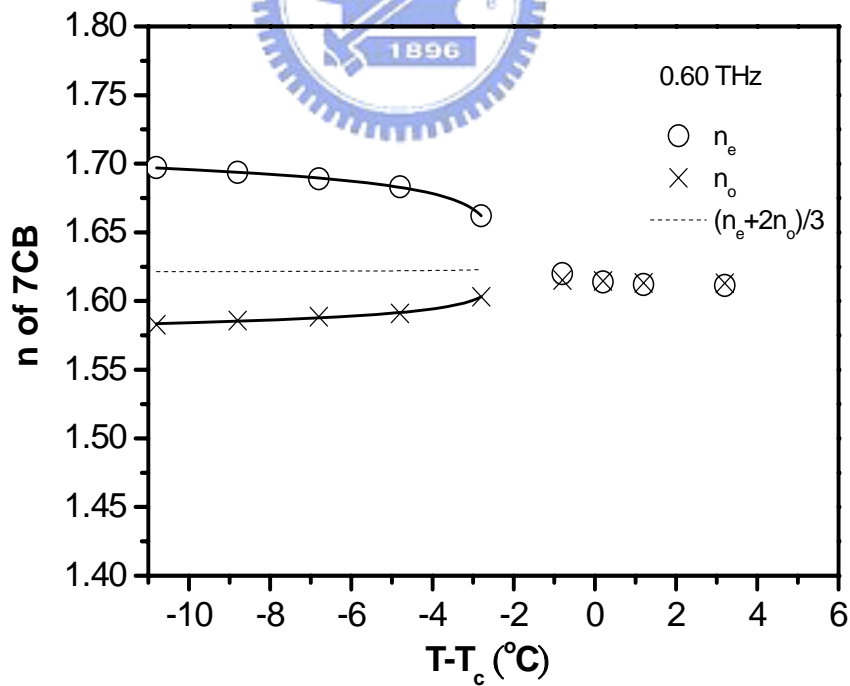


圖 4-20 7CB 分別在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變化關係圖。

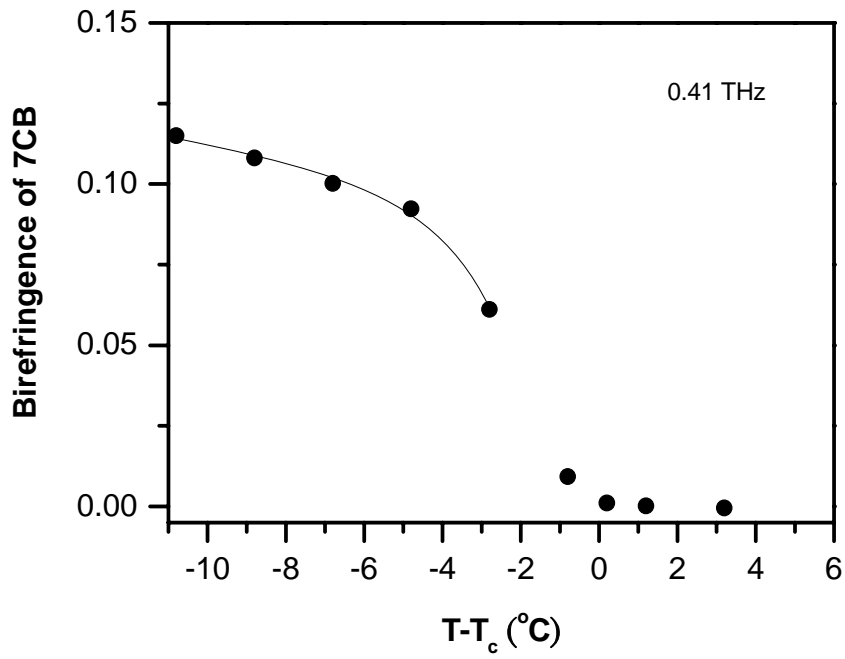


圖 4-21 7CB 在 0.41 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖。

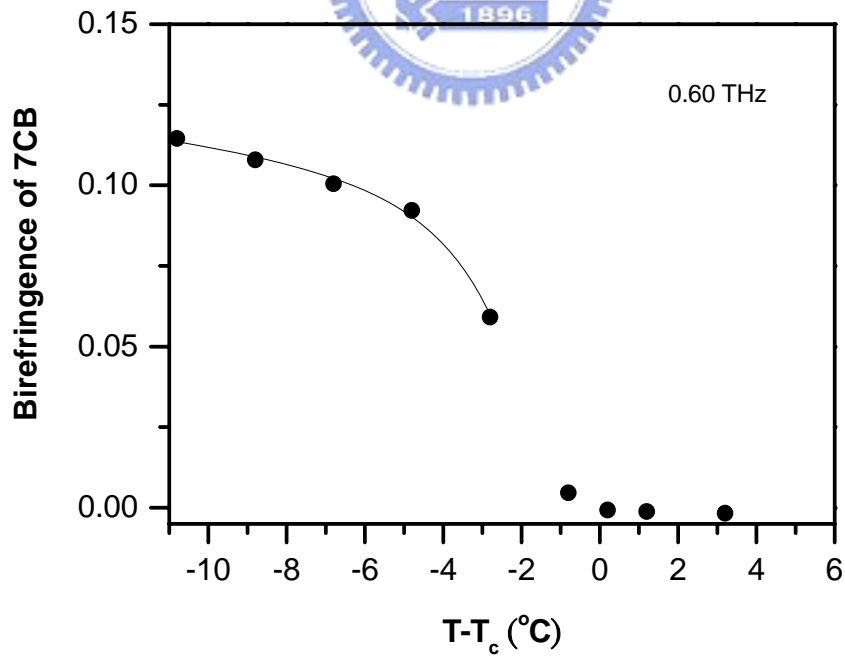


圖 4-22 7CB 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖。

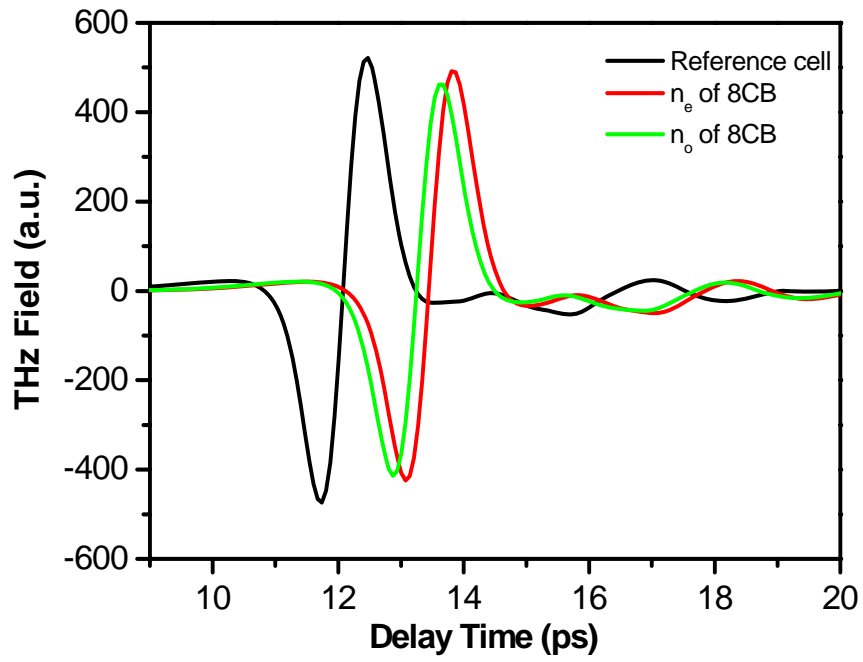


圖 4-23 8CB 液晶樣品與參考樣品 THz 時域圖。

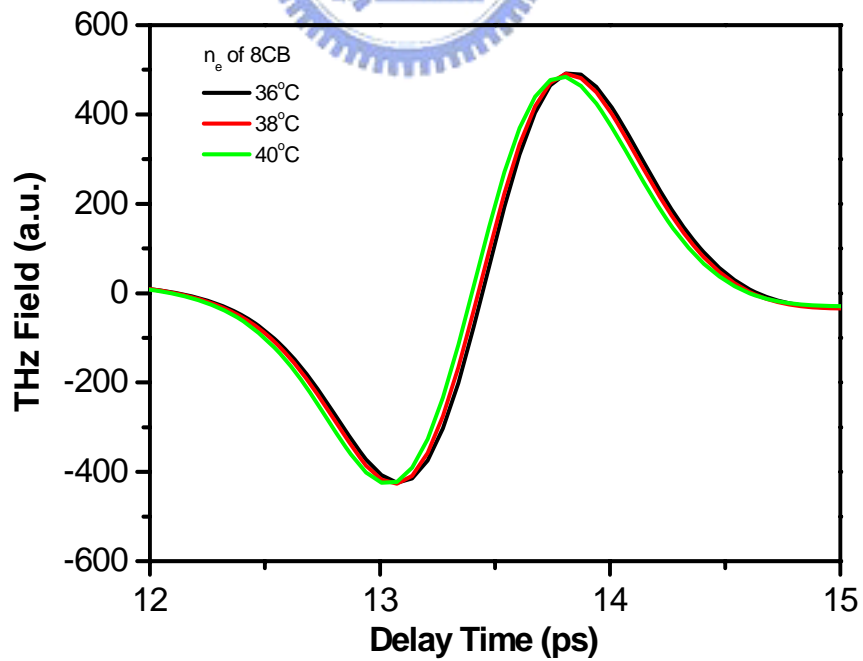


圖 4-24 8CB 液晶樣品在 36°C-40°C 非尋常光 THz 時域圖。

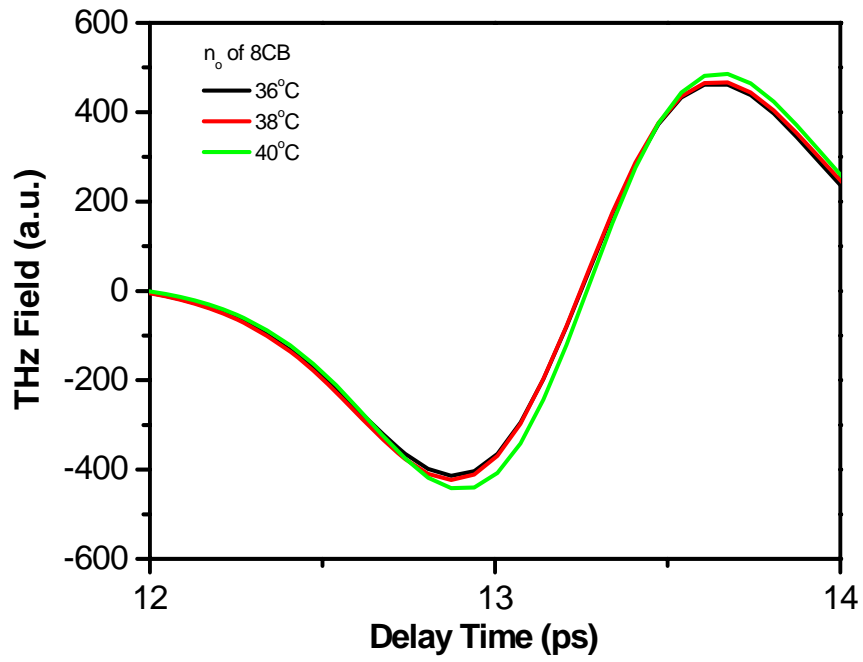


圖 4-25 8CB 液晶樣品在 36°C-40°C 尋常光 THz 時域圖。

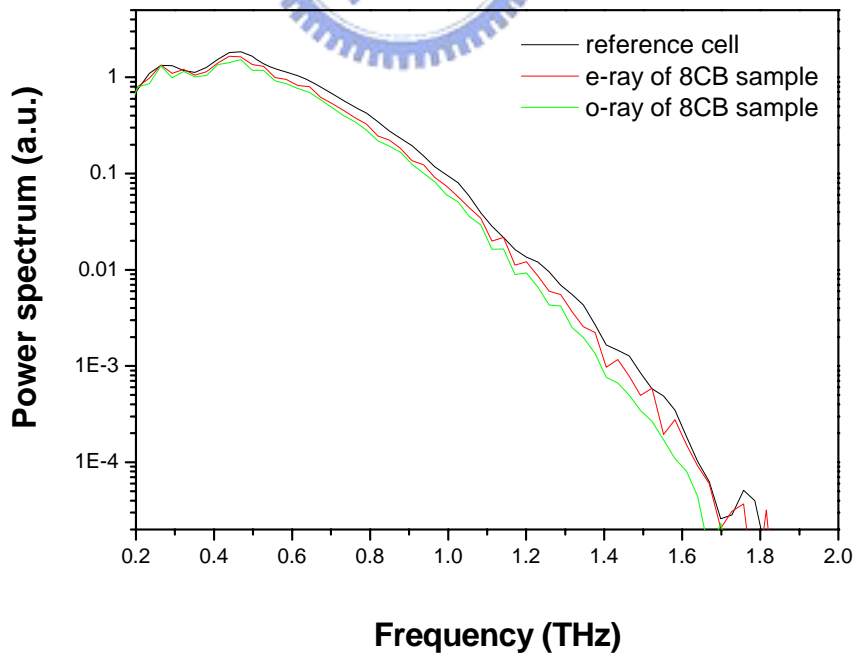


圖 4-26 8CB 液晶樣品尋常光與非尋常光強度頻域圖。

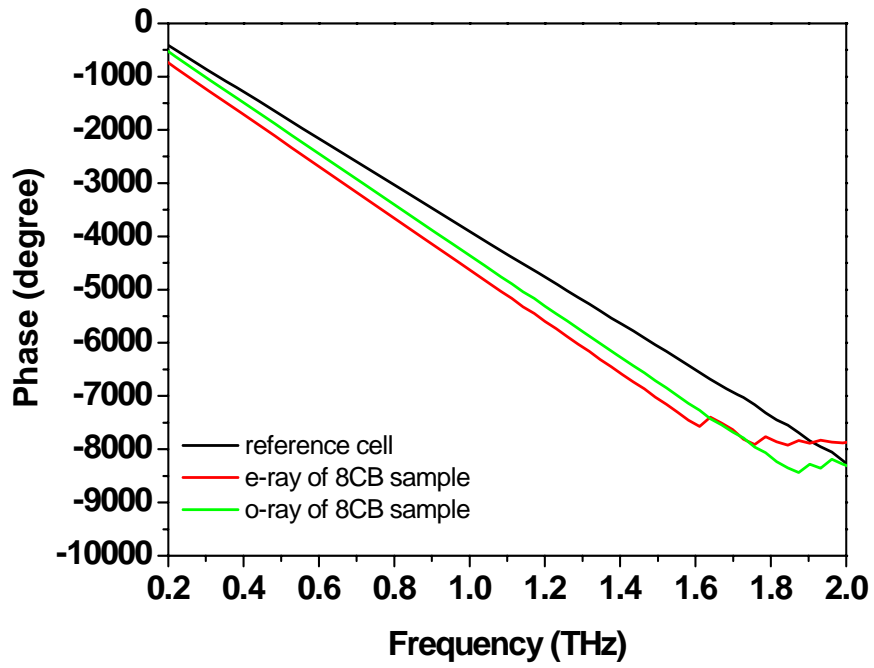


圖 4-27 8CB 液晶樣品尋常光與非尋常光相位頻域圖。

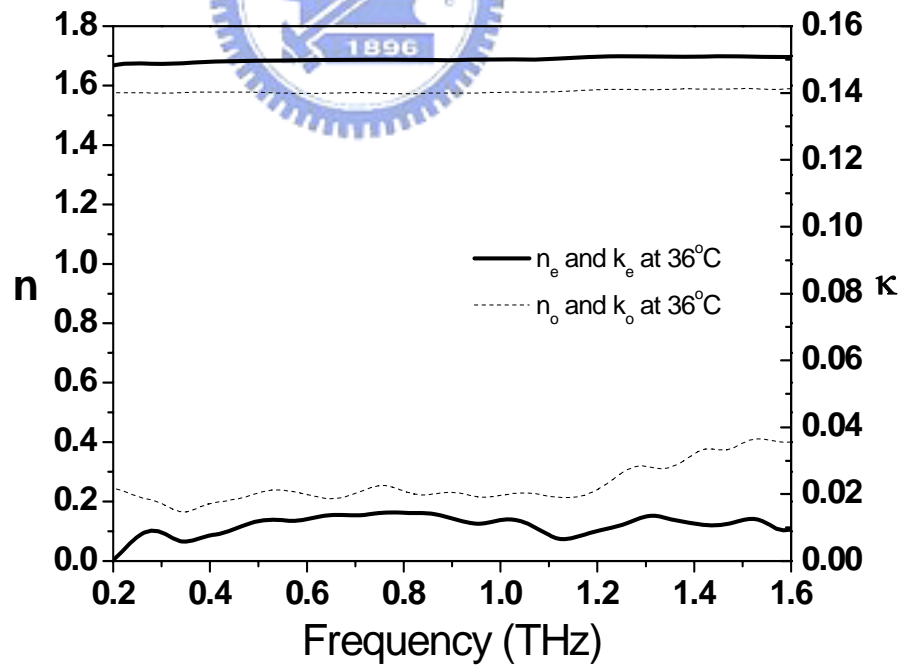


圖 4-28 液晶 8CB 在 36°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；

虛線是尋常光的折射率。

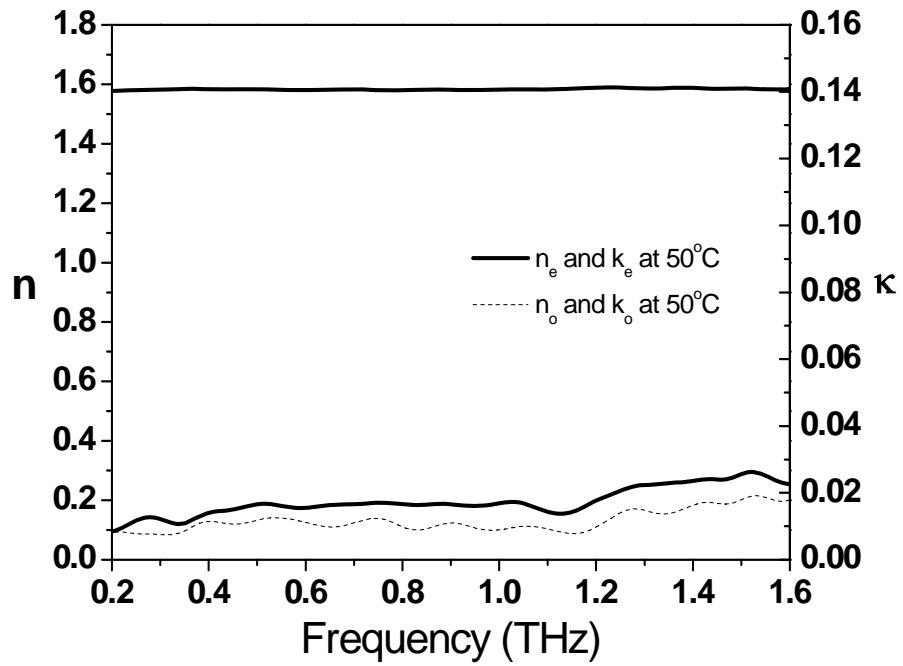


圖 4-29 液晶 8CB 在 50°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；
虛線是尋常光的折射率。

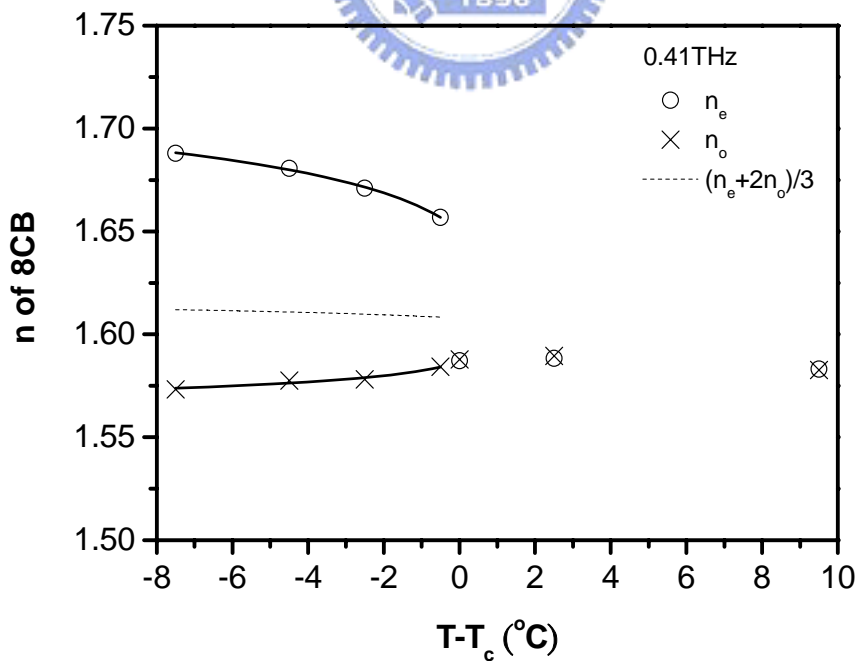


圖 4-30 8CB 分別在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變化關係圖。

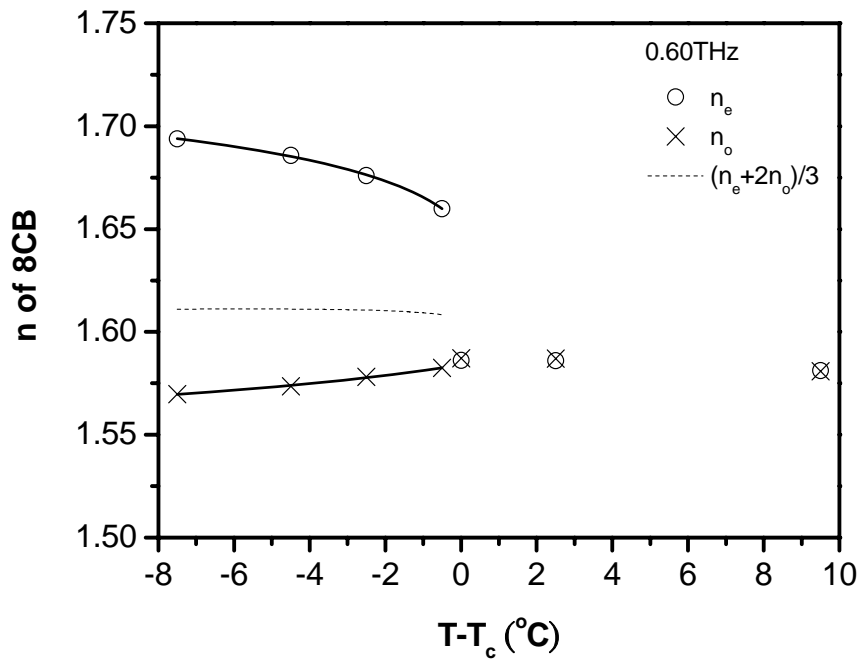


圖 4-31 8CB 分別在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變

化關係圖。

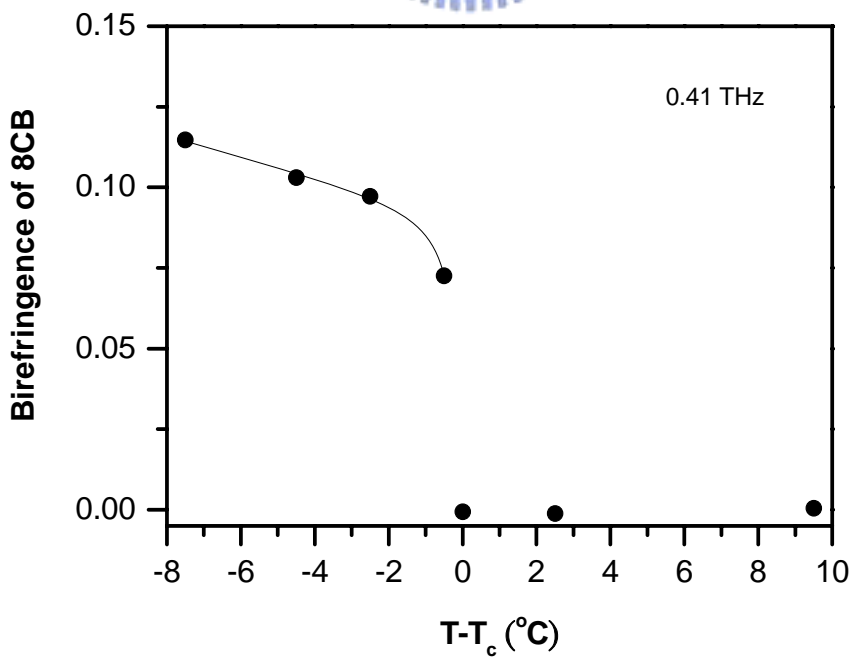


圖 4-32 8CB 在 0.41 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖。

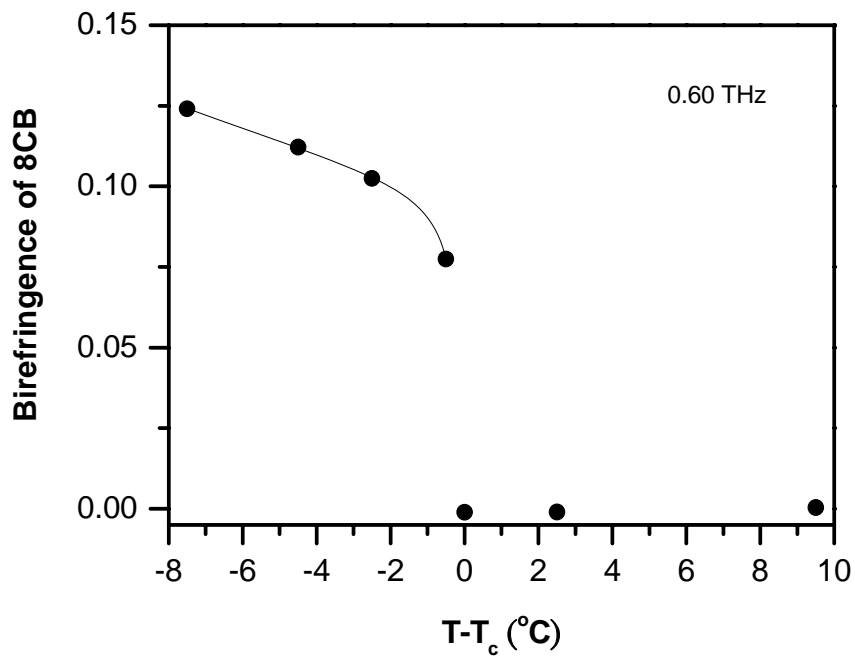


圖 4-33 8CB 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖。

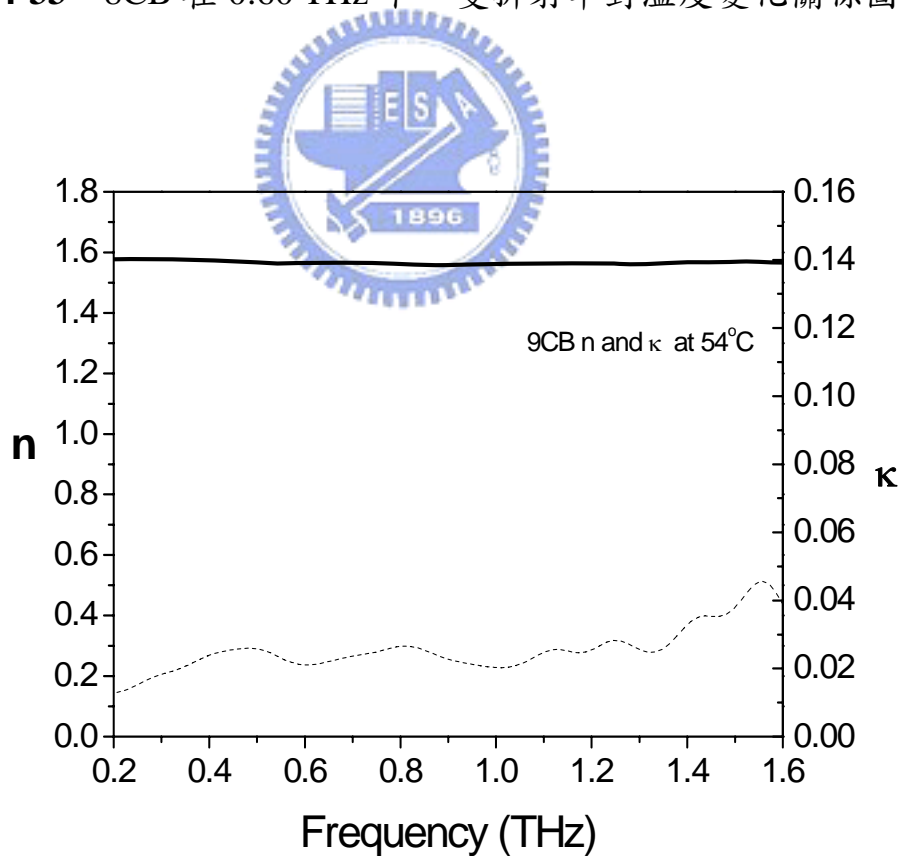


圖 4-34 液晶 9CB 在 54°C 折射率。實線是折射率的實部 n ；

虛線是折射率的虛部 κ 。

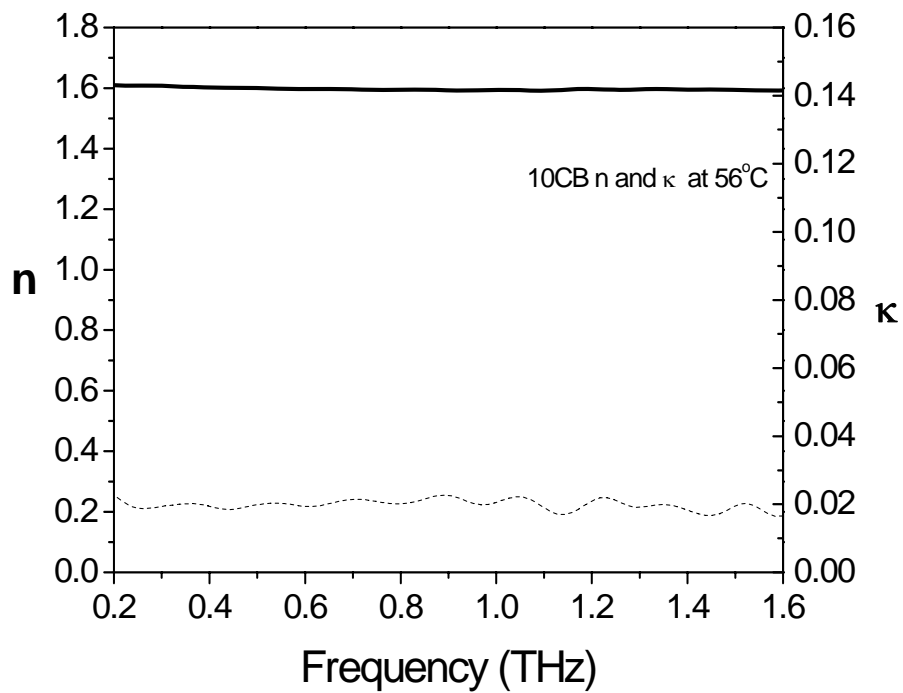


圖 4-35 液晶 10CB 在 56°C 折射率。實線是折射率的實部 n ；

虛線是折射率的虛部 κ 。

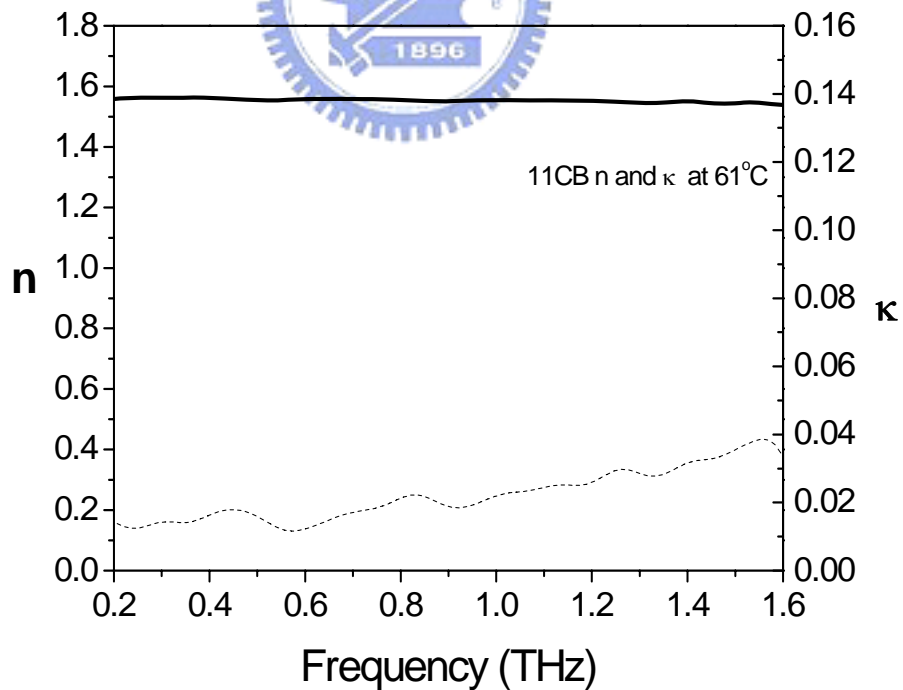


圖 4-36 液晶 11CB 在 61°C 折射率。實線是折射率的實部 n ；

虛線是折射率的虛部 κ 。

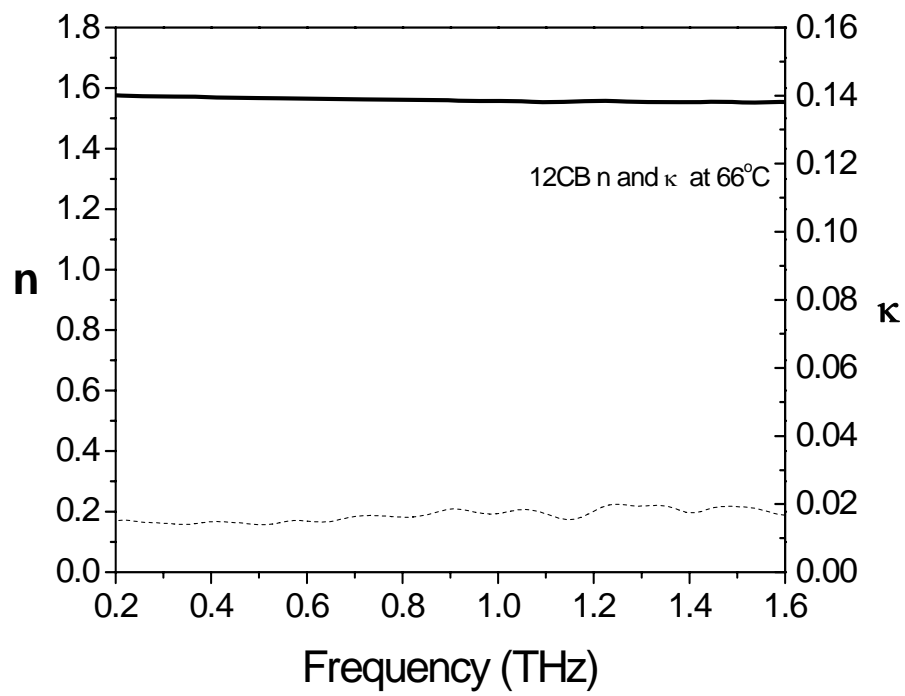
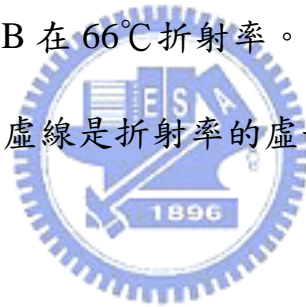


圖 4-37 液晶 12CB 在 66°C 折射率。實線是折射率的實部 n ；

虛線是折射率的虛部 κ 。



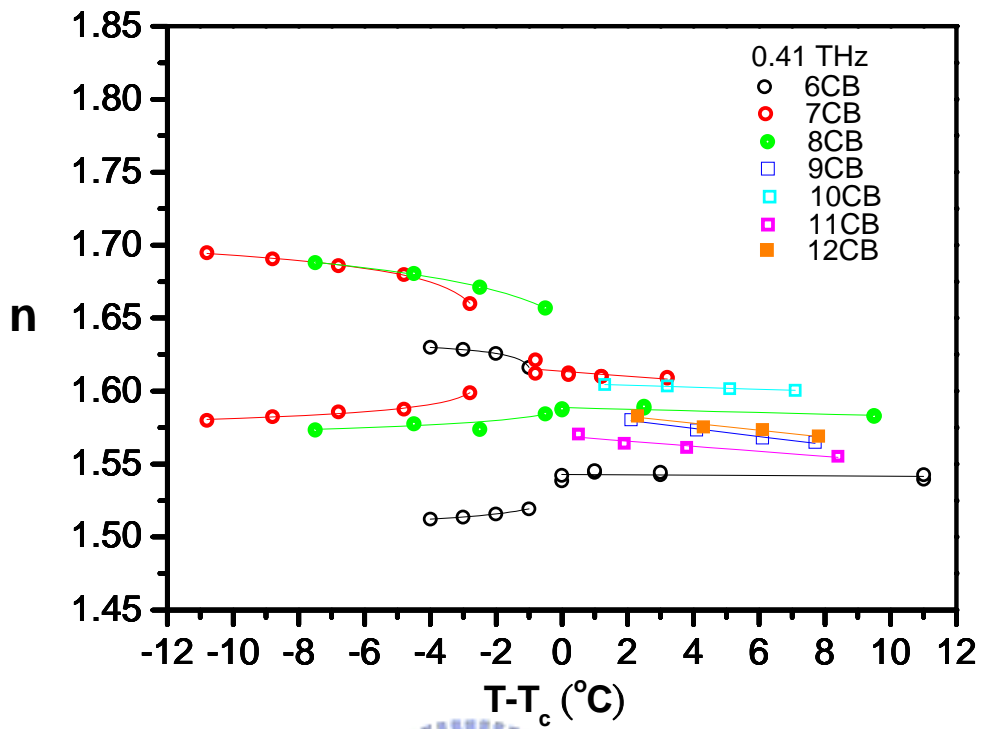


圖 4-38 nCB (n=6-12) 在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變化關係圖。

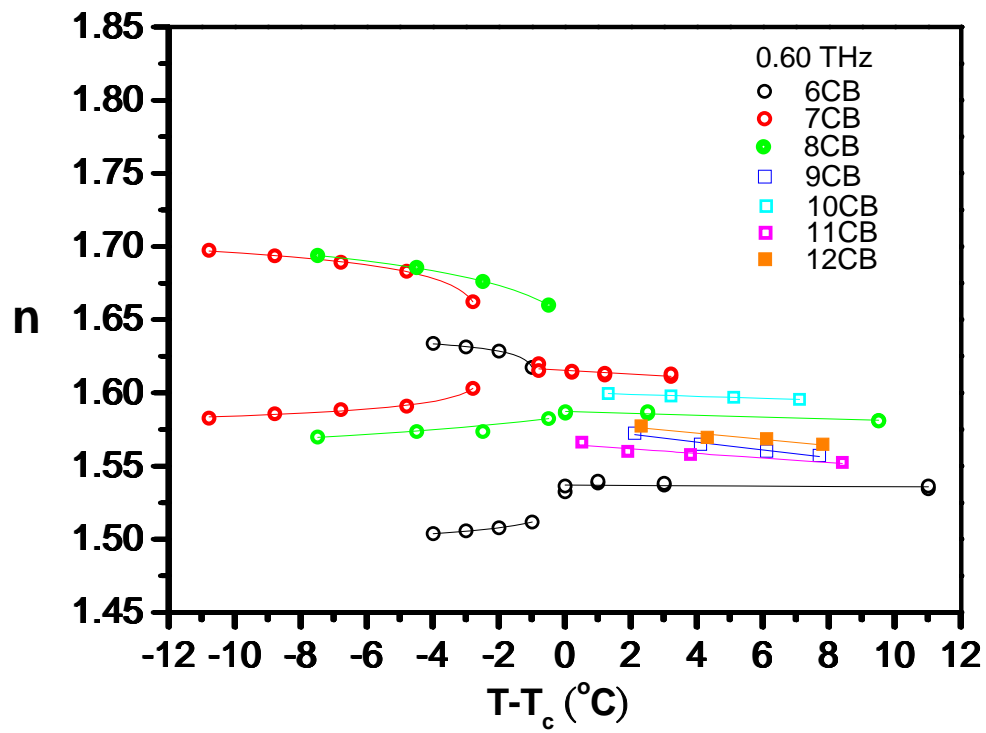


圖 4-39 nCB (n=6-12) 在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率實部對溫度變化關係圖。

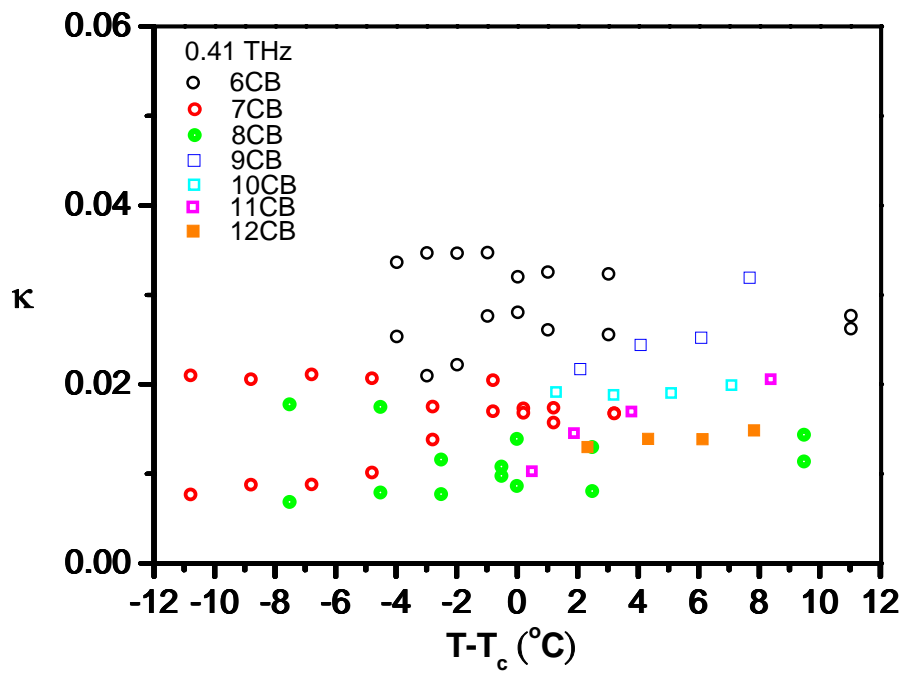


圖 4-40 nCB (n=6-12) 在 0.41 THz 下，尋常光與非尋常光折射率虛部對

溫度變化關係圖。



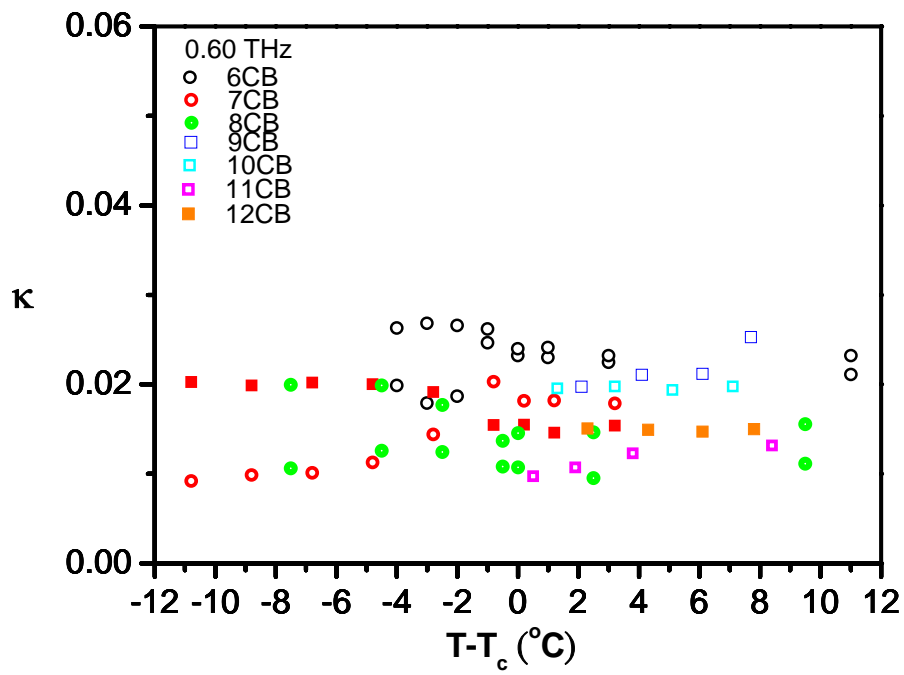


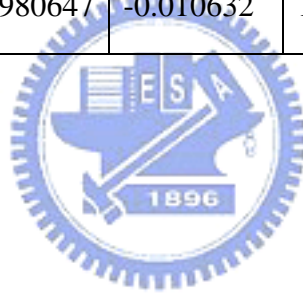
圖 4-41 nCB (n=6-12) 在 0.60 THz 下，尋常光與非尋常光折射率虛部對

溫度變化關係圖。



表 4-4.1 公式 (4-4.1) 的擬合參數；如圖 4-38 到 圖 4-39 所示。

Frequency (THz)	A_o	B_o	C_o	A_e	B_e	C_e
0.41 (6CB)	1.519513	-28.976336	-0.003440	1.625447	-29.902719	0.002462
0.60 (6CB)	1.512481	-28.881073	-0.004055	1.628026	-29.890908	0.002977
0.41 (7CB)	1.594035	-45.131616	-0.003974	1.668309	-45.095916	0.007221
0.60 (7CB)	1.597366	-45.184321	-0.004079	1.673295	-45.23427	0.006598
0.41 (8CB)	1.585765	-39.67098	-0.003569	1.645257	-39.201211	0.0118705
0.60 (8CB)	1.613040	-34.980647	-0.010632	1.651384	-39.460864	0.011873



第五章 結論與未來展望

我們利用兆赫波時域頻譜儀 (THz-TDS) 量測 nCB (n=6-12) 系列液晶在兆赫波段下的光學性質。實驗結果顯示 6CB、7CB 和 8CB 在兆赫波段下的雙折射率範圍分別為 0.106-0.130、0.059-0.115 和 0.077-0.124 (圖 5-1)。根據文獻[12]，5CB、6CB、7CB 和 8CB 在可見光下的雙折射率範圍分別為 0.114-0.189、0.109-0.144、0.116-0.169 和 0.094-0.152 (圖 5-2)。在可見光波段下，5CB 的雙折射率大於 7CB 的雙折射率、6CB 的雙折射率大於 8CB 的雙折射率；在兆赫波段下，6CB 的雙折射率也有大於 8CB 的雙折射率的趨勢。nCB (n=6-8) 液晶在兆赫波段下的雙折射率均略小於在可見光段下的雙折射率，但其雙折射率仍遠大於一般的物質，故可拿來做一些兆赫波元件的應用。表 5-1 為 nCB (n=6-8) 液晶在 nematic phase，折射率 n_e 、 n_o 、 κ 的範圍，以及在特定頻率下 (0.41、0.60THz) 的雙折射率 Δn ；表 5-2 為 nCB (n=6-12) 液晶在 isotropic phase 的折射率值 n 、 κ 。

未來展望，希望能改善兆赫波時域頻譜儀系統，讓可信訊號能達到 3THz，以利於我們更了解液晶在兆赫波段下的性質；尋找更大的雙折射率 (birefringence)、低損耗的材料，製作成更好的兆赫波液晶元件。

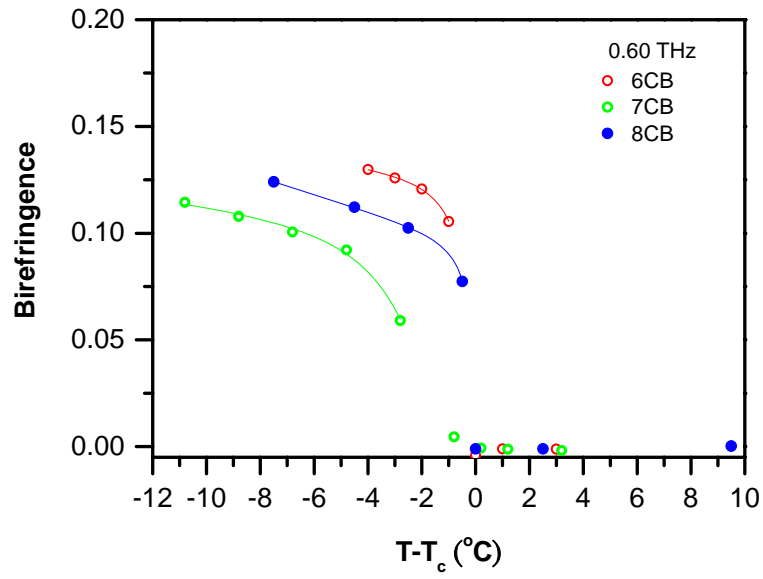


圖 5-1 nCB (n=6-8) 在 0.60 THz 下，雙折射率對溫度變化關係圖。

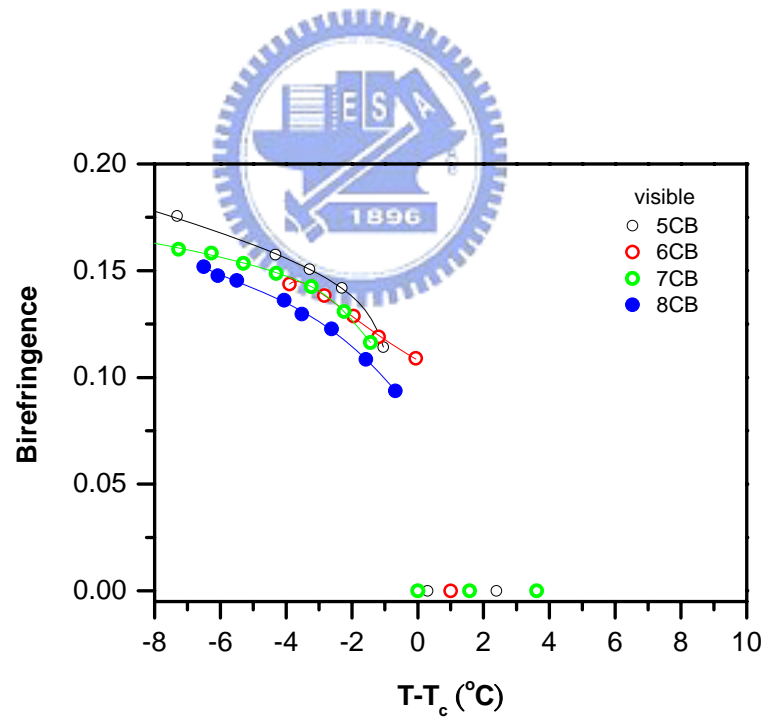


圖 5-2 nCB (n=5-8) 在可見光下，雙折射率對溫度變化關係圖。

表 5-1 nCB (n=6-8) 液晶在nematic phase，折射率 n_e 、 n_o 、 κ 的範圍；

在 0.41、0.60THz 下，雙折射率 Δn 的範圍。

Sample	n_e	n_o	κ	Δn 0.41Thz	Δn 0.60Thz
6CB nematic phase	1.61~1.63	1.49~1.50	<0.06	0.097~0.118	0.106~0.130
7CB nematic phase	1.66~1.70	1.58~1.60	<0.04	0.061~0.115	0.059~0.115
8CB nematic phase	1.66~1.69	1.57~1.58	<0.05	0.073~0.115	0.077~0.124

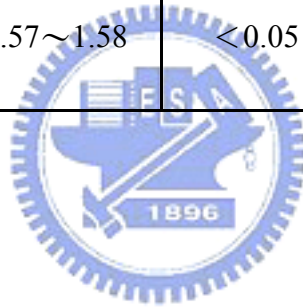


表 5-2 nCB (n=6-12) 液晶在 isotropic phase 的折射率值 n 、 κ 。

Sample	n	κ
6CB isotropic phase	1.53	<0.04
7CB isotropic phase	1.61	<0.03
8CB isotropic phase	1.58	<0.03
9CB isotropic phase	1.56	<0.05
10CB isotropic phase	1.60	<0.03
11CB isotropic phase	1.55	<0.04
12CB isotropic phase	1.56	<0.02

Reference

- [1] Hirohisa Kawamoto, Fellow, *IEEE*, Vol. 90, 460 (2002).
- [2] P.H. Siegel, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 50, 910 (2002).
- [3] M.V. Exter, C. Fattinger, and D. Grischkowsky, *Opt. Lett.* 14, 1128 (1989).
- [4] 松本正一, 角田市良, 液晶之基礎與應用.
- [5] D. W. Berreman, *Phys. Rev. Lett.* 28, 1683 (1972).
- [6] J. M. Geary, J. W. Goodby, A. R. Kmetz, and J. S. Patel, *J. Appl. Phys.* 62, 4100 (1987).
- [7] P. R. Smith, D. H. Auston, and M. C. Nuss, *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 255-260 (1988)
- [8] C. Fattinger, and D. Grischkowsky, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 490-492 (1989).
- [9] Dongfeng Liu and Jiayin Qin, *Appl. Optics*, **42**, 3678 (2003).
- [10] P. K. Benicewicz, J. P. Roberts, and A. J. Taylor, *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 2533 (1994).
- [11] Mariko Yamaguchi, Low-frequency dynamics of biomolecules studied by terahertz time-domain spectroscopy, The Doctoral Dissertation of Department of Applied Physics Graduate School of Engineering Osaka University, 2007.
- [12] D. A. Dunmur, M. R. Manterfield, W. H. Miller and J. K. Dunleavy, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1978, Vol. 45, pp. 127-144.
- [13] S. Brugioni, S. Faetti, and R. Meucci, *Liq. Cryst.* 30, 927 (2003).
- [14] E. Hecht, *Optics* (Addison Wesley, California, 1998).

附 錄

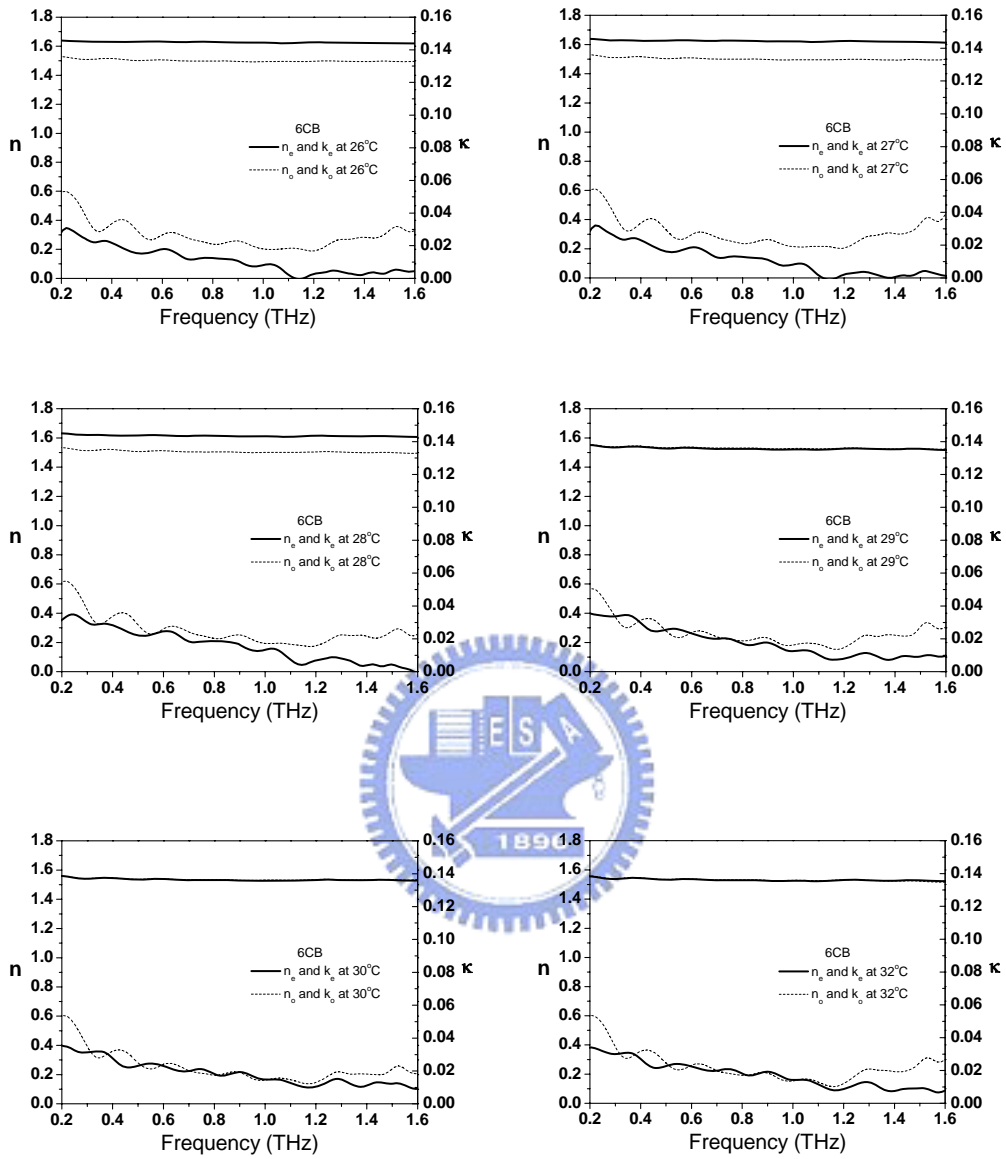


圖 1 液晶 6CB 在 26、27、28、29、30、32°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；虛線是尋常光的折射率。

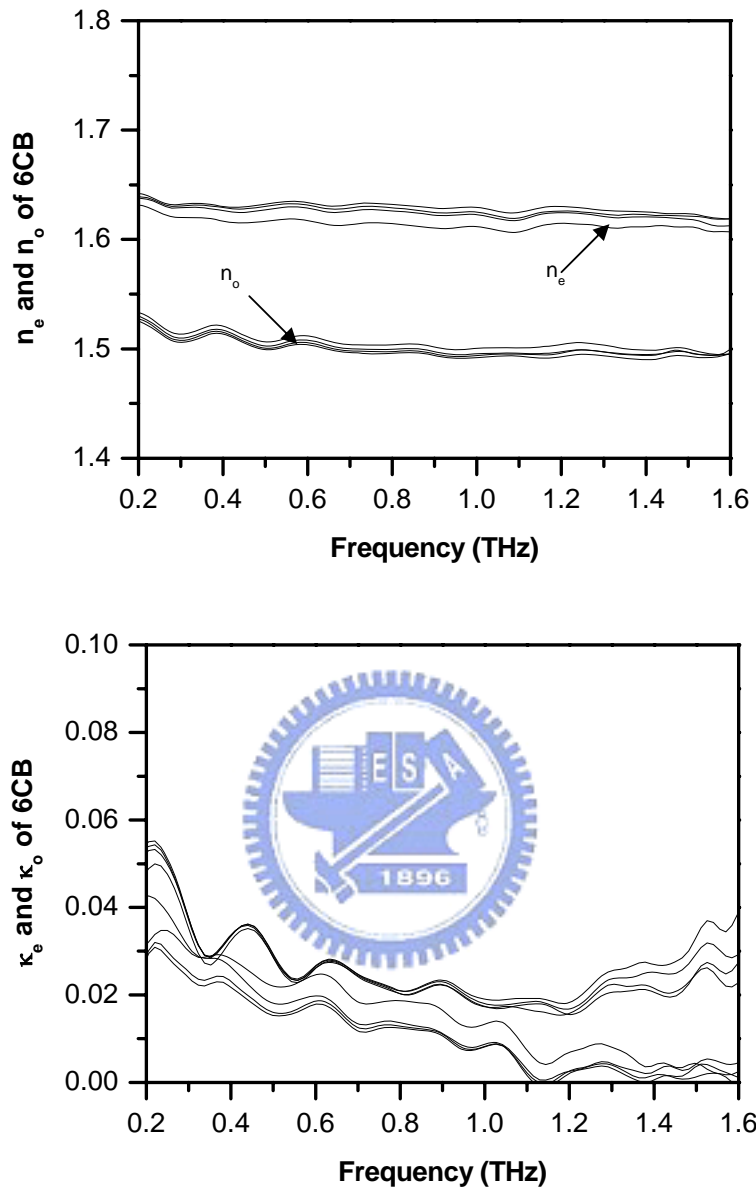


圖 2 液晶 6CB 在 25°C-28°C 折射率的實部與虛部。

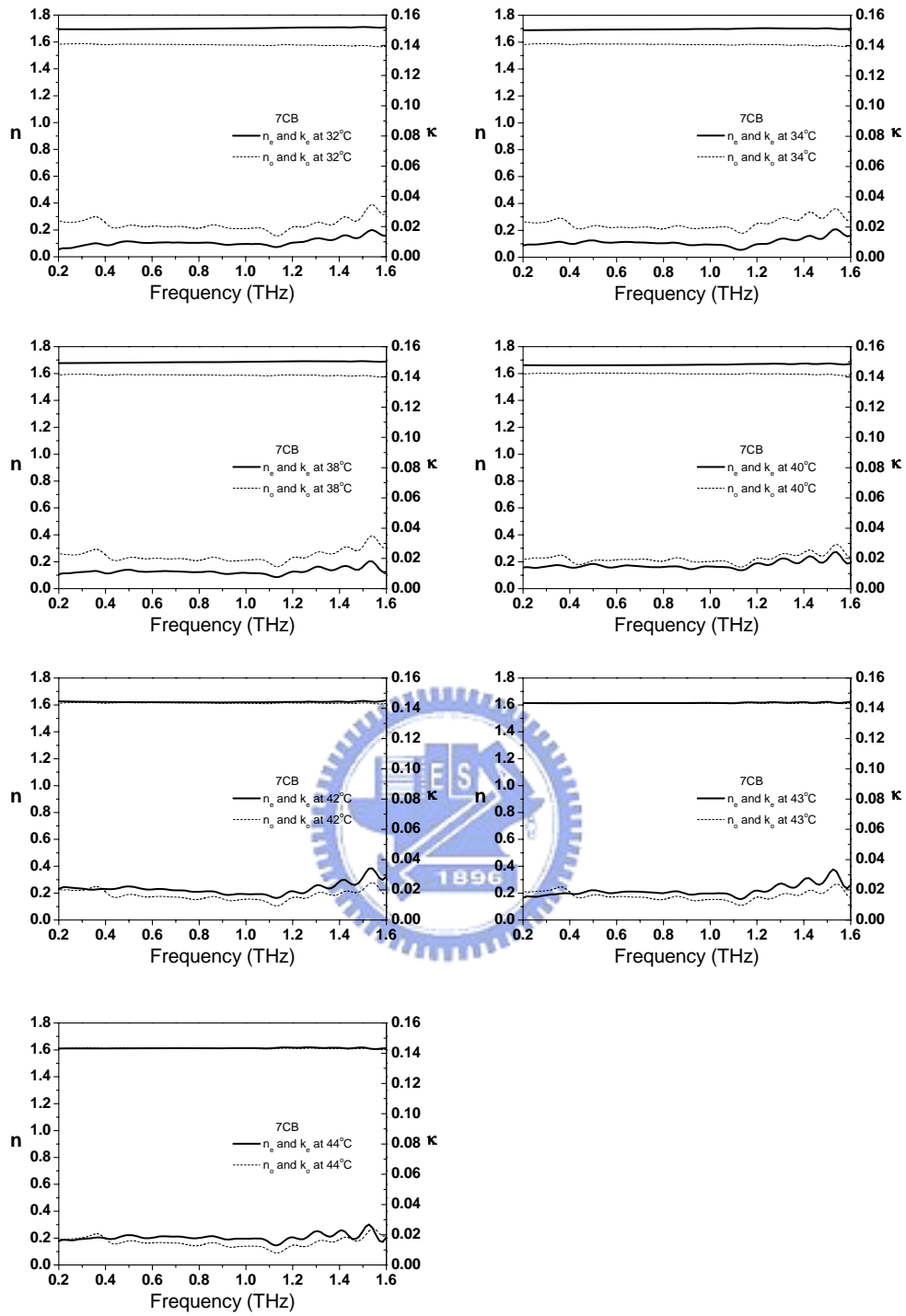


圖 3 液晶 7CB 在 32、34、38、40、42、43、44°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；虛線是尋常光的折射率。

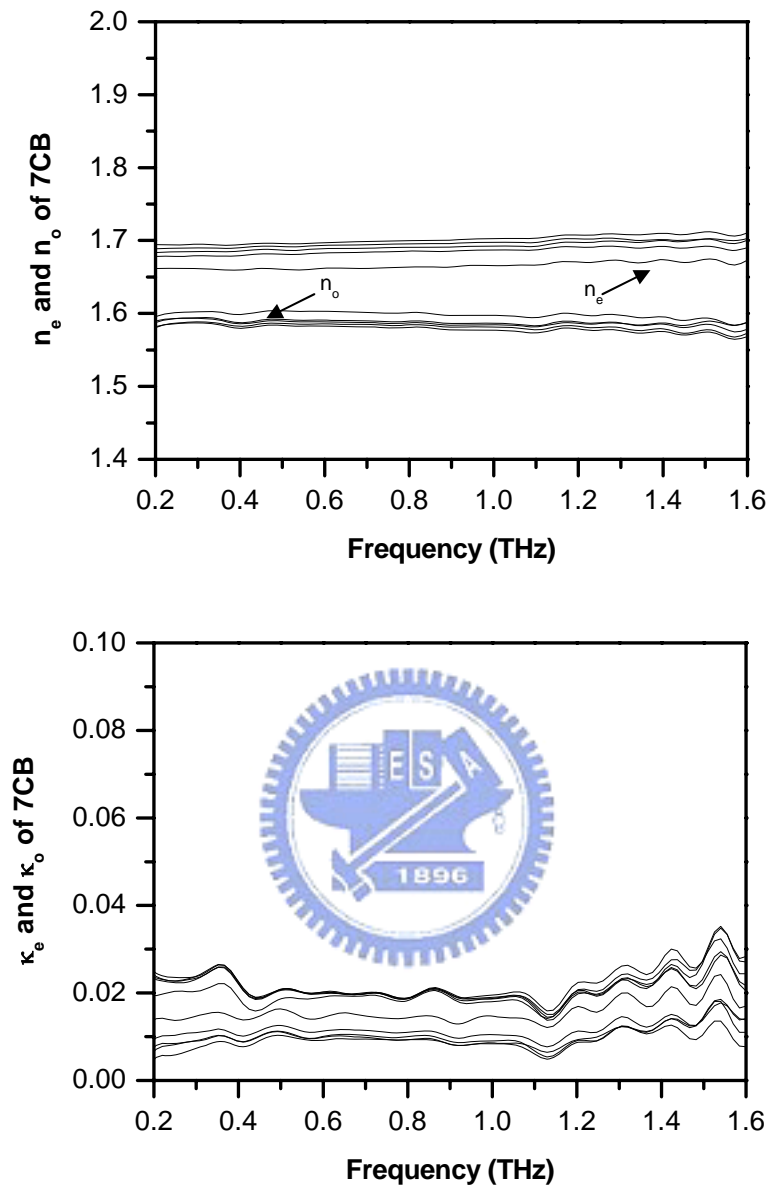


圖 4 液晶 7CB 在 32°C-40°C 折射率的實部與虛部。

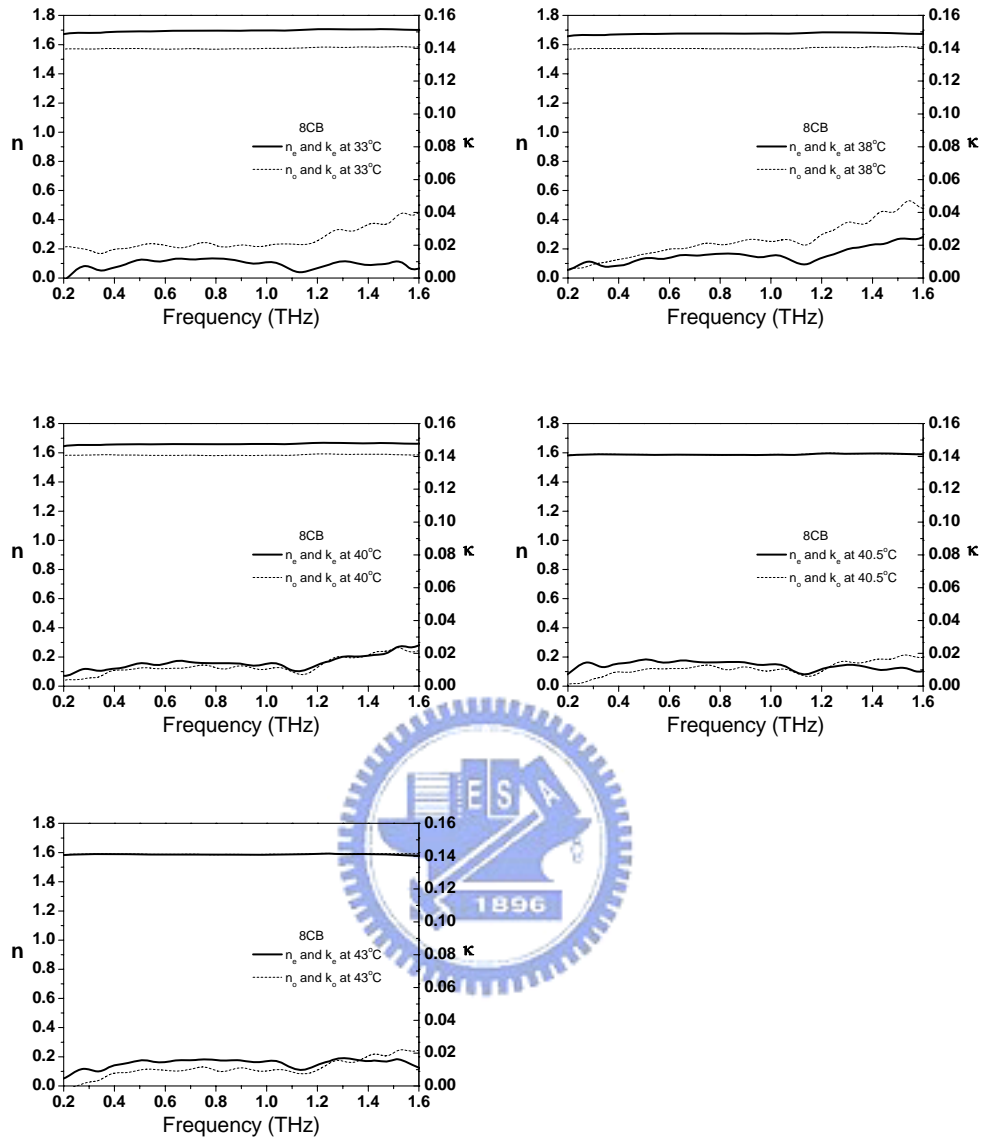


圖 5 液晶 8CB 在 33、38、40、40.5、43°C 折射率。實線是非尋常光的折射率；虛線是尋常光的折射率。

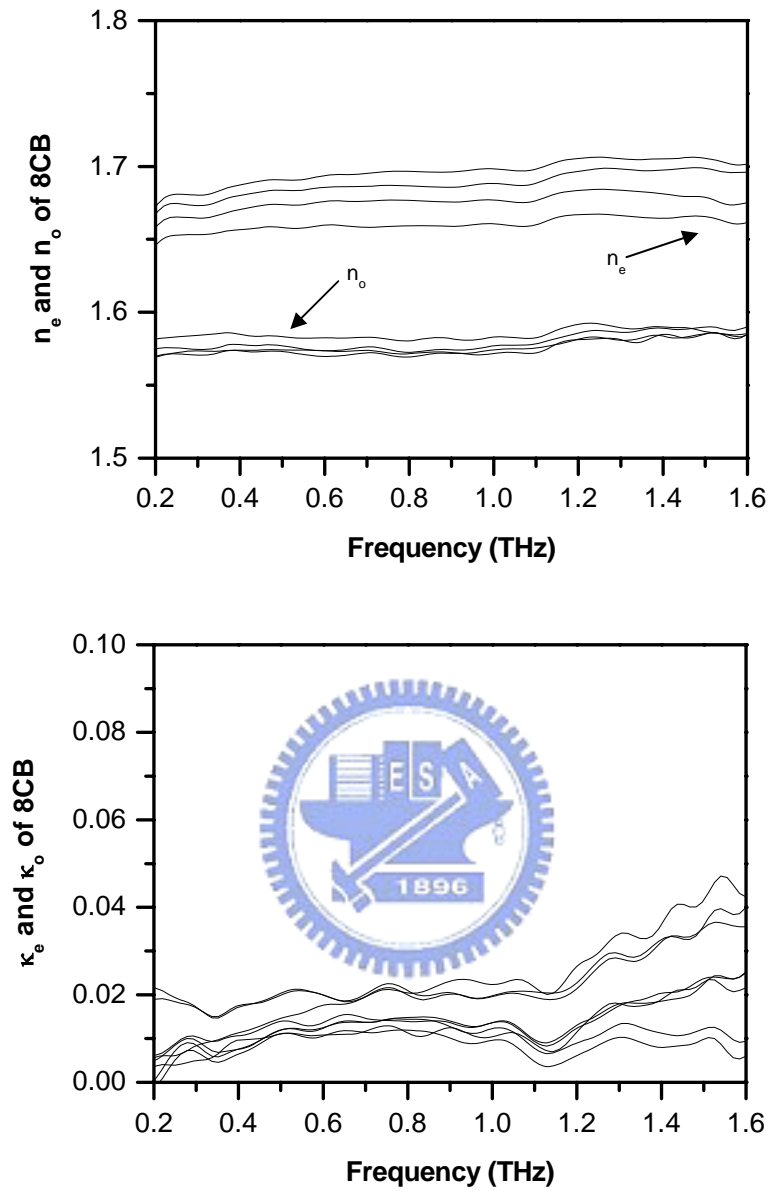


圖 6 液晶 8CB 在 33°C-40°C 折射率的實部與虛部。

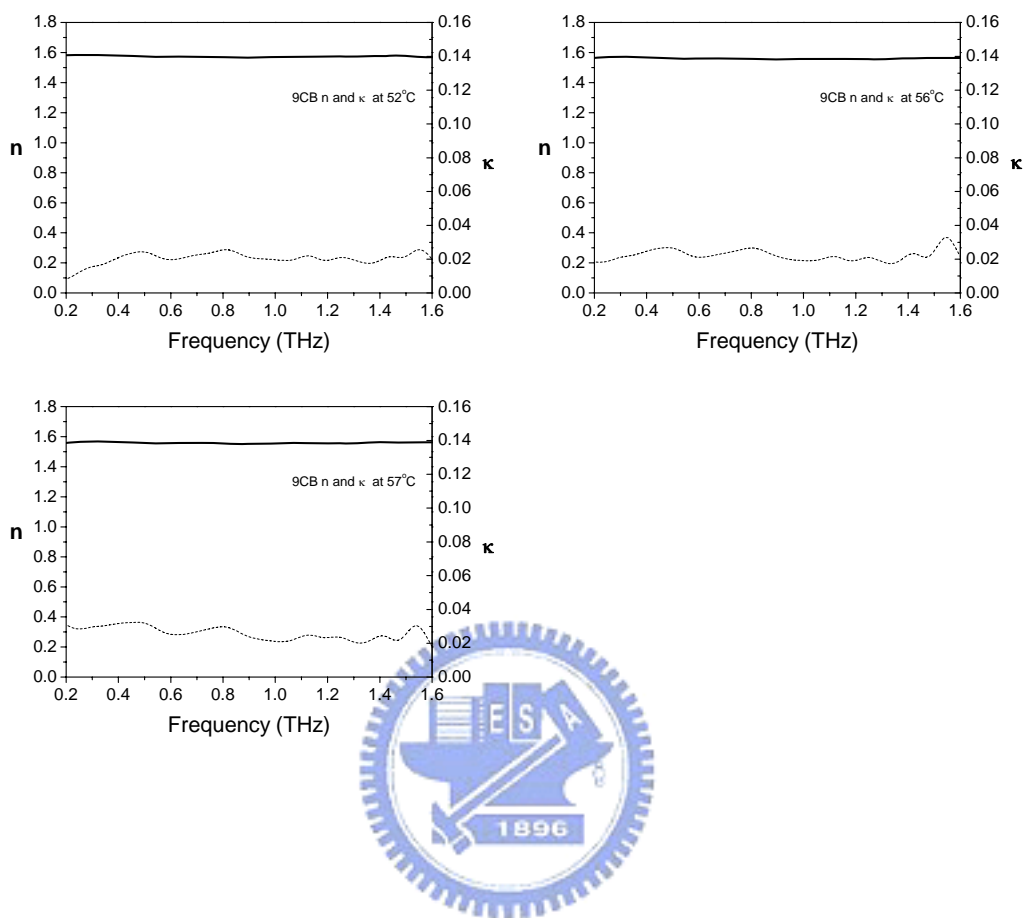


圖 7 液晶 9CB 在 52、56、57°C 折射率。實線是折射率的實部 n ；
虛線是折射率的虛部 κ 。

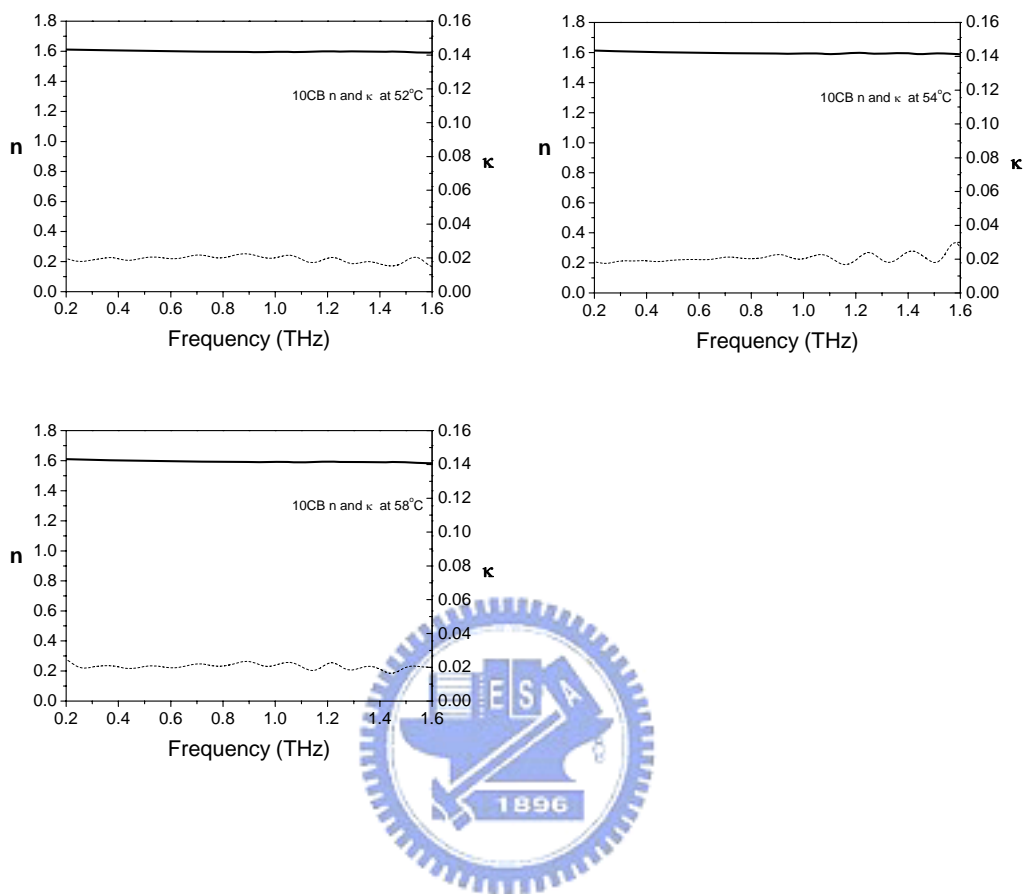


圖 8 液晶 10CB 在 52、54、58°C 折射率。黑色是折射率的實部 n ；紅色是折射率的虛部 κ 。

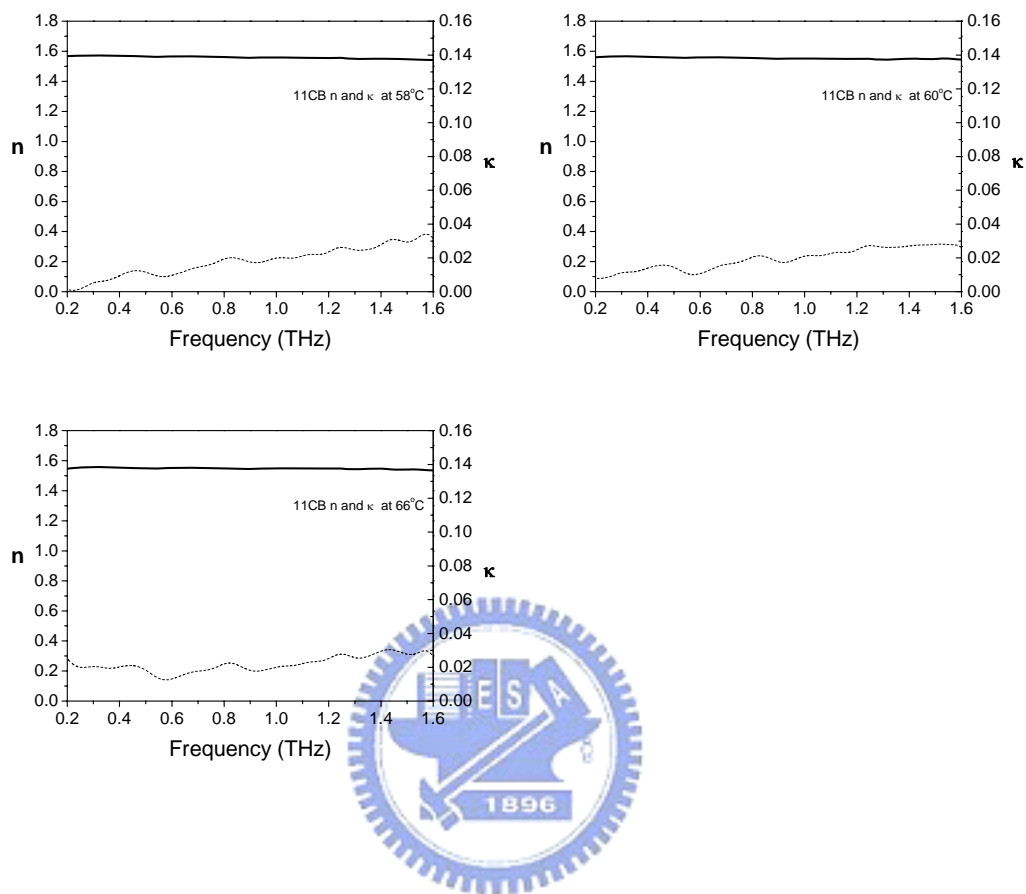


圖 9 液晶 11CB 在 58、60、66°C 折射率。實線是折射率的實部 n ；
虛線是折射率的虛部 κ 。

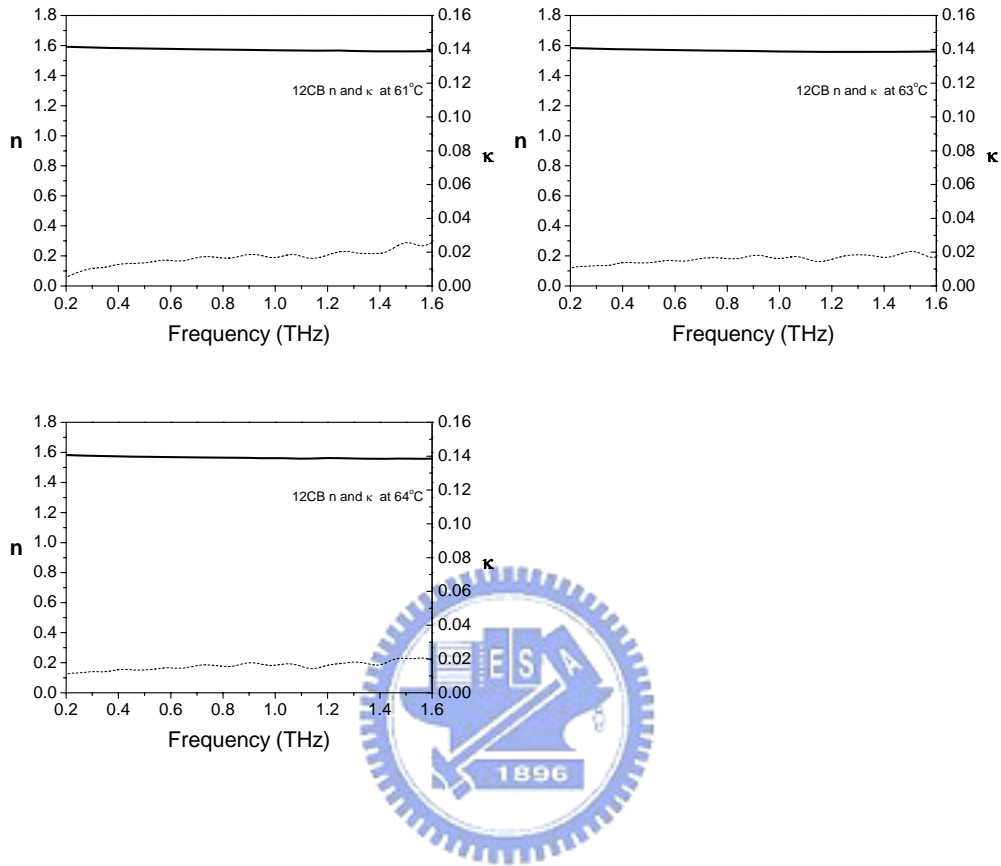


圖 10 液晶 12CB 在 61、63、64°C 折射率。實線是折射率的實部 n ；

虛線是折射率的虛部 κ 。